

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции
23– 25 ноября 2022 г.***

Часть 2

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 410 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»
АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»
АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»
ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЫШАНЬ, КНР
ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»
ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»
АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

Уважаемые коллеги!

Организационный комитет приветствует участников XXIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». Впервые конференция была проведена в 1997 г. и в последующие десятилетия приобрела популярность и известность не только в Кузбассе и России, но и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Традиционно, осенью, на несколько дней Сибирский государственный индустриальный университет превращается в площадку оживленных дискуссий, профессионального обсуждения и ознакомления научной и производственной общности с новейшими результатами исследований и технологических решений в области металлургического производства, обработки и сварки металлов и сплавов, ресурсосбережения, рециклинга и экологии, автоматизации и цифровизации процессов производства, определяются передовые тенденции и задачи на перспективу.

В работе конференции приняли участие ученые образовательных и научных организаций, ведущие специалисты промышленных предприятий России, Китая, Канады, Ирака, Казахстана, Таджикистана, Азербайджана, направившие в адрес организационного комитета 105 докладов.

Секции конференции:

1. Исследования, теория и практика металлургических процессов.
2. Исследования, теория и технология обработки материалов металлургического производства.
3. Современные технологии обработки металлов.
4. Ресурсо- и энергосбережение, экология и утилизация отходов металлургического производства, охрана труда.
5. Автоматизация металлургических и производственных процессов.

Организационный комитет выражает благодарность всем участникам конференции за высокую активность, творческое и эффективное взаимодействие, партнерство и взаимную поддержку. Уверены, что обмен опытом, высокопрофессиональное обсуждение актуальных научных проблем станут мощным толчком к их эффективному решению, а труды конференции внесут весомый вклад в пропаганду и продвижение передовых достижений мировой и отечественной металлургии.

СЕКЦИЯ 3: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

УДК 669.18.017:621.791.927.5

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОТВОДА

Чинахов Д.А.¹, Акимов К.О.², Полегешко С.А.¹

¹ *Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, chinakhov_da@mail.ru*

² *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Томск, Россия*

Аннотация. В работе исследовано влияние боковых ограничителей (формирующих полозьев) на структуру образцов из нержавеющей стали AISI 308LSi, полученных послойным электродуговым аддитивным выращиванием в среде аргона. Исследования проводили на образцах, наплавленных с помощью: графитовых ограничителей, медных ограничителей, без ограничителей. При использовании графитовых ограничителей большая часть металла образца находится в температурном интервале образования аустенита (45 %), наблюдается более равномерный рост элементов структуры, без резких переходов между наплавленными слоями, в отличие от двух других типов образцов. Технология электродуговой наплавки с применением формирующих полозьев позволяет получить изделие с однородной структурой, что делает её перспективным инструментом производства в аддитивных технологиях.

Ключевые слова: аддитивное производство, моделирование, распределение тепла, термические ограничители, структура, твердость, электродуговая наплавка.

FORMATION OF THE STRUCTURE OF WELDED MULTILAYER SPECIMENS FROM AUSTENITIC STEEL UNDER DIFFERENT HEAT REMOVAL CONDITIONS

Chinakhov D.A.¹, Akimov K.O.², Polegashko S.A.¹

¹ *Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, chinakhov_da@mail.ru*

² *Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,
Tomsk, Russia*

Abstract. In this work, the effect of side limiters (forming skids) on the structure of AISI 308LSi stainless steel specimens obtained by layer-by-layer elec-

tric arc additive growth in argon was studied. The studies were carried out on samples deposited with the help of: hafite limiters, copper limiters, without limiters. When using graphite limiters, most of the sample metal is in the temperature range of austenite formation (45%), a more uniform growth of structural elements is observed, without sharp transitions between the deposited layers, unlike the other two types of samples. The technology of electric arc surfacing with the use of forming skids makes it possible to obtain a product with a homogeneous structure, which makes it a promising production tool in additive technologies.

Keywords: *additive manufacturing, modeling, heat distribution, thermal limiters, structure, hardness, arc welding.*

Введение

Технология аддитивного производства электродуговой многослойной наплавкой плавящимся электродом в среде защитных газов является одной из наименее затратных и обладает высокой производительностью [1]. В процессе аддитивного производства изделий способом электродуговой сварки проволока плавится теплом электрической дуги и расплавленный металл каплями переносится в сварочную ванну, источник нагрева перемещается с нужной скоростью по заданной траектории, расплавленный металл сварочной ванны кристаллизуется и образует слой спроектированной детали [2]. Аддитивное производство позволяет слой за слоем создавать в металле трехмерную модель, спроектированную в системе автоматизированного проектирования [3-5]. На данный момент аддитивное производство методом электродуговой сварки набирает популярность в аэрокосмической отрасли, ядерной и химической отрасли, в машиностроении, судостроении и архитектуре [4]. Послойное 3D выращивание изделий электродуговой наплавкой в среде инертного газа с использованием аустенитной сварочной проволоки позволяет получить более качественный, однородный и плотный наплавленный слой [5]. Это особо актуально, т.к. в последнее время растет потребность в изготовлении изделий с геометрией различной сложности с минимальной обработкой изготовленной поверхности. Однако этот процесс имеет свои недостатки, среди которых значительные остаточные напряжения из-за перегрева металла изделия [1, 6]. В ходе получения изделия путем послойного выращивания происходит неравномерное распределение тепла по его объему, что имеет важное значение при производстве детали больших размеров в различных отраслях промышленности [7].

При изготовлении изделий методом послойного 3D выращивания, потенциально, могут быть использованы металлы с хорошей свариваемостью, среди которых стали [8], сплавы на основе Al [9], Ti [10] и Ni [11]. Благодаря своим выдающимся механическим свойствам и высокой коррозионной стойкости мартенситные и аустенитные нержавеющие стали также успешно используются для аддитивного производства деталей [12]. В процессе послойного выращивания изделий способом электродуговой сварки происходит влияние термического цикла сварки на морфологию, микроструктуру и механические свойства материала аддитивного производства. Значимое влия-

ние оказывают: количество введенного тепла, скорость охлаждения, количество повторных нагревов изделия [13]. Использование ограничителей в виде формирующих полозьев должно вносить свой вклад в формирование итоговой картины распределения тепла в изделии, т.е. должна измениться структура и свойства наплавленного материала.

Целью данной работы является исследование влияния боковых ограничителей (формирующих полозьев) на изменение структуры многослойных образцов из нержавеющей стали AISI 308LSi, полученных электродуговой наплавкой в среде аргона.

Материалы и методики

Для послойного выращивания образцов использовали сварочную проволоку из нержавеющей стали AISI 308LSi, которая имеет пониженное содержание углерода и предназначена для сварки изделий используемых в широком интервале температур от минус 196 до плюс 350 °С. В таблице 1 представлен химический состав используемой сварочной проволоки [14].

Таблица 1 - Химический состав проволоки марки AISI 308LSi

С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
max 0,03	1,8	0,9	19,9	10,5	0,15

Свойства используемого материала стали AISI 308LSi указаны в таблице 2 [14].

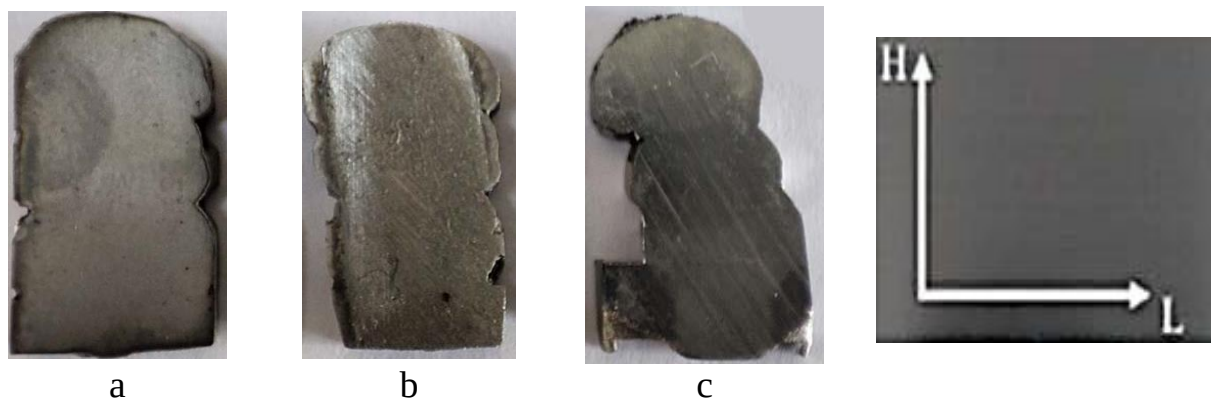
Таблица 2 - Свойства стали AISI 308LSi

Материал	Теплопроводность λ , Вт/м·К	Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент теплового расширения α , К ⁻¹	Предел прочности σ_b , МПа	Температура плавления $T_{пл}$, °С
AISI 308LSi	12,642	193	$16,5 \cdot 10^{-6}$	590	1450

Многослойные образцы наплавливали электродуговой сваркой плавящимся электродом AISI 308LSi диаметром 0,8 мм в среде аргона, сварочный ток $I_{св} = 100$ А, напряжение дуги $U = 20$ В, расход газа $Q = 10$ л/мин, полярность обратная.

Результаты исследований и обсуждение

На рисунок 1 представлены фотографии послойно выращенных образцов сварочной проволокой AISI 308LSi в различных внешних условиях: 1 – с использованием тепловых ограничителей (формирующих графитовых полозьев), далее образец № 1; 2 – с использованием теплоотводящих ограничителей (формирующих медных полозьев), далее образец № 2; 3 – без тепловых ограничителей, далее образец №3.



а) образец №1; б) образец №2, с) образец №3

Рисунок 1 - Изображение поперечных сечений образцов

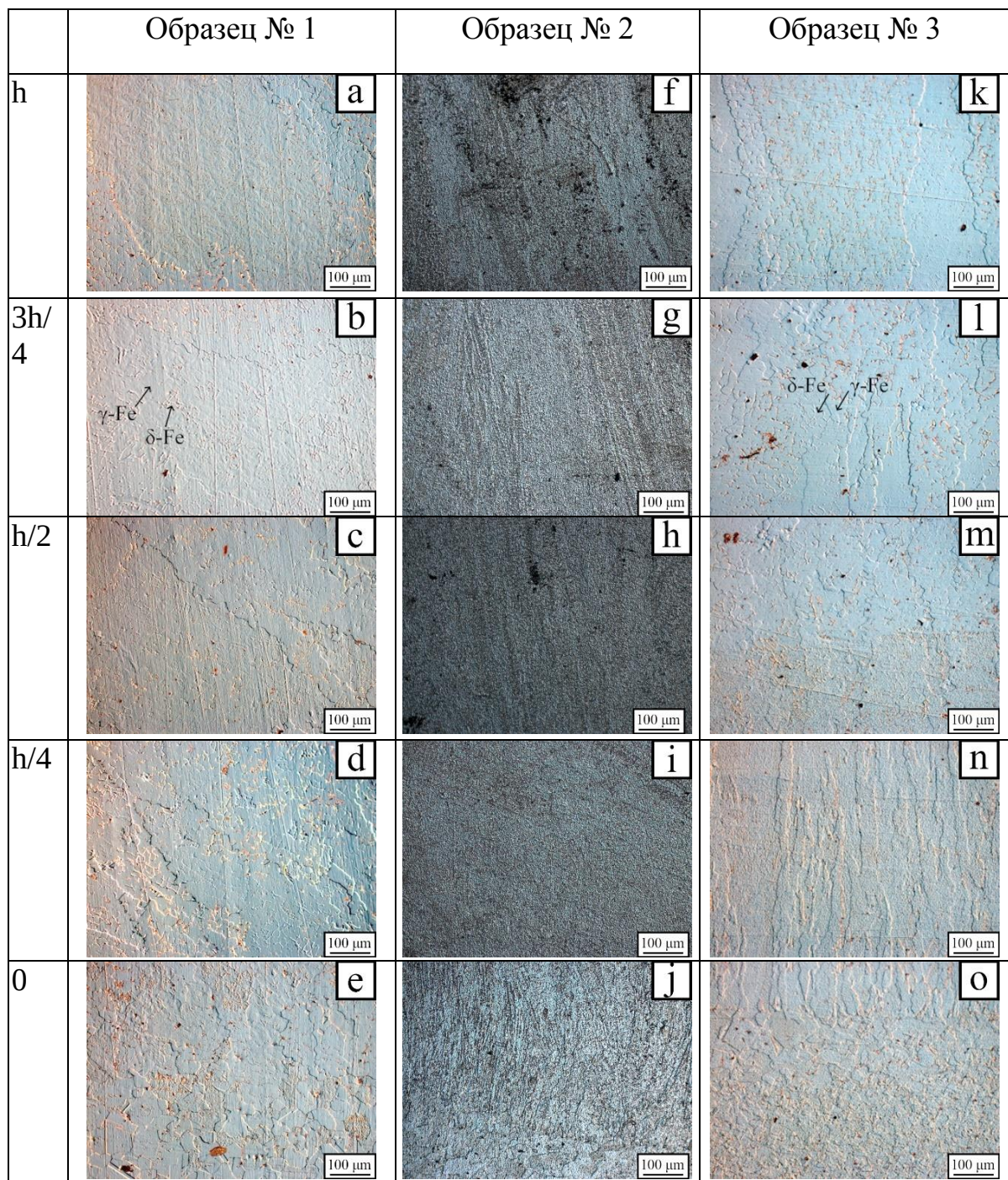
Для достоверности исследования и исключения влияния различий в размерах образцов (рисунок 1) ввели безразмерные значения высоты и ширины образцов: высота образца H варьируется от 0 до h и зависит от расстояния от стальной подложки до верхней поверхности образца; ширина образца L варьируется от 0 до l и зависит от расстояния от левого до правого края образца. Высоту и ширину образцов разделили на доли: $1/4$; $1/2$; $3/4$; 1. На рисунке 2 представлены оптические изображения дендритных структур по оси ($L = l/2$) поперечных сечений образцов №1, №2 и №3.

В образце №3 (рисунки 2, m и 2, o) наблюдаются четкие области перехода между слоями, сопровождающиеся дальнейшим увеличением дендритов. Резкие переходы связаны с повышенным теплоотводом в атмосферу со всех сторон образца. Также наблюдается строгая направленность дендритов по высоте образца.

В образце №2 (рисунок 2, j) и как и в образце №3 (рис. 2 o) четко прослеживается зона перехода между стальной подложкой и наплавляемым материалом. Однако размер дендритов меньше по сравнению с образцом №3. Большая теплопроводность медных ограничителей ускоряет процесс кристаллизации расплавленного металла. В центральных частях образца зоны перехода видны не так четко и их ширина равна ~ 80 мкм (рисунок 2, g).

В образце №1 отсутствует резкая граница перехода между наплавляемыми слоями, не выявлена строгая направленность дендритов. Отсутствие резких переходов между слоями происходит за счет уменьшения отвода тепла с боковых сторон из-за графитовых ограничителей, что обеспечивает перераспределение тепла и приводит к равномерному росту дендритов. Зона сплавления со стальной подложкой более однородная (рисунок 2, e). Это может говорить о более однородных механических свойствах по высоте образца №1.

На рисунке 3 представлены зависимости, описывающие изменение ширины дендритов по высоте образцов в областях $L = l/2$ (рисунок 3, а) и $L = 0$ (рисунок 3, б).

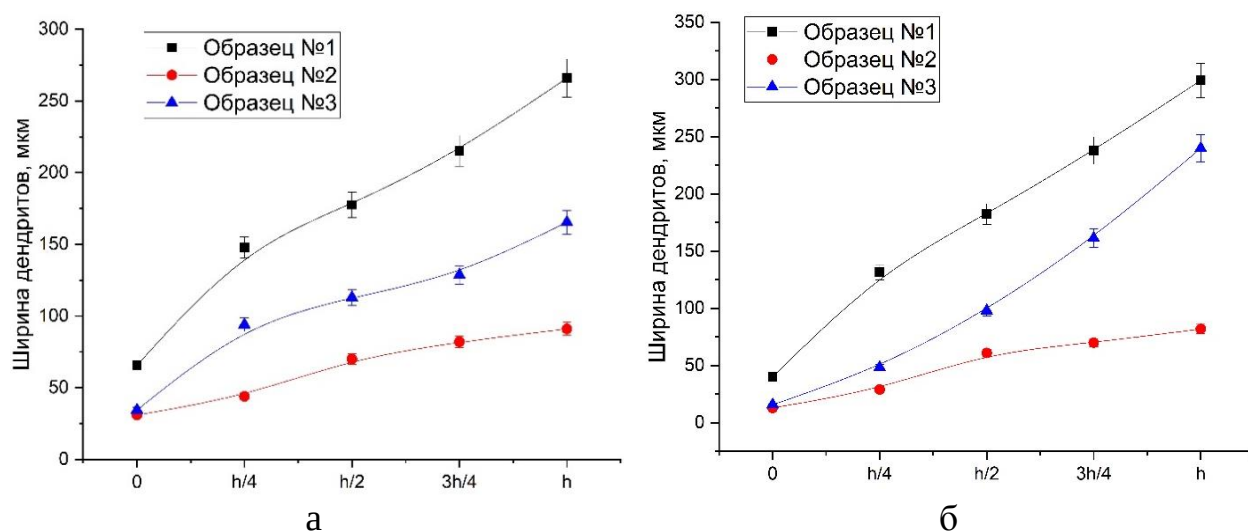


(a–e) – образец №1, (f–j) – образец №2, (k–o) – образец №3

Рисунок 2 - Оптические изображения структур по оси ($L = l/2$)
поперечных сечений образцов

Установлено (рисунок 3), что ширина дендритов у образца №1 больше, в среднем в 1,6 раза, по сравнению с образцом №3, как в центральной, так и в крайней боковой части. Данное отношение между образцами №1 и №2 составляет 2,5 раза в центральной части и 3,5 раза в краевой части. Характер распределения значений ширины дендритов для образца №1 сохраняется в отличие от образцов №2 и №3. Полученные зависимости были аппроксимированы методом наименьших квадратов. В образце №1 скорость роста дендритов составляет $18,3 \frac{\text{мкм}}{\text{с}}$, что в 1,5 раза больше, в случае образца №3, для ко-

торого скорость роста дендритов равна $12,1 \frac{\text{мкм}}{\text{с}}$, и в 3,2 раза больше по сравнению с образцом №2 – скорость роста дендритов равна $5,7 \frac{\text{мкм}}{\text{с}}$. Наименьшее значение скорости роста дендритов для образца №2 связано с большим значением коэффициента теплопроводности медных ограничителей по сравнению с образцами №1 и №3, для которых теплообмен между металлом образца и окружающей средой протекал медленней и возникали более благоприятные условия для роста дендритов.



а) в центральной части; б) в крайней боковой части

Рисунок 3 - Зависимости изменения ширины дендритов по высоте

На основе анализа результатов исследования разработаны зависимости изменения ширины дендритов в центральной части образцов от температуры (рисунок 4).

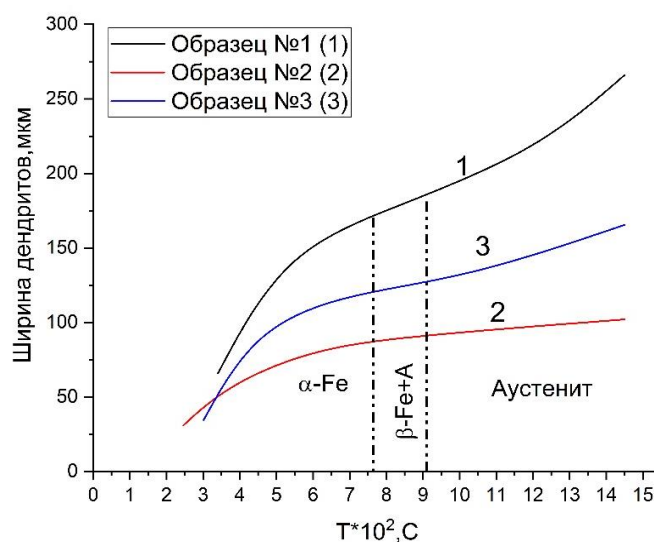
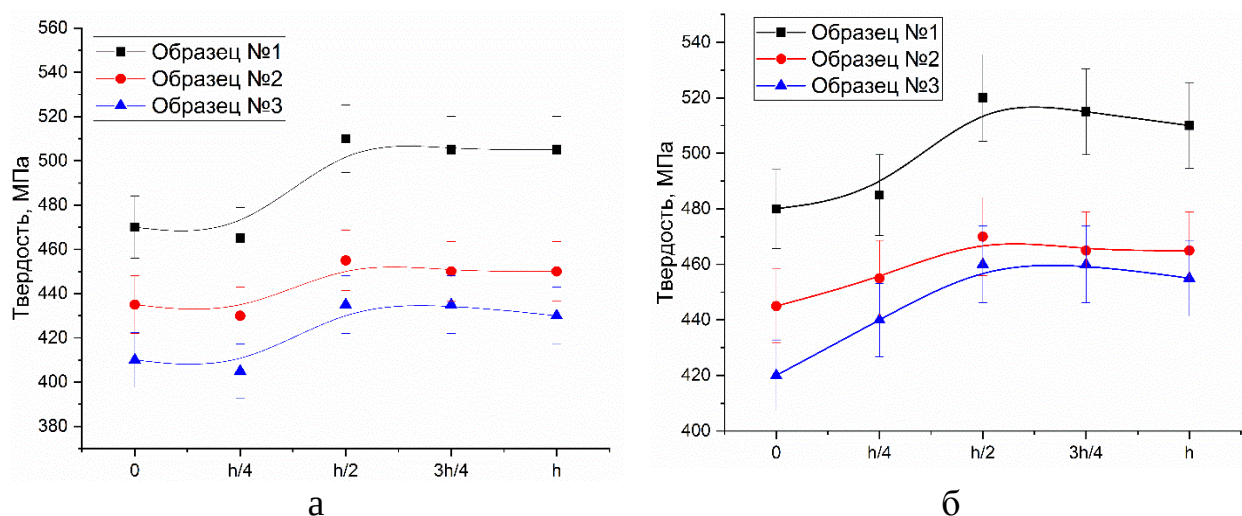


Рисунок 4 - Зависимость ширины дендритов в центральной части образцов от температуры.

Анализ результатов исследования (рисунок 4) показал, что большая часть кривой для образца №1 располагается в температурной области, соответствующей аустенитной фазе. Повышение температуры выше 911°C при-

водит к образованию аустенитной фазы. Площадь областей содержащих аустенитную фазу для образцов №1 и №3 составляет 61 % и 54 % соответственно. Для образца №2 данное значение равно 58 %. Таким образом, можно сделать предположение, что у образца №1 будет наблюдаться меньшее количество δ -Fe фазы, чем у образцов № 2 и №3. Данные фазовые превращения могут привести к увеличению механических свойств получаемых изделий из нержавеющей стали AISI 308LSi, учитывая, что твердость аустенита в 2 раза больше, чем твердость феррита [15]. Для подтверждения данного предположения было проведено измерение твердости трёх образцов.

На рисунке 5 представлены изменения твердости в поперечных сечениях образцов №1, №2 и №3 по высоте в областях $L=l/2$ (рисунок 5, а) и $L=0$ (рисунок 5, б).



а) в центральной части; б) в крайней боковой части

Рисунок 5 - Зависимости изменения твердости по высоте поперечного сечения образцов

Из рисунка 5 видно, что значения твердости у образца №1 больше, в среднем на 10 % и 12 % как в центральной, так и в крайней боковой частях, по сравнению с образцами №2 и №3 соответственно. Характер распределения значений твердости в центральных частях образцов аналогичен. Наблюдается незначительное уменьшение твердости, вызванное фактором увеличения размера элементов структуры. Далее по высоте образца на твердость начинает оказывать влияние фактор содержания аустенита в объеме материала. Для образца №1, в центральной его части, наблюдается пик. Стоит отметить более высокую твердость у образца №2 по сравнению с образцом №3, в среднем на 5 %. В данном случае на значение твердости влияет малый размер дендритов у образца №2. Доли аустенитной фазы в образце №3 недостаточно, чтобы компенсировать эффект размера дендритов. При продвижении от центральных частей образцов к верхней части доля аустенита уменьшается, что приводит к незначительному уменьшению твердости образцов.

Выводы

Таким образом, использование термических ограничителей в виде

графитовых полозьев позволяет получить готовое изделие с более однородным распределением структуры по объему наплавленного металла образца. Наблюдается общее повышение значения твердости за счет более активной диффузии δ -феррита в аустенит в среднем на 12 %, по сравнению с исследуемыми образцами, несмотря на общий рост размеров дендритов. Такая технология позволяет получить изделие с однородной структурой и свойствами, что делает её перспективным инструментом производства в электродуговых аддитивных технологиях.

Применение медных ограничителей приводит к формированию более мелкой по размерам элементов структуре, т.е. в случае использования других материалов для наплавки может являться плюсом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0003.

Библиографический список

1. Механические и трибологические свойства металлической стенки выращенной электродуговым способом в среде защитных газов / М.А. Кузнецов, В.И. Данилов, М.А. Крампит, Д.А. Чинахов, М.С. Слободян // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 18–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.
2. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones / S.A. Khairallah et al. // Acta Mater. 2016. 108. pp. 36–45.
3. J. Gu, J. Ding, S.W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, *et al.* The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3 Cu alloy Mater Sci Eng A, 651 (2016), pp. 18-26.
4. R. Li, J. Xiong, Y. Lei Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts J Manuf Process, 40 (2019), pp. 59-67.
5. L.E. Murr, S. Gaytan, A. Ceylan, E. Martinez, J. Martinez, D. Hernandez, *et al.* Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting Acta Mater, 58 (5) (2010), pp.1887-1894.
6. S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove Wire+ arc additive manufacturing Mater Sci Technol, 32 (7) (2016), pp. 641-647.
7. Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Xu, J.; Norrish, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement. J. Manuf. Process. 2018, 35, 127–139.
8. Karayel E., Bozkurt Y. Additive manufacturing method and different welding applications. Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9, 5. pp. 11424-11438.
9. Yan, L. Wire and Arc Addictive Manufacture (WAAM) Reusable Tooling Investigation. 2013. Available online: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/12308> (accessed on 23 February 2020).
10. Williams, S.W.; Martina, F.; Addison, A.C.; Ding, J.; Pardal, G.R.; Co-

legrove, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Mater. Sci. Technol. 2016, 32, 641–647.

11. Xu, F.; Lv, Y.; Liu, Y.; Shu, F.; He, P.; Xu, B. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process. J. Mater. Sci. Technol. 2013, 29, 480–488.

12. Bressan, J.; Daros, D.; Sokolowski, A.; Mesquita, R.; Barbosa, C. Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing. J. Mater. Process. Technol. 2008, 205, 353–359.

13. Stützer, J.; Totzauer, T.; Wittig, B.; Zinke, M.; Jüttner, S. GMAW Cold Wire Technology for Adjusting the Ferrite–Austenite Ratio of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Components. Metals 2019, 9, 564.

14. STAINLESS STEEL TECHNICAL HANDBOOK.ESAB [электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.url: https:// www. alas-kuul.ee/media/ wysiwyg/CMS/Stainless%20handbook.pdf](http://www.alaskuul.ee/media/wysiwyg/CMS/Stainless%20handbook.pdf). - 09.07.2021.

15. Zimmermann R., Günther K. Metallurgie und Werkstofftechnik: ein Wissensspeicher Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977. 679 pp.

УДК 538.9:[519.876.5:621.79]

ВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ В КАПЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ

**Сарычев В.Д., Чинахов Д.А., Грановский А.Ю.,
Устюжанин С.В., Сарычев Д.В., Коновалов С.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, chinakhov_da@mail.ru*

Аннотация. Проведено численное моделирование формирования капель в пакете Comsol Physics. Выявлено формирование вихревой зоны вблизи расплавленного торца электрода при формировании капли. Полученные данные могут стать подмоделью комплексного проекта сварка и других технологических процессов.

Ключевые слова: сварка, формирование капель, численная модель, уравнения Навье-Стокса и Максвелла, Comsol Physics.

VORTEX FLOW IN A DROP DURING ELECTRIC WELDING

Sarychev V.D., Chinakhov D.A., Granovsky A.Yu., Ustyuzhanin S.V., Sarychev D.V., Konovalov S.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, chinakhov_da@mail.ru*

Abstract. Numerical modeling of droplet formation in the Comsol Physics package is carried out. The formation of a vortex zone near the molten end of the electrode during the formation of a drop was revealed. The data obtained can become a model for a complex welding project and other technological processes.

Keywords: *welding, droplet formation, numerical model, Navier-Stokes and Maxwell equations, Comsol Physics.*

Процесс сварки плавящимся электродом можно представить в виде четырех основных этапов: формирование капли на торце электрода, течение газоплазменной гетерогенной струи, формирование ванны расплава, кристаллизация и структурно-фазовые превращения в металле шва. Для повышения качества технологий сварки, используется компьютерное моделирование как отдельных этапов так и всего процесса сварки в целом [1–3]. Центральной задачей является повышение качества управления процессом образования и отрыва капли. В [4] рассмотрены нерешенные вопросы и будущие направления исследования сварочной дуги, указано, что механизм формирования и его моделирование требуют дальнейших исследований и разработки. Обозначенная тема исследований весьма актуальна для аддитивных электродуговых технологий. Определение технологических режимов для качественного формирования изделия с максимально гладкой поверхностью для каждого материала является новой отдельной задачей, успешное решение которой определяет надежность и долговечность выращенного изделия.

Цель настоящей работы - моделирование и анализ распределения гидродинамического течения в капле электродного металла на различных этапах ее формирования.

Для моделирования и анализа вихревых течений в капле расплавленного металла использовали проект моделирования формирования капель вблизи торца электрода, созданный в Comsol Physics [5]. В модели используются уравнения непрерывности, Навье-Стокса с учетом электромагнитных сил, энергии, непрерывности электротока и уравнение для векторного потенциала [6-7]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{v} = 0, \quad \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_e \Delta \bar{v} + \bar{j} \times \bar{B} + \bar{g}, \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla H = \nabla(k \nabla T) + |\bar{j}|^2 / \sigma, \quad \nabla(\sigma \nabla V) = 0, \quad \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{j}. \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{v}$ – вектор скорости;

ρ – плотность;

p – давление,

$\bar{j}$ – плотность электрического тока;

$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$ – вектор магнитной индукции;

$\bar{g}$ – ускорение свободного падения;

$\bar{A}$ – векторный потенциал;

H – энтальпия;

T – температура;

V – электрический потенциал;

ν_e – кинематическая вязкость;

σ – электропроводность;

μ_0 – магнитная проницаемость.

Эффективная вязкость задается как

$$\nu_e = \begin{cases} \nu, & T \geq T_l, \\ 10^8 \nu, & T < T_l. \end{cases} \quad (2)$$

Для постановки граничных условий обратимся к рисунку 1, на котором AD – ось симметрии (осесимметричный случай), AB – изменяющаяся по времени граница расплавленного металла, соответствующая контакту жидкого металла с плазмой электрической дуги, DC – сечение электрода, находящегося в твердом состоянии, CB – боковая поверхность электрода.

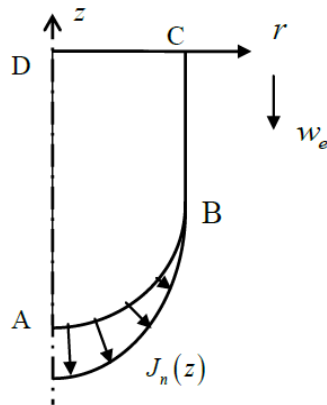


Рисунок 1 - Схема расчета

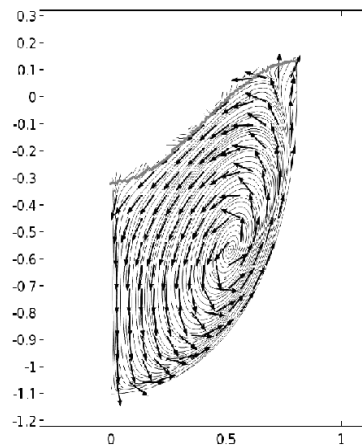


Рисунок 2 - Течение внутри расплавленного электрода

Рассматривается осесимметричная задача с осью симметрии AD в центре электрода. На границе CD задается напряжение и скорость движения электрода. Граница AB является активной поверхностью, принимающей тепловое воздействие плазменной струи. Непосредственно течение плазменной струи в данной постановке не моделируется, поэтому ее воздействие на электрод будем моделировать через постановку соответствующих граничных условий. Плотность электрического тока на поверхности аппроксимируем функцией линейно зависящей от координаты z. Весь ток распределяется по активной поверхности AB электрода как показано на рисунке 1.

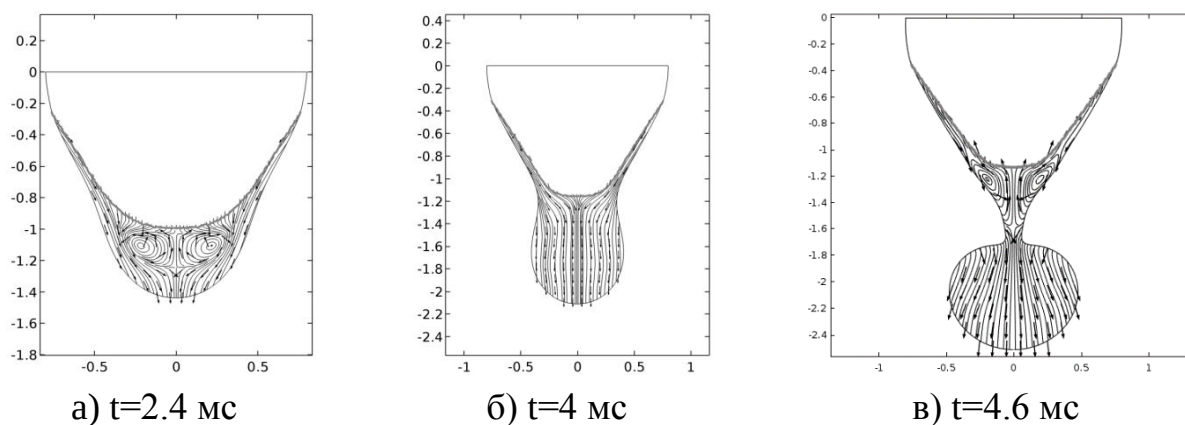


Рисунок 3 - Линии тока в расплавленном электроде в разные моменты времени

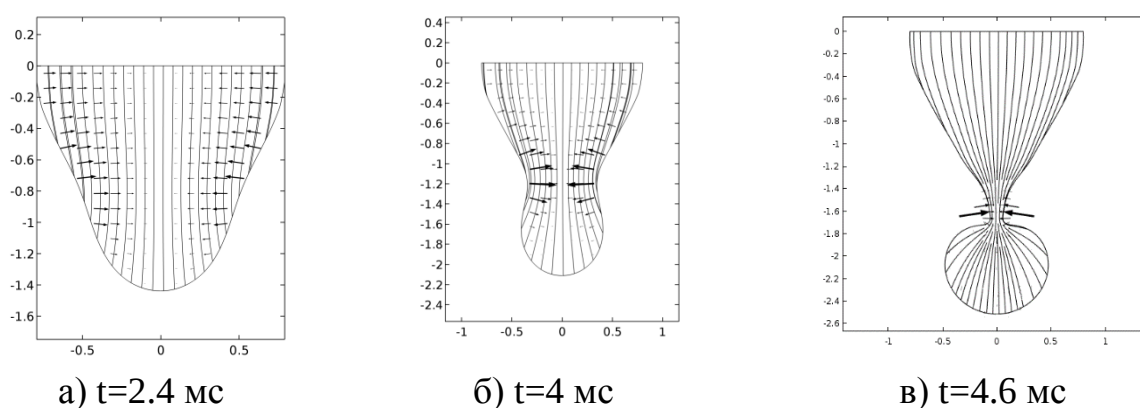
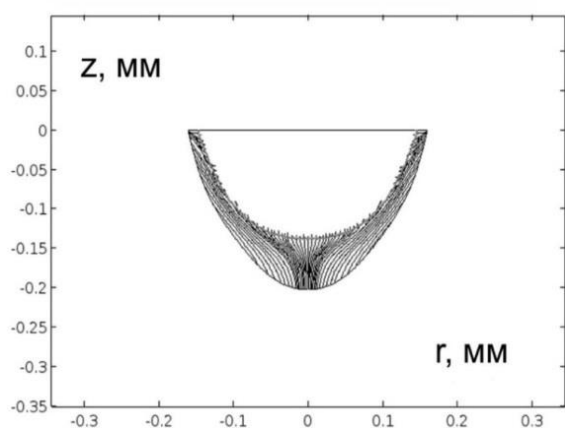


Рисунок 4 - Линии электрического тока и векторное поле силы Лоренца

На рисунках 2 – 5 приведены результаты расчетов. Как видно из рисунка 3 (а) зарождается вихревое течение в расплавленной зоне электрода, расплавленный металл стекает вниз электрода и начинается формирование капли при этом вихревое течение пропадает (рисунок 3,б). Из рисунка 3,в следует, что перед отрывом капли идёт зарождение вихревой зоны, что приводит к зарождению новой капли. Линии тока расплава в различные моменты времени в двух режимах представлены на рисунке 5. Из представленных расчетных данных следует, что формирование вихря в расплавленном металле вблизи электрода реализуется как в глобулярном, так и в спрей режиме. Из экспериментальных данных следует, что спрей-режим реализуется в том случае, когда из капли «выстреливается» тонкая струйка, которая впоследствии дробится на мелкие капли. Выстраивание тонкой струи наблюдается в других экспериментах и является основой формирования капель в микрофлюидике [8-9].

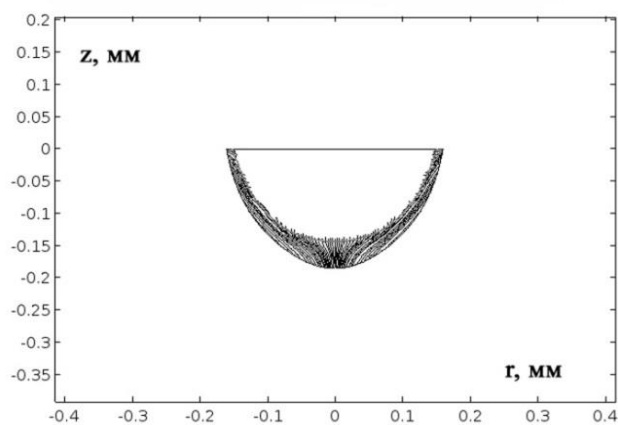
При сварке в защитном газе обнаружены принципиально разные распределения марганца, что можно связать с особенностью развития процессов вблизи электрода [10], которые должны развиваться на фоне развития вихревой зоны. Один из способов получения высокэнтальпийных сплавов (ВЭС) состоит в плавлении трёх электродов и формировании капель [11], поэтому разработанная модель будет полезной для создания и прогнозирования новых ВЭС.

Глобулярный режим, ток 200А

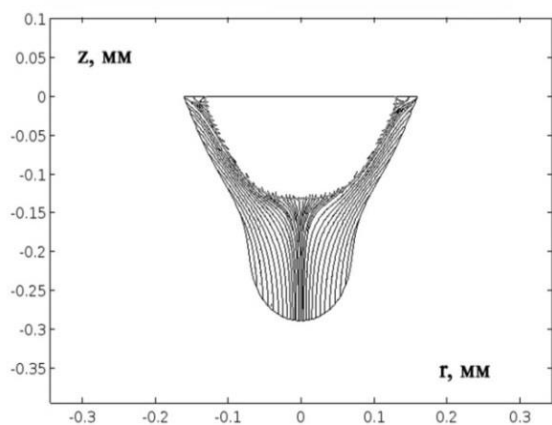


а) 58 мкс

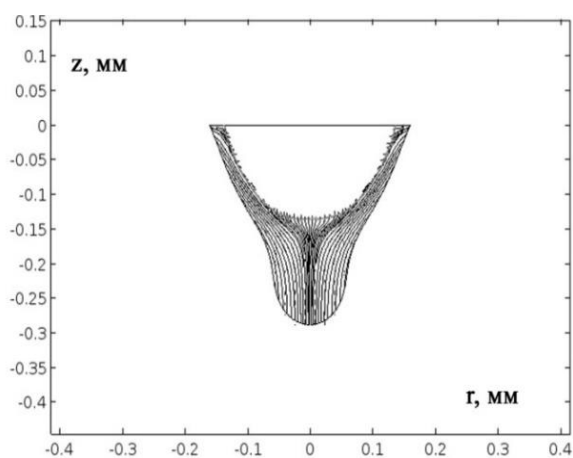
Спрей режим, ток 300А



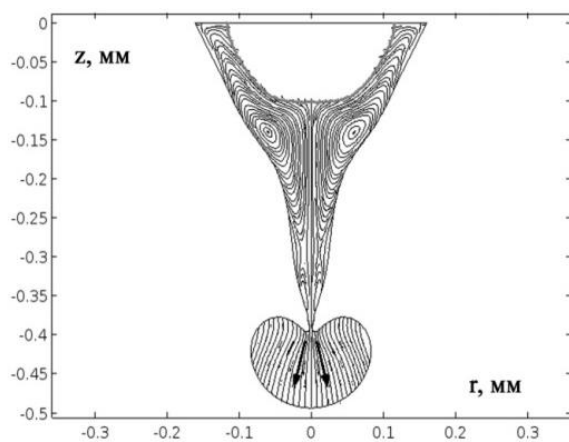
31 мкс



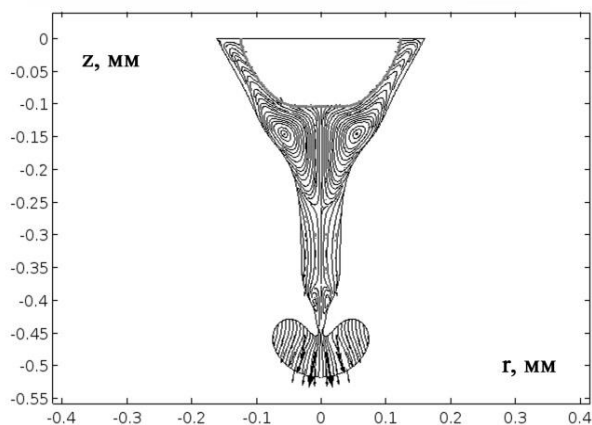
б) 98 мкс



59 мкс



в) 151 мкс



91 мкс

Рисунок 5 - Линии тока в расплаве для различных режимов

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10229).

Библиографический список

1. Aziz S. D. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets. International journal of heat and mass transfer. 2000. V.4. No. 16. 2841–2857p.
2. Coussot P. Yield stress fluid flows: A review of experimental data // Journal of NonNewtonian Fluid Mechanics, 2014, 211. 31–49p.
3. Haidar J. J. Predictions of metal droplet formation in arc welding. Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. V. 29. No.12: 2951-2960.
4. Murphy A.B. A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions / Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. V.5. No 1, 471-489 P.
5. Устюжанин С.В., Грановский А.Ю., Сарычев В.Д. Модели формирования капель на электроде при электросварных технологиях // Наука и молодежь: Проблемы, Поиски, Решения. 2017. – С. 39-42.
6. Zhao Y., Chung H. Numerical simulation of droplet transfer behavior in variable polarity gas metal arc welding. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. 111, 1129–1141P.
7. Wang W. K. Hou, S. J. Hu. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Physics D: Applied Physics. 2003. Vol. 36. № 9. 1143–1152 P.
8. Ganãñ-Calvo, A. M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. Phys. Rev. Lett. // 1998. V.80, 285–288 P.
9. Anna S. L., Bontoux N., Stone H. A. Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels. Applied Physics Letters, 2003. V. 82. Nu 3. 364–366 P.
10. Чинахов Д.А. Влияние расхода активного защитного газа и сварочного тока на содержание марганца и кремния в металле сварного шва // Тяжелое машиностроение.–2013. – № 8. – С. 39–44.
11. Громов В.Е., Коновалов С.В., ЮФ Иванов Ю.Ф. и др. Высокоэнтропийные сплавы. Новокузнецк. 2021, 178с.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ НАПЫЛЕНИЯ НА СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВОВ AL-5SI, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Су Ч.^{1,2}, Коновалов С.В.^{1,2,3}, Чэнь С.^{1,2}, Хуанг Л.^{1,2}

¹*Самарский национальный исследовательский университет,
Самара, Россия*

²*Университет Веньчжоу, Институт лазерного и оптоэлектронного
интеллектуального производства, Вэньчжоу, Китай*

³*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия*

***Аннотация.** Аддитивное производство - это процесс накопления тепла, и высота осаждения оказывает определенное влияние на осаждаемые детали. Для успешного изготовления сплавов Al-5Si используется технология холодного переноса металла на основе электродугового аддитивного производства (WAAM-CMT). Результаты рентгенографии показывают, что различные области по высоте осаждения не могли изменить основной состав, и основные фазы включают α (Al), фазу Si и фазу интерметаллического соединения Al₉Si. С увеличением высоты осаждения дендритная морфология α -Al фазы постепенно уточняется, а эвтектическая Si фаза значительно огрубляется. Области вблизи основного металла и верхняя область образца имеют более высокую микротвердость - около 52,56 Нв и 52,79 Нв соответственно.*

***Ключевые слова:** WAAM-CMT; Высота осаждения; Al-5Si; состав; микроструктура; microstructure*

THE EFFECT OF DEPOSITION HEIGHT ON THE COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURED AL-5SI ALLOYS

Chuanc Su^{1,2}, Sergey Konovalov^{1,2,3}, Xizhang Chen^{1,2}, Lei Huang^{1,2}

¹*Samara National Research University, Samara, Russia*

²*Wenzhou University Institute of Laser and Optoelectronic Intelligent
Manufacturing, Wenzhou, China*

³*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia*

***Abstract.** Additive manufacturing is a process of thermal accumulation, and the deposition height has a certain effect on the deposited parts. The wire arc additive manufacture based cold metal transfer technology (WAAM-CMT) is used to successfully fabricate Al-5Si alloys. The XRD results demonstrate that different regions along deposition height could not change the main composition and the main phases include α (Al), Si phase and intermetallic compound phase Al₉Si.*

With the increase of deposition height, the dendritic morphology of the α -Al phase is gradually refined, and the eutectic Si phase is significantly coarsened. The regions near the base metal and the top region of the sample present higher micro-hardness are about 52.56 Hv and 52.79 Hv, respectively.

Keywords: WAAM-CMT; Deposition height; Al-5Si; Composition; Micro-structure; Microstructure

1 Introduction

As all know, since additive manufacturing (AM) technology combines graphic design, digital control, and machining/welding processes, which are performed simultaneously, it saves production time and cost[1]. As one of the additive manufacturing technologies, the wire arc additive manufacture based cold metal (WAAM-CMT) has widely been used in aerospace, shipbuilding industry[2]. Besides, aluminum alloys are widely applied as raw materials for WAAM-CMT, especially Al-Si, for their good formation ability, high specific strength and excellent corrosion resistance [3]. And there are also works to investigate the effect of the process parameters of CMT technology on the phases, microstructure and mechanical properties [4]. Zhang et al. [5] investigated the microstructure and the mechanical characteristics of Al-6Mg alloy components using variable polarity-CMT (pure CMT, CMT+Pulse (CMTP) and VP-CMT) equipment. Su et al. [6] fabricated Al-5Si alloy components using the WAAM-CMT process by employing three different deposition strategies (Line 90°, Cycle line 90°, and Line 45°). And they further study the effect of heat input on the microstructure and tensile properties of the Al-5Mg fabricated alloy by changing wire feed speed and deposition speed[7]. Besides, additive manufacturing is a process of heat accumulation. As the deposition height increases, the phase, microstructure and micro-hardness of the deposition part will change accordingly.

In this study, the ER4043 wire was adopted as raw material to fabricate by using WAAM-CMT technology. And the composition, microstructure and micro-hardness of the Al-5Si sample at different deposition heights were studied.

2 Materials and methods

In the experiment, the bulk Al-5Si aluminum alloys with a dimension of 150 mm $\times$ 30 mm $\times$ 70 mm were deposited by WAAM-CMT system, and the parameter settings are as follows: ER4043 (Al-5Si) alloy filler wire (FW) with a diameter of 1.2 mm was selected as the deposition material. The cycle line 90° was adopted as deposition strategy. The wire feed speed, deposition speed and Ar flow rate were set as 5.5m/min, 0.6m/min and 25L/min, respectively. Before processing, the 6061-T6 aluminum alloy plate with the size of 200mm $\times$ 60mm $\times$ 10mm was mechanically cleaned and fixed on the workbench as the base metal (BM).

3 Results and discussions

As the XRD results shown in Fig. 1, the main phases in the WAAM-CMT Al-5Si samples with different deposition heights are α -Al, Si phase and intermetallic compound phase Al₉Si, which does not change. But a clear difference between the three regions can be seen in the α -Al phase. There is a

strong main (111) grain orientation peak in all samples, and both (200) grain orientation peaks and (311) grain orientation peaks have relatively high peaks, indicating that these are the main grain orientations of the samples. At the same time, each grain orientation peak at the middle region is higher than the grain orientation peaks at the top and bottom regions, and each grain orientation peak at the top region is higher than that at the bottom region. This shows that the deposition height has an important influence on the grain orientation. Although the inhomogeneity of the microstructure did not change as the deposition height increased, the equiaxed to columnar ratio of the as-deposited samples is greatly improved. As shown in Fig.1, as the deposition height increases, the columnar grains are gradually refined and transformed into finer equiaxed grains, and at any height, the grain size of the microstructure of the inter-layer region is smaller than that of the inner-layer region. In addition, as the deposition height increases, the dendritic morphology of the α -Al phase is gradually refined and transformed into honeycomb grains both within and between layers, the eutectic Si phase is significantly coarsened, and the eutectic Si is spherical or square in shape discontinuous distribution along grain boundaries.

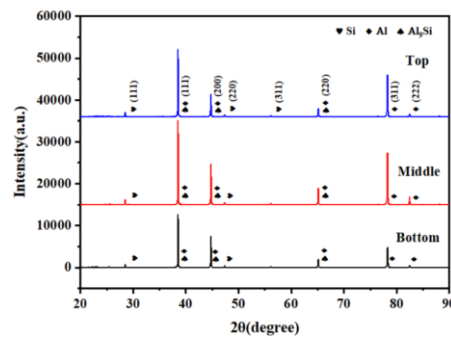


Figure 1 - XRD analysis of different regions along the deposition height

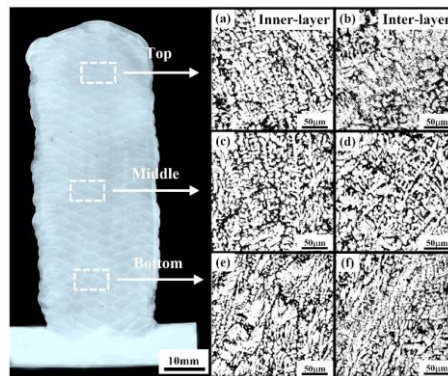


Figure 2 - Microstructure of Al-5Si at different deposition regions along the deposition height

In this experiment, the variation distribution of micro-hardness of WAAM-CMT Al-5Si alloy along the deposition height is shown in Fig.3. Due to the thermal cycle of remelting between layers, pores and cracks are prone to appear between layers. At the same time, the cooling rate of the inter-layer region is faster, and equiaxed grains are more likely to appear around this region, which leads to higher micro-hardness in the equiaxed grain region, while the lower micro-

hardness at the defect region. At mid-height locations near the base metal and the top region of the sample, the micro-hardness values are higher in both the inter-layer and inner-layer regions owing to the formation of finer grain sizes. According to date of micro-hardness, along the deposition height direction of the sample, the micro-hardness value is the largest near the top of the sample and near the substrate, is about 52.56 Hv, 52.79 Hv, respectively, while at the region of the pore defect, the micro-hardness shows the lowest value is about 44.67 Hv. And the micro-hardness of the inter-layer region (52.71 Hv) is significantly higher than that of the inner layer region (48.9 Hv).

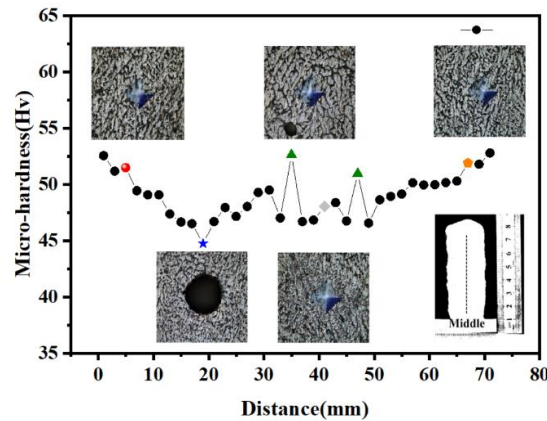


Figure 3 - The micro-hardness distribution of WAAM-CMT Al-5Si alloys along the deposition height

4 Conclusions

The analysis of the composition, microstructure, and micro-hardness of WAAM-CMT Al-5Si alloys along the deposition height demonstrates that the deposition height has an important influence on the grain orientation. The main phases in the WAAM-CMT Al-5Si samples with different deposition heights are α -Al, Si phase and intermetallic compound phase Al_3Si . As the deposition height increases, the dendritic morphology of the α -Al phase is gradually refined, and the eutectic Si phase is significantly coarsened. At mid-height locations near the base metal and the top region of the sample present higher microstructure are about 52.56 Hv and 52.79 Hv, respectively.

Literature

1. M. E. Korkmaz, S. Waqar, A. Garcia-Collado, M. K. Gupta, G. M. Krolczyk, J Mater Res Technol. (2022).
2. B. Tomar, S. Shiva, T. Nath, Mater Today Commun 103739, (2022).
3. S. Hegde, K.N. Prabhu, J. Mater. Sci. 43, 3009–3027, (2008).
4. Y. Zhang, R. Li, P. Chen, X. Li, Z. Liu, J. Alloys Compd. 808, 151634, (2019).
5. C. Zhang, Y. Li, M. Gao, X. Zeng, Mat Sci Eng A-Struct. 711, 415-423, (2018).
6. C. Su, X. Chen, S. Konovalov, R. Arvind Singh, S. Jayalakshmi, L. Huang, J Mater Eng Perform, 30, 2136-2146, (2021).
7. C. Su, X. Chen, C. Gao, Y. Wang, Appl Surf Sci, 486, (2019).

**ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРОЧНОГО ФЛЮСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО
ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНО-
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Михно А.Р.¹, Козырев Н.А.^{1,2}, Крюков Р.Е.¹, Жуков А.В.¹, Бендре Ю.В.¹

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, mikno-mm131@mail.ru*

²*ГНЦ РФ "ФГУП ЦНИИчермет им.И.П.Бардина", г. Москва, Россия.*

***Аннотация.** В работе представлены результаты исследования сварочного флюса, изготовленного из шлака от производства ферросиликомарганца и флюса марки АН-148А при проведении ремонтно-восстановительных работ деталей металлургического оборудования путем наплавки порошковой проволокой ПП-Нп-35В9ХЗСФ.*

***Ключевые слова:** наплавка; порошковая проволока; сварочный флюс; шлак силикомарганца; АН-348А; микроструктура; неметаллические включения; твердость; износостойкость.*

**STUDIES OF WELDING FLUX, MADE FROM TECHNOGENIC RAW
MATERIALS OF METALLURGICAL PRODUCTION DURING REPAIR
AND RESTORATION WORKS OF METALLURGICAL EQUIPMENT**

Mikhno A.R., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Zhukov A.V., Bendre Yu.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, mikno-mm131@mail.ru*

GNC RF "FSUE TsNIIchermet im.I.P.Bardin", Moscow, Russia

***Abstract.** The paper presents the results of a study of welding flux made from slag from the production of ferrosilicomanganese and flux grade AN-148A during repair and restoration work on parts of metallurgical equipment by surfacing with flux-cored wire PP-Np-35V9Kh3SF.*

***Keywords:** surfacing; flux-cored wire; welding flux; silicomanganese slag; AN-348A; microstructure; non-metallic inclusions; hardness; wear resistance.*

Прокат металла – это очень сложная и энергозатратная операция. Для обжатия материала, достижения определённых размеров обрабатываемого профиля используются прокатные валки. Валки в процессе своей работы берут на себя внушительное усилие, которое возникает непосредственно в процессе работы всей прокатной линии. Именно поэтому прокатный валок – наиболее изнашивающаяся часть любого прокатного стана [1-4]. Вопрос восстановления прокатных валков является очень актуальным [5-10], и он

требует постоянного развития технологии его проведения. Ремонт и наплавка поверхности бочки прокатного вала является очень трудоемким процессом, на который затрачивается довольно большой временной ресурс, поэтому появление новых материалов [11-13], усовершенствование имеющихся технологий восстановления, а также поддержка работоспособности валков является одной из самых значимых задач в прокатном производстве.

Целью данной работы является исследование новых материалов применяемых для восстановления прокатных валков в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также исследование свойств наплавленного металла порошковой проволокой 35В9ХЗСФ под разработанным флюсом на основе шлака силикомарганца [14-15] и флюса марки АН-148А.

Для проведения исследования были предоставлены образцы проволоки марки 35В9ХЗСФ диаметром 3,6 мм. Изготовленные ООО «ОФЗ Новокузнецк» с сертификатом качества, представленным в таблице 1.

Таблица 1- Данные сертификата качества

Условное обозначение продукции						Марка оболочки			Коэффициент заполнения, %	Твердость HRC
ПП-Нп-35В9Х3СФ						08Ю 0,6×14				
Химический состав наплавленного металла, %										
С	Cr	Si	Mn	W	V	P	S	Mo	41	48÷52
0,362	3,10	0,61	0,06	7,4	0,092	0,014	0,013	≤0,05		

Первые опыты по наплавке образцов производилась под флюсом марки АН-348А и флюсом на основе обогащённого шлакового щебня производства силикомарганца с химическим составом, представленным в таблице 2. Маркировка исследуемых образцов по используемому флюсу: АН-348А - 1.1, Шлак SiMn - 1.2.

Таблица 2 – Химический состав используемого флюса

Массовая доля элементов, %													
Флюс (№ образца)	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	P	ZnO	C	F	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
АН-348А (1.1)	2,38	4,81	15,25	22,41	13,99	23,58	0,041	0,031	0,012	0,020	10,46	2,56	0,14
Шлак SiMn (1.2)	0,50	15,95	28,15	41,07	6,95	1,78	0,21	0,02	0,011	0,029	0,21	0,16	0,049

Режим наплавки образцов выбран исходя из ранее используемого режима наплавки: сила тока 410А, напряжение 29В, скорость наплавки 30 см/мин.

После наплавки образцов изучался химический состав наплавленного слоя, проводились металлографические исследования, осуществлялся замер твердости наплавленного слоя, проводились механические испытания на потерю массы образца при трении металл-металл, а также статистическая об-

работка полученных данных.

Химический состав полученных образцов представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав наплавленного металла

№ образ-ца	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	W	V	Mo	Al	Nb	S	P
1.1	0,34	0,76	1,75	4,04	0,07	0,09	0,016	9,62	0,10	0,28	0,063	0,05	0,014	0,018
1.2	0,38	0,79	1,78	3,94	0,07	0,08	0,005	9,40	0,09	0,32	0,025	0,05	0,04	0,013

Как видно из таблицы 3 усвоение основных элементов находится примерно на одном уровне и более высокого угара основных элементов под исследуемым флюсом не наблюдается, при этом отмечается повышенное содержание серы и пониженное фосфора.

Измерение твердости наплавленного слоя (таблица 4) исследуемых образцов выполняли по методу Бринелля с помощью ультразвукового твердомера УЗИТ–3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59.

Механические испытания на потерю массы образца при трении металл-металл, наплавленного слоя опытных образцов определяли путем проведения испытаний на износ на машине 2070 СМТ-1. Результаты износостойкости исследуемых образцов представлены в таблице 5. Пониженные значения твердости и износостойкости под исследуемым флюсом могут быть связаны с несколько более низкими значениями вольфрама и хрома в наплавленном слое.

Таблица 4 –Твердость наплавленного слоя исследуемых образцов

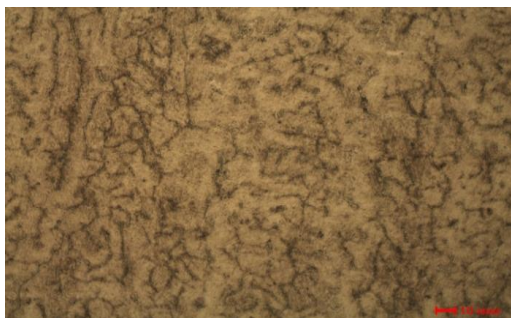
№ образ-ца	Твердость HB										Твердость HRC				
	61 4	53 5	47 5	57 6	61 0	61 4	55 3	52 3	51 8	59 6	52, 4	49, 4	53, 7	52, 4	50, 5
1.1															
1.2	52 7	53 0	54 4	60 1	58 8	63 2	47 5	57 2	61 6	55 5	51, 7	54, 2	47, 4	51, 3	51, 4

Таблица 5 – Основные показатели твердости и износостойкости исследуемых образцов

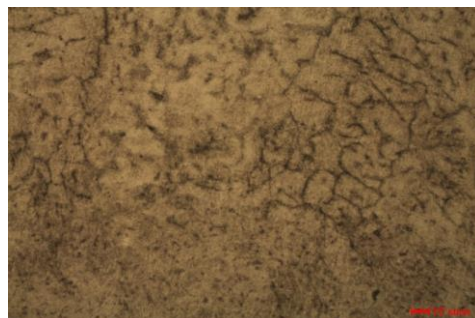
№ образца	Пределы твердости по HB	Пределы твердости по HRC	Средняя твердость HB	Средняя твердость HRC	Износ гр/оборот
1.1	475-614	49,4-53,7	515	51,7	1,24273E-05
1.2	475-632	47,4-54,2	517	51,2	1,40295E-05

Металлографические исследования полированных микрошлифов проводились с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от $\times 100$ до $\times 1000$. Микроструктуру (рисунок 1) выявляли путем травления образцов в растворе 4 % HNO_3 в этиловом спирте.

Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений (рисунок 2, таблица 6) проводили по ГОСТ 1778-70. Полированную поверхность изучали при увеличении $\times 100$.



а)



б)

а – образец, наплавленный с использованием флюса АН-348А; б – образец, наплавленный с использованием флюса на основе шлака силикомарганца

Рисунок 1 – Структура наплавленных образцов, $\times 500$



а)



б)

а – образец, наплавленный с использованием флюса АН-348А; б – образец, наплавленный с использованием флюса на основе шлака силикомарганца

Рисунок 2 – Неметаллические включения в наплавленном слое, $\times 100$

Таблица 6 – Оценка неметаллических включений в наплавленном слое

№ образца	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
1.1	2а	1а,2а
1.2	2а	2б,2а

Никаких особых изменений при наплавке под опытным флюсом порошковой проволокой 35В9Х3СФ не выявлено. Отличительной особенностью исследуемого флюса является повышенное содержание серы и пониженное фосфора, микроструктура без особых отличий (рисунок 1), загрязненность неметаллическими включениями без особых отличий (рисунок 2, таблица 6). Внешний вид срезов исследуемых образцов, наплавленных под исследуемыми флюсами, указывает на то, что укрывные свойства рассматриваемых флюсов одинаковы.

Выводы:

1. Показана возможность использования флюса, изготовленного из шлака силикомарганца для наплавки с использованием наплавочных, проволок ти-

па 35В9ХЗСФ с наплавочными флюсами на основе обогащённого шлакового щебня.

2. Разработаны и оптимизированы режимы наплавки с использованием порошковой проволокой диаметром 3,6 мм 35В9ХЗСФ под флюсами, изготовленными из шлака силикомарганца. Выбор энерготехнологических режимов осуществлялся исходя из рекомендованных режимов наплавки по ГОСТ 26101-84.

3. Установлено, что при использовании флюса на основе шлака от производства ферросиликомарганца в сравнении с флюсом марки АН-348А, никаких особых изменений при наплавке порошковой проволокой 35В9ХЗСФ не выявлено. Микроструктура и загрязнённость наплавленного слоя неметаллическими включениями без особых отличий.

Библиографический список

1. Быстров В.А., Дьяков П.К., Уманец А.Г. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла. Известия высших учебных заведений. Черная Metallургия. 2014;57(5):24-29. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-5-24-29>.

2. Сидоров В.А. Закономерность износа вкладышей универсальных шпинделей прокатных станов / В.А. Сидоров, Н.В. Нижник // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2005, №3. – С. 94-96.

3. Рябцев И. А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами / И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – с. 36 –41.

4. Матвиенко В.Н. Оценка формы и размеров сварочной ванны при наплавке комбинированным ленточным электродом / В.Н. Матвиенко, В.А. Мазур, Л. К. Лещинский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 9. – с. 30–33.

5. Расчет зоны проплавления при широкослойной наплавке прокатных валков / Матвиенко В.Н., Лещинский Л.К., Мазур В.А. // Metallург. – 2016. – №1. – с.80–83.

6. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Еко-технологія, 2004. — 160 с.

7. Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // Успехи физики металлов. – 2014. – Т.15. – С. 211–232.

8. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. – 2015. – №4(46). – С. 14–23.

9. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А. и др Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность, стали порошковыми проволоками // Изв. РАН. Сер. физ. – 2014. – Т.78, №10. – С. 1266–1272.

10. Вострецов, Г. Н. Порошковая проволока для плазменной наплавки прокатных валков в среде азота / Г. Н. Вострецов, Т. А. Бич, Л. П. Башенко // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. –

2014. – № 3 (9). – С. 36–40.

11. Исследование влияния состава порошковых проволок на характеристики наплавленного слоя прокатных валков / Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, А. А. Уманский, Д. А. Титов, П. Д. Соколов // Вестник Российской Академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – Новокузнецк, 2016. – Вып. 19. – С. 149–154.

12. Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co / А. И. Гусев, Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении (Литейное и сварочное производства). – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 56–60.

13. Козырев, Н. А. Экспериментальные исследования и обоснование новых составов порошковых проволок для наплавки прокатных валков / Н. А. Козырев, А. А. Уманский, Д. А. Титов // Технологии реновации машин и оборудования : материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XI промышленного салона и специализированных выставок "Промэкспо, станки и инструмент" "Сварка, контроль, диагностика", 25-26 февраля 2016 г. – Уфа : Башкирский ГАУ, 2016. – С. 115–119

14. Выбор энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца для деталей горношахтного оборудования / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, Р. А. Михно // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2020. – № 6. – С. 175–180.

15. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н. А. Козырев, Р. Е. Крюков, А. А. Усольцев, А. Р. Михно, Л. П. Бащенко // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 6 (1422). – С. 55–66.

УДК 669.713.017:538.9

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВОВ А5М, ВТ-1, С2 ПОДВЕРГНУТЫХ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКЕ

**Шляров В.В.¹, Серебрякова А.А.¹, Аксенова К.В.¹,
Загуляев Д.В.¹, Устинов А.М.²**

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, shlyarov@mail.ru*

²*Институт сильноточной электроники СО РАН,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Были исследованы деформационные характеристики сплавов А5М, ВТ1-0, С2 в постоянном магнитном поле. Исследованы процессы ползучести данных металлов. Произведен анализ скоростей ползучести алюминия, титана, свинца. Проведено исследование усталостной долговечности технически чистого алюминия марки А5М и титана ВТ1-0 в по-

стоянном магнитном поле. В результате исследований установлено, что применение постоянного магнитного поля различной индукции приводит к увеличению числа циклов до разрушения.

Ключевые слова: свинец C2, титан VT1-0, алюминий A5M, стационарная ползучесть, пластическая деформация, микротвердость, усталость.

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF A5M, VT-1, C2 ALLOYS SUBJECTED TO MAGNETIC TREATMENT

Shlyarov V.V.¹, Serebryakova A.A.¹, Aksenova K.V.¹,
Zaguliaev D.V.¹, Ustinov A.M.²

¹*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, shlyarov@mail.ru*

²*Institute of High Current Electronics SB RAS,
Tomsk, Russia*

Abstract. The deformation characteristics of A5M, VT1-0, and C2 alloys in a constant magnetic field were studied. The processes of creep of these metals have been studied. The creep rates of aluminum, titanium, and lead have been analyzed. A study of the fatigue life of commercially pure A5M aluminum and VT1-0 titanium in a constant magnetic field has been carried out. As a result of the research, it was found that the use of a constant magnetic field of various induction leads to an increase in the number of cycles before destruction.

Keywords: lead C2, titanium VT1-0, aluminum A5M, stationary creep, plastic deformation, microhardness, fatigue.

В последние десятилетия различные потоки энергии, такие как лазерное излучение, электронный и ионный пучок широко используются для модификации структуры и свойств металлических материалов [1-5]. Наряду с данными методами существует перспективный, но менее изученным, способ изменения деформационных характеристик металлов и сплавов, а именно обработка материала постоянным магнитных полей. Исследование влияния постоянных и импульсных магнитных полей является актуальным направлением современной науки. Открытые эффекты влияния магнитного поля на деформационные характеристики различных материалов получили название – магнитопластические (МПЭ). Последние работы различных международных коллективов показали, что магнитное поле способно на количественном уровне изменять прочностные и пластические характеристики цветных металлов [6-8]. Алюминий и титан широко применяется в бытовой, ракетостроительной и автомобилестроительной промышленности, что обусловлено их уникальными технологическими свойствами [9-10]. Свинец благодаря своим радиационным свойствам, высокой плотности и пластичности, используется в атомной, военной, строительной отрасли и в научно-исследовательской деятельности [11]. Соответственно, находя применение в этих сферах детали и узлы, изготовленные из алюминия, титана и свинца

сталкиваются с различными процессами, приводящими к их деформации и изменению свойств.

В качестве исследуемых материалов использовали сплавы свинца С2, титана ВТ1-0 и алюминия А5М. Для исследований процессов ползучести в магнитном поле в работе использовали цилиндрические образцы диаметром 5 мм и длиной 250 мм.

Для испытаний на микротвердость применялись образцы в форме прямоугольного параллелепипеда, высотой 12 мм, шириной 5 мм, длиной 15 мм. Для приведения структуры свинца, алюминия и титана в равновесное состояние, образцы проходили предварительную пробоподготовку методом рекристаллизационного отжига, при температуре $0,7T_{пл}$ в течение двух часов, затем охлаждались в печи 24 часа при комнатной температуре.

Изучение процесса ползучести проводилось на испытательной установке для растяжения, разработанной и изготовленной в ФГБОУ ВО «СибГИУ» [12]. Установка состоит из жесткого металлического каркаса, в котором установлен источник магнитного поля (значение индукции МП регулировалось путем изменения силы тока в катушках и составило 0,4 Тл) с измерительной аппаратурой и датчиком движения. Датчик движения позволяет зафиксировать удлинения образца во время испытания. Данные времени и удлинения с установки передаются на ПК в виде текстового документа, далее по полученным данным с использованием средств программы Microsoft Excel строятся кривые ползучести и выполняется анализ линейной стадии процесса, в частности определяется скорость ползучести.

При исследованиях микротвердости, образцы располагались в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца с размерами $1,5 \times 1,2$ см и пронизывали ее. Процедура микроиндентирования проводилась на микротвердомере HVS-1000 по Виккерсу. Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения и под нагрузкой составляло 10 с время разгрузки 5 с. Обработка данных по результатам микроиндентирования выполнена в программах Excel и Origin Pro 8.

Усталостные испытания осуществлялись по схеме циклического несимметричного консольного изгиба в условиях усталости с частотой нагружения $3,3 \text{ с}^{-1}$ и одновременном воздействии магнитного поля. Образцы для усталостных испытаний имели форму параллелепипеда с параметрами $4 \times 12 \times 130 \text{ мм}^3$. Имитация трещины осуществлялась двумя надрезами в виде полуокружности радиусами 22 мм.

В результате испытаний, набраны статистические данные по процессу ползучести свинца, получены кривые ползучести поликристаллического свинца в обычных условиях и при действии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл (рисунок 1).

На рисунке 1 представлены кривые ползучести технически чистого поликристаллического свинца в исходном состоянии - **исх**, и с воздействием магнитного поля с индукцией 0,4Тл – **мп0,4**. Проведем анализ полученных данных.

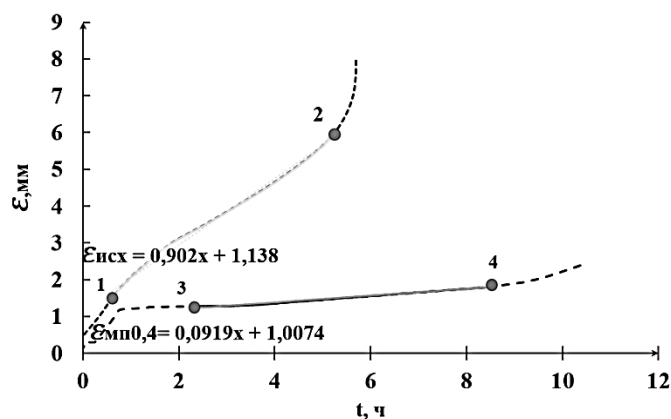


Рисунок 1 - Кривые ползучести свинца в исходном состоянии ($\epsilon_{исх}$) и подвергнутого воздействию магнитного поля ($\epsilon_{мп0,4}$) с индукцией $B=0,4$ Тл

Линейная стадия на кривой $\epsilon_{исх}$ выявлена на отрезке 1-2, а на кривой $\epsilon_{мп0,4}$ линейная стадия процесса ползучести показана на отрезке 3-4. По данным отрезкам осуществлен расчет скорости ползучести поликристаллического свинца. Среднее значение скорости, рассчитанное по 3 испытаниям на ползучесть в исходном состоянии, составило 0,6 %/час. Среднее значение скорости ползучести при воздействии магнитного поля с индукцией 0,4 Тл составило 0,06 %/час, что показывает снижение скорости ползучести свинца по сравнению с исходным значением на 89 %.

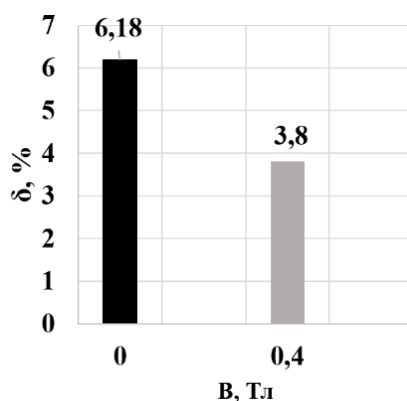


Рисунок 2 - Значения деформации образцов в испытании на ползучесть без воздействия магнитного поля (0) и после воздействия магнитным полем с индукцией $B=0,4$ Тл

Деформация образцов до разрушения, не подвергнутых магнитному влиянию в процессе ползучести в среднем составляет 6,18 % (рисунок 2 (0)). Значение деформации образцов подвергнутых воздействию магнитного поля составило 3,8 % (рисунок 2 (0,4)), по сравнению с исходным значением, деформация уменьшилась на 2,4 %.

Экспериментальные результаты, полученные на титане ВТ1-0 показали, что разрушение образцов титана, в магнитном поле или без него, происходит при степени деформации в среднем 41,65 %. Также установлено, что время необходимое на разрушение образца в постоянном магнитном поле 0,4 Тл сокращается на 10,43 % и составляет 11,77 часа, против 13,14 часа в усло-

виях ползучести без магнитного поля. Применение постоянного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл в процессе ползучести приводит к уменьшению времени, необходимого на разрушение образца, на 27,25 % и составляет 9,56 часа. В магнитном поле – 3,5 %/ч, наблюдается увеличением скорости ползучести на установившейся стадии на 44,94 %. Расчет скорости показал, что средняя скорость ползучести титана без применения магнитного поля составляет 2,41 %/ч. Разрушение образцов титана в условиях ползучести в постоянном магнитном поле 0,4 Тл приводит к увеличению скорости деформации на 44,94 % и составляет 3,5 %/ч, при индукции магнитного поля 0,5 Тл увеличение составило 49,83 %, что соответствовало 3,61 %/ч. На алюминии А5М были получены следующие данные: без магнитного поля – 10,6 %/ч; 0,4 Тл – 4,78 %/ч. Таким образом, магнитное поле снижает скорость ползучести сплава А5М на 55%.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты косвенно свидетельствуют о разупрочнении титана ВТ1-0 и алюминия А5М, приводящему к более быстрому разрушению.

Исследования микротвердости технически чистого поликристаллического свинца позволили определить эффект воздействия магнитного поля на материал. Начальный эффект воздействия магнитного поля на материал отражают значения микротвердости, измеренные сразу же после извлечения образца из магнитного поля, изменения которых показывают эффект влияния магнитного поля на значения микротвердости материала. Начальный эффект представлен на рисунке 3.

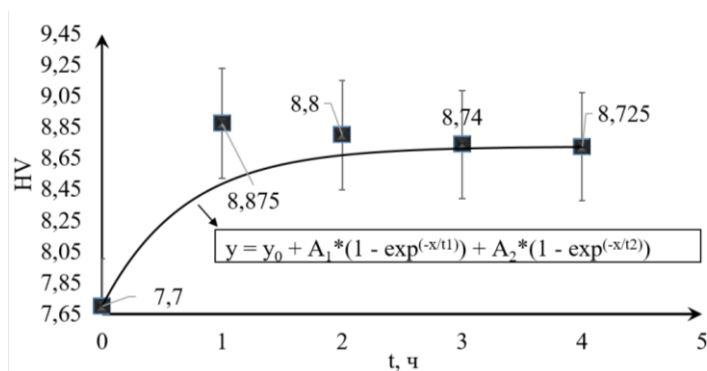


Рисунок 3 - Начальный эффект влияния магнитного поля на микротвердость свинца С2 при $B=0,4$ Тл.

Значение микротвердости до обработки свинца составило $HV_0 = 7,65$ (точка 1, рисунок 3). В точках 2-5 представлены значения микротвердости полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в течении 1 часа (точка 2, рисунок 3), 2 часов (точка 3, рисунок 3), 3 часов (точка 4, рисунок 3) и 4 часов (точка 5, рисунок 3). В течении первого часа выдержки образца в магнитном поле, наблюдается резкое повышение микротвердости до $HV_1 = 8,875$ (точка 2, рисунок 3) на 16,1 %. Далее в точках 3-5 не происходит значительного повышения значений микротвердости. В точке 3 (рисунок 3) $HV_2 = 8,8$, в точках 4, 5 значения составили $HV_3 = 8,74$ и $HV_4 = 8,725$. Таким образом, начальный эффект влияния магнитного поля выражен уве-

личением микротвердости, что позволяет сделать предположение о повышении прочности свинца.

Рассмотрим начальный эффект влияния магнитного поля для различных значений индукции при времени выдержки 1,25 часа на микротвердость алюминия А5М и титана ВТ1-0. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

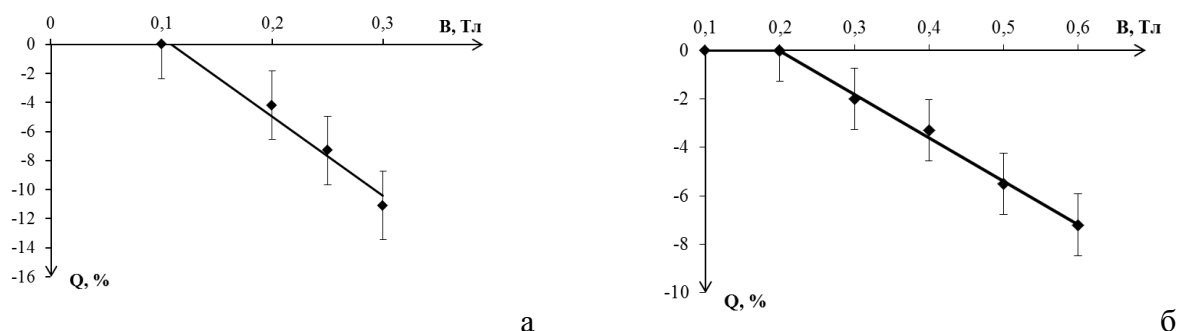


Рисунок 4 – Зависимость относительного изменения микротвердости от индукции магнитного поля сразу после обработки (параметры обработки: $0 \text{ Тл} \leq B \leq 0,3 \text{ Тл}$; $t = 1,25$ часа для А5М(а); $0,1 \text{ Тл} \leq B \leq 0,6 \text{ Тл}$; $t = 1,25$ часа для ВТ1-0(б))

Анализируя данные зависимости можно утверждать, что при одних и тех же параметрах обработки эффект влияния магнитного поля на титан менее выражен, чем на алюминий. При воздействии магнитным полем 0,3 Тл на микротвердость исследуемых металлов было установлено, что микротвердость алюминия А5М под воздействием магнитного поля в течение 1,25 часа снижается на 10-11 %, при этом воздействие на титан ВТ1-0 оказывается менее выраженным, где микротвердость снижается на 2 %. Для алюминия эффекты магнитного воздействия наблюдаются, начиная с индукции 0,1 Тл, однако для титана данные параметры магнитной обработки не оказывают никакого влияния, а заметные изменения микротвердости начинают проявляться со значения индукции 0,3 Тл, но в то же время качественно зависимости подобны. Аппроксимация полученных данным методом линейного приближения показывает, что полученные зависимости подчиняются уравнениям $Q = -54,514B + 5,9343$ (рисунок 4, а) и $Q = -17,9B + 3,56$ (рисунок 4, б).

По результатам усталостных испытаний образцов титана ВТ1-0 и алюминия А5М выявлено, что воздействие постоянным магнитным полем 0,3 Тл приводит к значительному увеличению усталостной долговечности. Установлено, что применение постоянного магнитного поля 0,3 Тл при усталостных испытаниях технически чистого алюминия А5М приводит к увеличению количества циклов до разрушения в 4 раза. С технически чистым титаном ВТ1-0 наблюдается аналогичная картина, происходит увеличение циклов до разрушения в 2,2 раза, относительно испытаний без применения магнитного поля.

Типичное изображение структуры поверхности излома алюминия марки А5М представлено на рисунке 5.

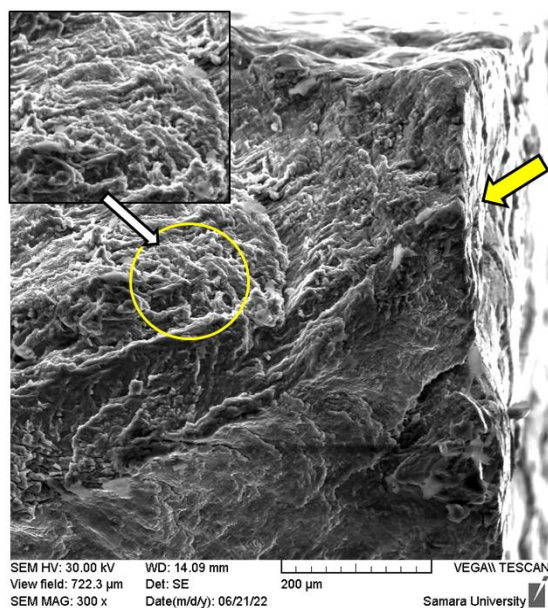


Рисунок 5 – Структура поверхности излома алюминия марки А5М

На рисунке 5 желтой стрелкой указано устье трещины, видно, что фронт распространения трещины представляет собой расходящиеся гребни, устремляющиеся от устья в глубь образца лучами разной величины. На поверхности излома имеются не только признаки хрупкого разрушения в виде фасеток квазискола, но и признаки пластической деформации (гребни). Также стоит отметить наличие в структуре ямок (указано на рисунке кругом), которые можно охарактеризовать как ямки отрыва, этот элемент структуры проявляется в основном в вязком характере разрушения.

Аналогичная морфология поверхности излома наблюдается и на образцах технически чистого титана марки ВТ1-0. Типичное изображение поверхности разрушения образцов титана в магнитном поле и без него представлено на рисунке 6.

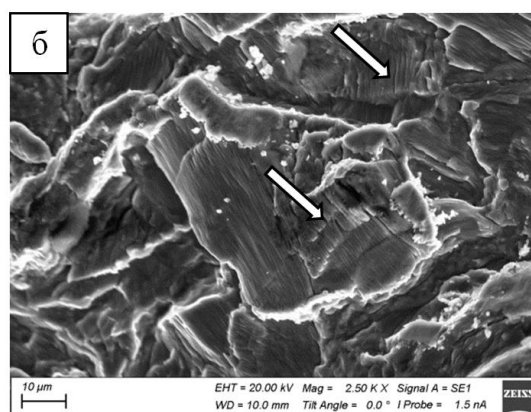
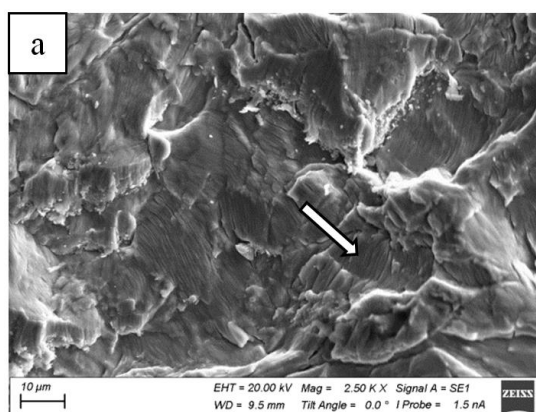


Рисунок 6 – Структура поверхности разрушения титана ВТ1-0:
а - без магнитного поля; б – 0,5 Тл

Также стоит отметить, что на поверхности титановых образцов отчетливо видны бороздки усталости. В изломах, возникших в результате многоциклового усталости сплава ВТ1-0, наблюдаются хорошо выраженные борозды усталости (указаны стрелками на рисунке 6). Под термином «бороздки

усталости» понимаются полосы последовательно расположенных углублений и выступов или полосы со ступенями разлома, ограниченные этими углублениями, расположенные параллельно фронту трещины. При каждом цикле нагружения трещина (изгиб) продвигается вперед на определенное расстояние. При этом на поверхности излома остается последовательный ряд полос.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00118).

Библиографический список

1. Aswegen D.C., Polese C. Experimental and analytical investigation of the effects of laser shock peening processing strategy on fatigue crack growth in thin 2024 aluminium alloy panels // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 142. – P. 105969.

2. Осинцев К.А., Шляров В.В., Бутакова К.А., Романов Д.А. Исследование электровзрывных электроэрозионностойких покрытий системы Ag-W, полученных на меди // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 32-40.

3. Zagulyaev D., Konovalov S., Gromov V., Melnikov A., Shlyarov V. Research into morphology and phase structure in the surface of Al-Si alloy modified by yttrium oxide // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. – 2019. – Vol. 67. Issue 1. – P. 1-5.

4. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Абатурова А.А., Леонов А.А., Устинов А.М. Эволюция микроструктуры и микротвердости поршневого сплава Al-10Si-2Cu, облученного импульсным электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2020. – Т. 17(1). – С. 32-39

5. Li Y., Li M., Utaka Y., Yang C. Wang M. Effect of copper surface modification applied by combined modification of metal vapor vacuum arc ion implantation and laser texturing on anti-frosting property // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 223. – P. 110132.

6. Zagulyaev D., Konovalov S., Shlyarov V., Chen X. Influence of constant magnetic field on plastic characteristics of paramagnetic metals // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6. – 096523.

7. Levitin V.V., Loskutov S.V. The effect of a current pulse on the fatigue of titanium alloy // Solid State Communications. – 2004. – V. 131(3-4). – P. 181-183.

8. Li G.R., Li Y.M., Wang F.F., Wang H.M. Microstructure and performance of solid TC4 titanium alloy subjected to the high pulsed magnetic field treatment // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – V. 644. – P. 750-756.

9. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы. КОМИНТЕХ. – 2005.

10. Тарасов А.В. Металлургия титана. Москва, – 2003. – 328 с.

11. Романтеев Ю.П. Металлургия тяжелых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий; МИСИС - М., – 2010. – 374 с.

12. Коновалов С.В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – С. 64-66.

РАЗРАБОТКА НАПЛАВОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ SN-SB-CU ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Михеев Р.С.¹, Калашников И.Е.^{1,2}, Катин И.В.², Быков П.А.²

¹ *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия, mikheev.roman@mail.ru*

² *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия, kalash2605@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты разработки новых наплавочных композиционных материалов для формирования антифрикционных покрытий. Наплавочные композиционные материалы на основе системы Sn-Sb-Cu с дисперсным упрочнением интерметаллидными частицами (Al-Bi) и Ti₂NbAl были изготовлены процессом экструзии в форме прутков. Изучено влияние состава наплавочных композиционных прутков на сварочно-технологические и триботехнические характеристики.

Ключевые слова: наплавочные композиционные материалы; система Sn-Sb-Cu; дуговая наплавка; сварочно-технологические свойства; триботехнические характеристики.

DEVELOPMENT OF FILLER COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF THE SN-SB-CU SYSTEM FOR THE CLADDING OF ANTI-FRICTION COATINGS

Mikheev R.S.¹, Kalashnikov I.E.^{1,2}, Katin I.V.², Bykov P.A.²

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, mikheev.roman@mail.ru*

² *Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow, Russia, kalash2605@mail.ru*

Abstract. Results of the development of new filler composite materials for the formation of anti-friction coatings have been discussed. Filler composite materials based on the Sn-Sb-Cu system reinforced with intermetallic particles (Al-Bi) and Ti₂NbAl were produced by extrusion in the form of rods. The influence of the filler composite rods composition on the welding-technological and tribological characteristics has been studied.

Keywords: filler composite materials; Sn-Sb-Cu system; arc cladding; welding-technological properties; tribological characteristics.

Многообразие форм подшипников скольжения, применяемых в узлах современной и перспективной техники, обеспечивается за счет их конструктивных особенностей. При этом, другим важным решением, требуемым для

расширения номенклатуры и областей применения подшипников скольжения, является использование для их изготовления специальных материалов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и позволяющим, минимизировать последствия изнашивания, а также гарантировать сохранение работоспособности трибоузла до проведения планового ремонта [1-2]. Развитие данного направления может быть обеспечено созданием новых функционально-организованных композиционных материалов, в которых расположенный на стальном основании рабочий слой представляет собой дисперсно-наполненные композиционные материалы на основе баббита. За счет работы разнородных компонентов (пластичная матрица и высокопрочный наполнитель) подобные материалы характеризуются высоким уровнем эксплуатационных характеристик, значительно превышающим известные антифрикционные сплавы на основе баббита [3].

Функционально-организованные композиционные слои формируют на стальных узлах трения преимущественно процессами дуговой наплавки, которые в отличие от литейных процессов позволяют предотвратить ликвацию [4]. Поэтому одной из важнейших задач является разработка соответствующих присадочных материалов. Причем, подобные материалы должны удовлетворять не только эксплуатационным, в частности триботехническим требованиям, но и обладать достаточным уровнем сварочно-технологических свойств, важное значение из числа которых занимает, например, жидкотекучесть сварочной композиционной ванны, обеспечивающая возможность практической реализации технологического процесса наплавки и формирование удовлетворительных валиков наплавленных покрытий [5]. Поэтому целью работы являлось исследование жидкотекучести сварочной композиционной ванны и триботехнических характеристик разработанных присадочных композиционных прутков на основе сплава баббита Б83 (10 - 12 масс. % Sb; 5,5 - 6,5 масс. % Cu; Sn – остальное по ГОСТ 1320), содержащих в качестве наполнителя интерметаллидные частицы (Al-Bi) или Ti_2NbAl размером менее 100 мкм в количестве 3 % по массе. Композиционные прутки были изготовлены по технологии порошковой металлургии процессом экструзии, что обеспечивало однородность структуры и изотропность свойств [6].

Описание теоретических и экспериментальных исследований

Оценку жидкотекучести сварочной композиционной ванны осуществляли по методу А.А. Ерохина [5, 7]. Для этого определяли ширину (В) и проводили измерение площадей (F_2 и F_1), характеризующих несимметричность поперечного сечения горизонтального валика, сформированного на плоскости с углом наклона 35° (рисунок 1). Кроме того, оценивали значения краевых углов оттекания (φ_1) и натекания (φ_2), позволяющих определить величину равновесного краевого угла смачивания - θ [8]. Горизонтальные валики наносили на пластину из качественной низкоуглеродистой стали 20 (0,17 - 0,24 масс. % С; 0,17 - 0,37 масс. % Si; 0,35 - 0,65 масс. % Mn; $\leq 0,25$ масс. % Cr; Fe – остальное по ГОСТ 1050) размером 180x120x5 мм процессом дуговой наплавки вольфрамовым электродом в среде аргона. В качестве

присадочного материала применяли разработанные композиционные прутки диаметром 3 мм и длиной 300 мм. Наплавку проводили при следующих технологических параметрах режима: сила сварочного тока, I - (55-65) А, напряжение на дуге, U - (18-20) В, скорость наплавки, V_n - 12 м/ч, обеспечивающих сохранения стабильности фазового состава и структуры, отсутствия выгорания легирующих элементов и минимального перемешивание основного и наплавленного металла.



1 – сопло горелки, 2 – вольфрамовый электрод, 3 – дуга,
4 – композиционный пруток, 5 – наплавленный валик, 6 – подложка

Рисунок 1 – Схемы эксперимента (а) и проведения измерений (б),
необходимых для оценки жидкотекучести сварочной
композиционной ванны

Для оценки эксплуатационных триботехнических характеристик разработанных присадочных композиционных материалов проводили испытания на трение и износ в условиях сухого трения скольжения на установке CETR UMT Multi-SpecimenTestSystem. Для этого были изготовлены прутки диаметром 6,3 мм и выбрана схема испытаний «неподвижный палец (испытываемый образец) по вращающемуся диску (контртело, закаленная сталь 40Х)». Испытания проводили в течение 600 с при удельной нагрузке 0,5 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с. В процессе испытаний фиксировали значения коэффициента трения и сопоставляли с таковыми для матричного сплава баббита марки Б83 (ГОСТ 1320), имеющего в настоящее время широкое применение в разных отраслях промышленности в качестве антифрикционного материал.

Результаты и обсуждение

Результаты оценки жидкотекучести сварочной композиционной ванны представлены на рисунке 2, а также в таблице 1. Установлено, что валики, сформированные с применением композиционных присадочных прутков состава Б83 + 3 масс.% (Al-Bi) по сравнению с таковыми, полученными прутками Б83 + 3 масс.% Ti_2NbAl характеризуются меньшими значениями несимметричности сечения (2,43 против 2,81). Кроме того, значения краевых углов оттекания между поверхностью подложки и профилем наплавки у валиков, содержащих в качестве наполнителя дискретные частицы интерметаллидов Ti_2NbAl , уменьшаются, что способствует растеканию сварочной композиционной ванны, а также улучшает формирование наплавленных слоев.

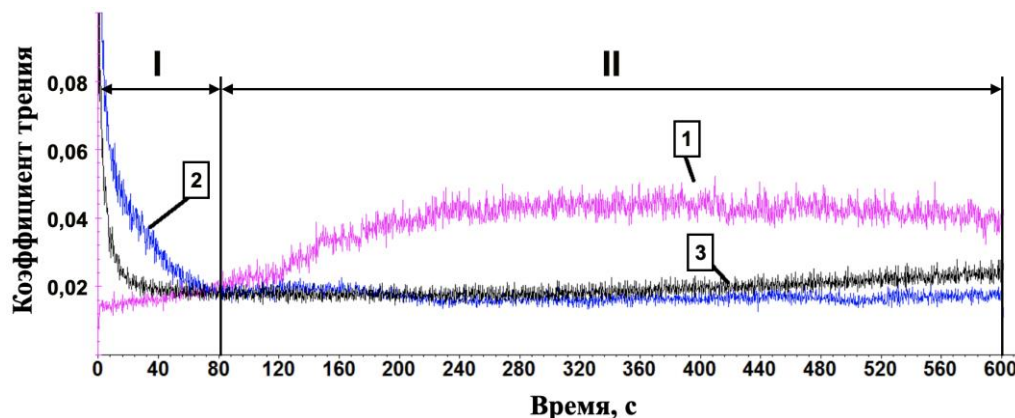


Рисунок 2 – Внешний вид поперечных сечений горизонтальных валков, наплавленных на наклонную плоскость с применением разработанных композиционных наплавочных прутков состава, масс. %:
а) Б83 + 3 (Al-Bi); б) Б83 + 3 Ti₂NbAl.

Таблица 1 - Влияние состава присадочного прутка материала на показатели жидкотекучести сварочной композиционной ванны

Состав присадочного прутка, масс. %	F_2/F_1	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\theta, ^\circ$
Б83 + 3 (Al-Bi)	2,43	57,7	159,5	101,6
Б83 + 3 Ti ₂ NbAl	2,81	40,3	115,6	80,5

Результаты испытаний на трение и износ позволяют выделить на диаграмме изменения коэффициента трения во времени две характерные области (рисунок 3). В течение первых 80 секунд на этапе приработки (I) несмотря на незначительный рост минимальные значение коэффициента трения (0,02) характерны для баббита Б83. На этапе установившегося трения (II) для матричного сплава Б83 наблюдается рост коэффициента трения до значений 0,04. В то время как его минимальные значения на данном этапе демонстрируют разработанные наплавочные композиционные материалы на основе сплава Б83.



Составы образцов: 1 - Б83; 2 — Б83 + 3 мас.% Al-Bi;
3 - Б83 + 3 мас.% Ti₂NbAl.

I - этап приработки; II - этап установившегося изнашивания.

Рисунок 3 - Характерный вид изменения коэффициента трения во времени при удельной нагрузке 0,5 МПа в условиях сухого трения скольжение

Выводы

Таким образом, эксперименты по оценке жидкотекучести сварочной композиционной ванны и триботехнических свойств разработанных присадочных композиционных прутков показали существенное влияние на них типа наполнителя. В частности, при одинаковом содержании наполнителя (3 масс.%) (Al-Bi) или Ti_2NbAl композиционные прутки характеризуются близкими значениями коэффициента трения, меньшими в 2 раза таковые для матричного сплава Б83 в области установившегося трения. Однако, большими значениями несимметричности сечения валика и следовательно, жидкотекучестью, обладает сварочная композиционная ванна, образованная с применением присадочных прутков состава Б83 + 3 масс.% Ti_2NbAl , что позволяет увеличить долю наполнителя в прутках для достижения лучших триботехнических свойств функционально-организованных слоистых композиций.

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00715-22-00.

Библиографический список

1. Языков А.Е., Казанский В.Н., Бускунов Р.Ш. Подшипники и маслосистемы: учебное пособие. - Челябинск: Цицеро, 2010. - 202 с.
2. Дроконов А.М., Осипов А.В., Бирюков А.В. Подшипники турбинных установок: учебное пособие. - Брянск: БГТУ, 2009. - 103 с.
3. Effect of microcrystalline boron particles on structure and tribological properties of welded B83 babbitt layers / L.I. Kobeleva, L.K. Bolotova, I.E. Kalashnikov, A.G. Kolmakov, R.S. Mikheev // Inorganic materials: Applied Research. - 2020. - № 1. - P. 1-6.
4. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing / M. Wei, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, X. Feng // Journal of adhesion science and technology. - 2018. - № 19. - P. 2150-2161.
5. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. – Том.1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирование шва. - Челябинск : Изд-во ЮУрГУ. – 2002. - 585 с.
6. Technological parameters of production and properties of babbitt-based composite surfacing rods and deposited antifriction coatings / I.E. Kalashnikov, A.G. Kolmakov, L.K. Bolotova, P.A. Bykov, L.I. Kobeleva, R.S. Mikheev, M.L. Kheifets // Inorganic materials: Applied Research. - 2019. - № 3. - P. 635-641.
7. Ерохин А.А. Влияние жидкотекучести ванны на геометрическую форму сварного шва и технологическую применимость процесса сварки // Сварочное производство. – 1955. - № 6. - С. 5-9.
8. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. – М : Химия. – 1988. – 464 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБШИРНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЫ, СФОРМИРОВАННОЙ НА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ХИМИКО- ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Шевчук Е.П.¹, Плотников В.А.², Макаров С.В.²

¹*Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, evgeniya-shevchu@mail.ru*

²*Алтайский государственный университет,
г. Барнаул, Российская Федерация, plotnikov@phys.asu.ru,
makarov@phys.asu.ru*

Аннотация. В работе представлены данные о синтезе боридов железа при индукционном нагреве образцов из стали 20 до 1000 °С с обмазкой из бор-содержащей шихты в течение 5, 10 и 15 минут. Из данных рентгеноструктурного анализа установлено, что в ходе нагрева образцов синтезируются бориды Fe₂B и FeB, а также формируется твердый раствор бора в α-Fe. При высокотемпературной выдержке уже в течение 5 минут осуществляется насыщение бором поверхностного слоя стали и формируется обширная диффузионная зона с различным содержанием боридов.

Ключевые слова: сталь 20, микротвердость, химико-термическая обработка, обмазывающая паста, коэффициент диффузии, боридные фазы, величина диффузионной зоны.

INVESTIGATION OF AN EXTENSIVE DIFFUSION ZONE FORMED ON CARBON STEEL BY CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT IN INDUCTION FURNACE

Shevchuk¹ E.P., Plotnikov² V.A., Makarov² S.V.

¹*East Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov,
Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan, evgeniya-shevchu@mail.ru*

²*Altai State University,
Barnaul city, Russian Federation, plotnikov@phys.asu.ru,
makarov@phys.asu.ru*

Abstract. The paper presents data on the synthesis of iron borides during induction heating of samples from steel 20 to 1000 °C with a coating of boron-containing mixture for 5, 10 and 15 minutes. From the data of X-ray diffraction analysis, it was found that Fe₂B and FeB borides are synthesized during heating of the samples, and a solid solution of boron in α-Fe is also formed. During high-temperature exposure, the surface layer of steel is saturated with boron for as early as 5 minutes and an extensive diffusion zone with different boride content is formed.

Keywords: Steel 20, microhardness, chemical-thermal treatment, coating paste, diffusion coefficient, boride phases, diffusion zone size.

Введение

Сплавы системы Fe-B имеют практическое применение благодаря комплексу уникальных свойств, таких как тугоплавкость, высокая твердость, химическая устойчивость в различных агрессивных средах и другие. Так, например, бориды и сплавы, содержащие бор, применяются в атомной энергетике также благодаря своим специальным свойствам [1-2].

Одним из основных, наиболее перспективным и практически повсеместно осуществимым методов внедрения бора в металлическую матрицу, например, углеродистую сталь является химико-термическая обработка (ХТО) [3]. Как известно, борирование относится к одному из перспективных методов нанесения покрытий [4-5]. Основным процессом, протекающим в ходе борирования при высоких температурах является диффузия. В процессе диффузии между атомами внедряемого элемента и атомами основного металла возможно образование как различных твердых растворов (внедрения и замещения) с кристаллической решеткой обрабатываемого металла (пограничные растворы), так и промежуточных фаз и твердых растворов на их основе.

В данной статье проведены исследования структурного состояния обширной диффузионной зоны, сформированной в углеродистой стали 20 в ходе борирования путем обработки вихревыми токами индукционной печи.

Методика

Обширная диффузионная зона сформирована в режиме борирования стальной детали в расплаве под действием нагрева вихревыми токами в индукционной печи. Насыщение поверхностных слоев бором совместно с легирующим элементом – железом осуществлялось при температуре 1000 °С в течение 5, 10 и 15 минут.

Обмазывающая паста приготовлена из шихты с объемным содержанием железа и борной кислоты – 25 % (Fe) + 75 % (H_3BO_3). Помимо железа и борной кислоты в состав пасты входил углерод, аммиак и жидкое стекло. Жидкое стекло при смешивании с шихтой образует кремниевую кислоту H_2SiO_3 – белый студенистый осадок, гель, и далее SiO_2 . Диоксид кремния не позволяет качественно нанести обмазку на поверхность образцов, что приводит к малой сцепляемости с обрабатываемой поверхностью. Для устранения этого недостатка в состав пасты были введены активаторы – гидроксид аммония и углерод, в качестве инертной добавки – Na_2SiO_3 (жидкое стекло) [6-7].

Известно, что при температуре 50 °С происходит разложение активатора – нашатырного спирта (NH_4OH) на аммиак в виде газа NH_3 и воды [8]. При температуре от 500 °С до 1000 °С аммиак, разлагаясь на азот и водород в виде газа, выполняет роль переносчика бора вглубь поверхностного слоя пластины из стали 20, способствуя образованию обширной диффузионной зоны боридов железа.

Борированию подвергались 7 образцов (таблица 1).

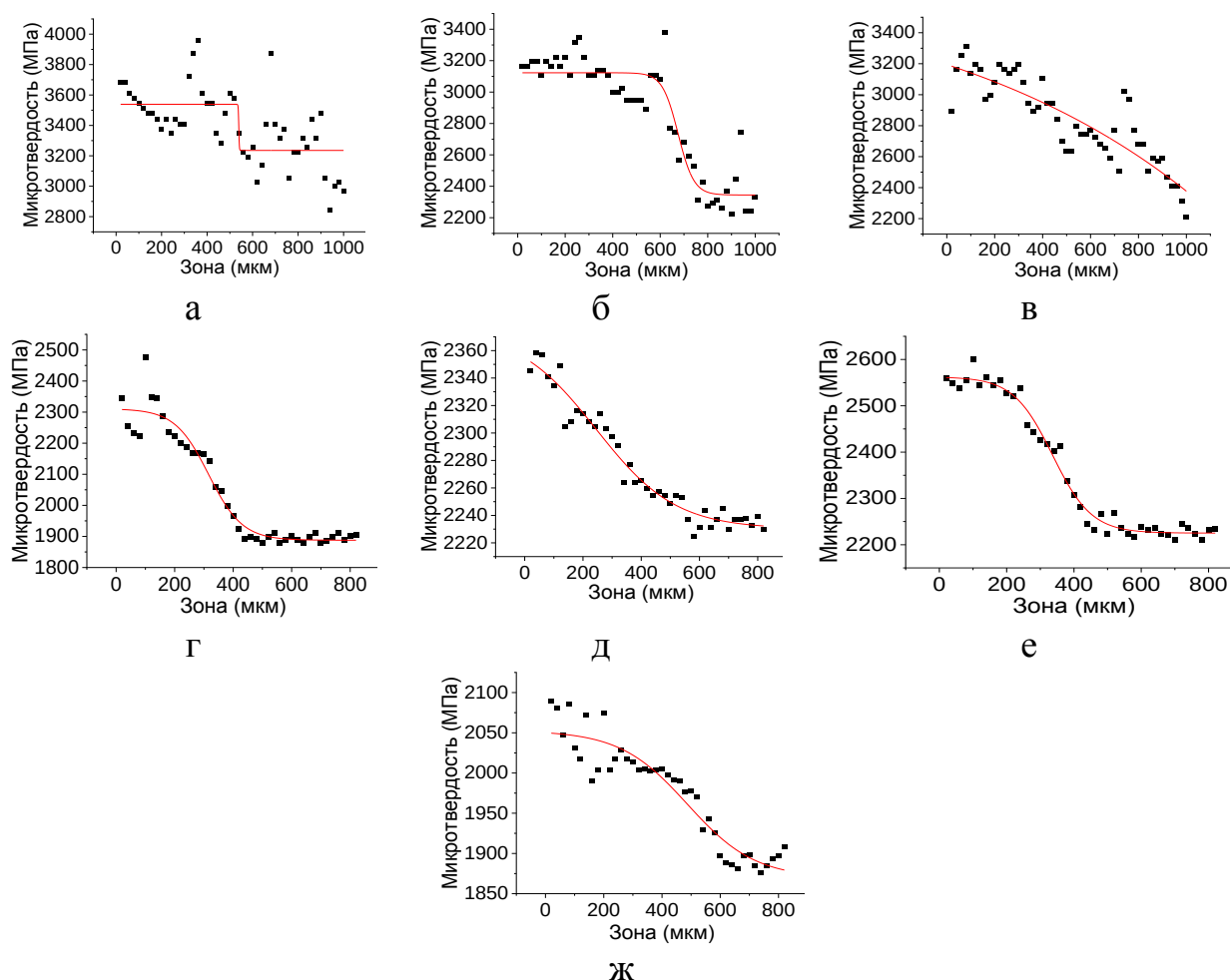
Борсодержащая обмазка образцов 1 и 2 представляла собой смесь, содержащую одни и те же компоненты, в первом случае это была хорошо размешанная паста, а во втором – ее отстоявшийся осадок.

Таблица 1 - Образцы, время борирования и состав пасты

№ образца	Время борирования, мин	Состав пасты
1	5	25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C+ Na_2OSiO_3
2		25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C+ Na_2OSiO_3
3		75% H_3BO_3 +25%Fe+ NH_4OH +C
4	10	25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C+ Na_2OSiO_3
5		25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C
6	15	25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C+ Na_2OSiO_3
7		25%Fe+75% H_3BO_3 + NH_4OH +C

Результаты экспериментов

Распределение микротвердости по сечению образцов (рисунок 1) свидетельствует о формировании обширной диффузионной зоны в поверхностном слое стали 20, представляющей собой плавный переход от насыщенной боридами поверхности к матрице, представляющей собой α -фазу железа.



а – образца 1; б – образца 2; в – образца 3; г – образца 4; д – образца 5;
е – образца 6; ж – образца 7

Рисунок 1 – Распределение микротвердости в поверхностном слое образцов

Из распределения микротвердости в поверхностных слоях образцов видно, что в некоторых местах наблюдается скачок увеличения значения микротвердости с дальнейшим ее понижением. В частности, микротвердость образца 1 на глубине диффузионной зоны 360 мкм показывает наибольшее значение – 3,956 ГПа. На глубине 680 мкм наблюдается еще один скачок микротвердости – 3,876 ГПа (рисунок 1, а). Таким образом, можно говорить о существовании некоего препятствия, т. е. диффузионный процесс, оказывается, может быть таким, что формируется барьерный слой из диффузанта и устанавливается новый процесс диффузии через этот слой.

Таблица 2 - Изменение значений микротвердости

Время борирования	Обмазка без жидкого стекла	Обмазка с жидким стеклом
5 минут	$H_{cp} = 3,350$ ГПа (увел. на 51%)	$H_{cp} = 2,806$ ГПа (увел. на 27%)
10 минут	$H_{cp} = 2,384$ ГПа (увел. на 8%)	$H_{cp} = 2,362$ ГПа (увел. на 7%)
15 минут	$H_{cp} = 2,604$ ГПа (увел. на 19%)	$H_{cp} = 1,942$ ГПа (умен. на 12%)

Немонотонное поведение микротвердости в диффузионной зоне может свидетельствовать о формировании областей с высоким содержанием боридных фаз. Анализ данных распределения микротвердости по сечению образцов показывает, что микротвердость поверхностного слоя повысилась по сравнению с микротвердостью подложки почти во всех случаях. В образце 7 микротвердость поверхностного слоя понизилась на 12 % (рисунок 1, ж), а значит, диффузионная зона не сформировалась.

Из рисунка 1, а видно, что диффузионное распределение бора по диффузионной зоне в образце 1 монотонно снижается и после 900 мкм, где микротвердость достигает значения микротвердости отожженной α -фазы железа (примерно 2,207 ГПа). Исходя из геометрических данных, можно определить толщину диффузионного слоя в каждом образце (таблица 3).

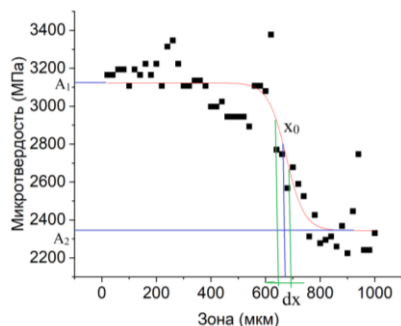
Таблица 3 - Толщина диффузионного слоя в зависимости от времени борирования и состава обмазки.

Образец	Состав обмазки	Время борирования, мин.	Толщина диффузионного слоя, мкм
1	$Fe + H_3BO_3 + C + NH_4OH + Na_2SiO_3$	5	900
2		5	900
4		10	260
6		15	660
3	$Fe + H_3BO_3 + C + NH_4OH$	5	980
5		10	900
7		15	-

Из данных таблицы 3 видно, что толщина диффузионного слоя, полученная при 5 минутном нагреве самая большая, и достигает около 980 мкм. Во всех экспериментах с использованием в обмазке жидкого стекла сформирована диффузионная зона.

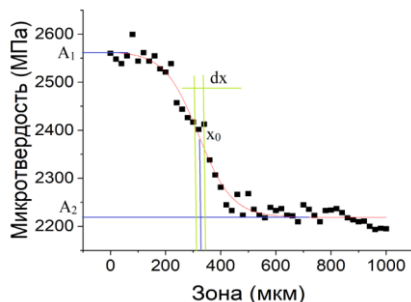
Анализ параметров в аппроксимирующей функции (рисунок 1, б, д)

позволяет говорить о геометрии диффузионной зоны (рисунок 2).



Model: Boltzmann
Функция: $y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + \exp((x - x_0) / dx))$
$A_1 = 3122,93$
$A_2 = 2344,27$
$x_0 = 675,46$
$dx = 33,23$

а



Model: Boltzmann
Функция: $y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + \exp((x - x_0) / dx))$
$A_1 = 2564,22$
$A_2 = 2218,80$
$x_0 = 318,60$
$dx = 61,21$

б

Рисунок 2 – Геометрия диффузионной зоны: а – образца 2, б – образца 6

Характер изменения микротвердости по сечению образцов, а в большей степени размер диффузионной зоны свидетельствуют об аномально высокой диффузионной подвижности бора, участвующего вместе с другими элементами обмазки в формировании обширной диффузионной зоны в ходе химико-термической обработки стальных образцов в индукционной печи при температуре 1000 °С уже в течение 5 минут.

Известно, что значение коэффициента диффузии бора в боридах железа при температуре 950 °С при условии, что бор диффундирует по монокристаллу борида железа $D = 1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, в переходной зоне оно принимает значение, равное $1,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ [9]. Значение коэффициентов диффузии можно определить из анализа размера обширной диффузионной зоны и времени ее формирования в виде композиционного слоя «бориды железа – пластическая матрица α -фазы» при индукционном воздействии на поверхностный слой стали 20. Вычисление коэффициента диффузии можно произвести по хорошо известной формуле (1).

$$D = \frac{\hbar^2}{2\tau} \quad (1)$$

Можно предположить, что низкие значения коэффициентов диффузии (таблица 4) обусловлены медленным течением процесса борирования в углеродистых сталях по сравнению с этим же процессом в чистом железе [10]. Высокий уровень диффузионной подвижности бора обусловлен действием нескольких механизмов: диффузия по дефектам, диффузия по зерну, где преимущественный механизм диффузии – вакансионный, влияние высоких градиентов химических потенциалов в окрестностях границы раздела покрытие-металл.

Таблица 4 - Значения коэффициентов диффузии бора и размер сформированных слоев, состоящих из фаз боридов железа

№ образца	$D, \text{м}^2/\text{с}$	h (толщина слоя), мкм	$D, \text{м}^2/\text{с}$ [9]
1	$1,35 \cdot 10^{-9}$	900	$1,82 \cdot 10^{-11}$
2	$1,35 \cdot 10^{-9}$	900	
3	$1,6 \cdot 10^{-9}$	980	
4	$0,5633 \cdot 10^{-9}$	260	
5	$0,675 \cdot 10^{-9}$	900	
6	$0,242 \cdot 10^{-9}$	660	
7	-	-	

Заметим, что коэффициент диффузии, определенный из анализа геометрии диффузионной зоны, является усредненной характеристикой процесса борирования и не характеризует диффузионный процесс на его разных стадиях.

Рентгеноструктурный анализ диффузионной зоны

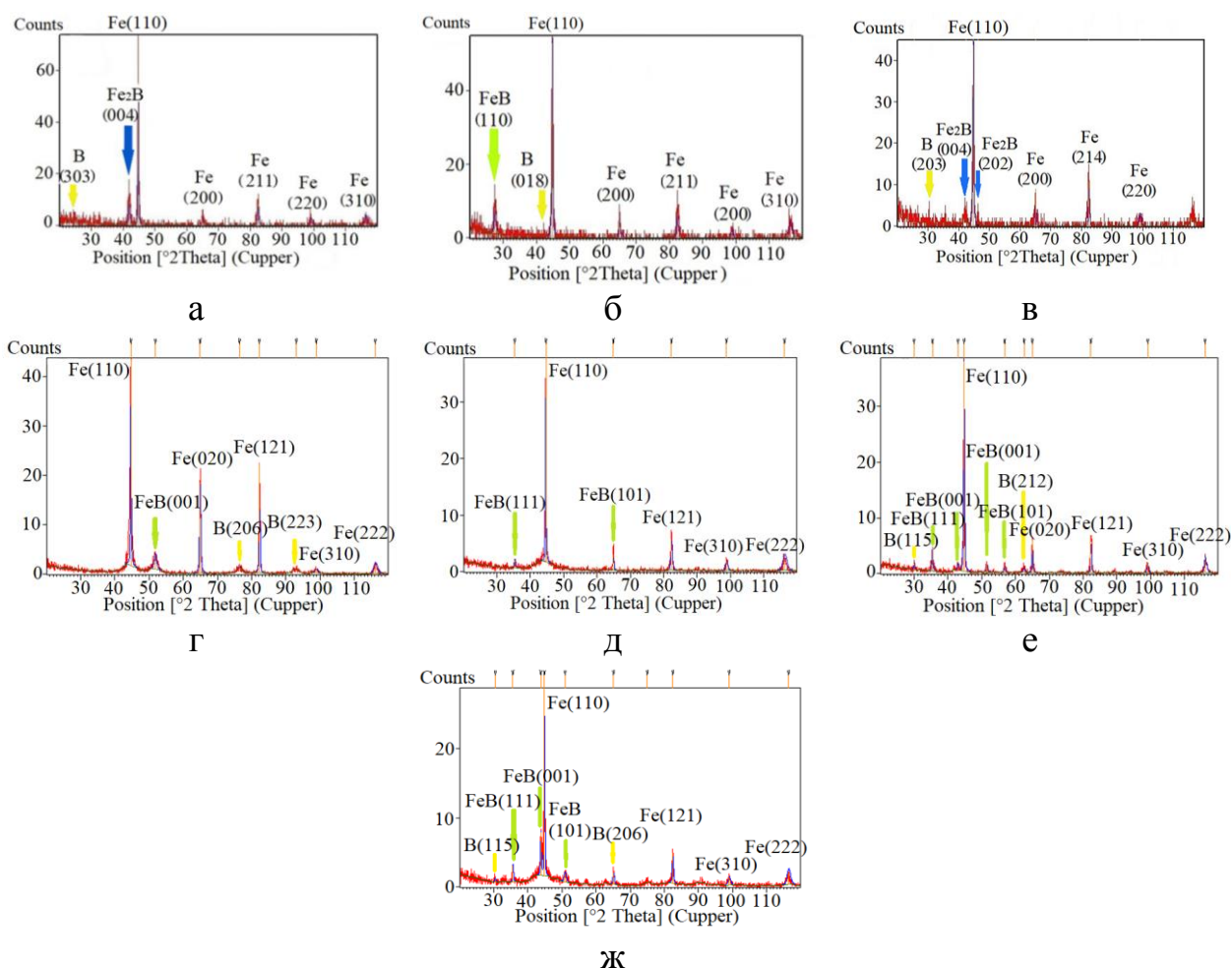


Рисунок 3 – Рентгеноструктурный анализ и фазовый состав боридных слоев стали 20 (после отжига в течение 5 минут: а, б, в; 10 минут: г, д; 15 минут: е, ж); (синие стрелочки – Fe_2B , зеленые стрелочки – FeB , желтые стрелочки – B)

Основные структурные составляющие, образовавшиеся в образцах приведены в табл. 5.

Таблица 5 - Основные структурные составляющие диффузионной зоны

№ образца	Фаза(Hkl)	H _{max} , ГПа
1	B(303)	3,395
	Fe ₂ B(004)	
2	FeB(110)	2,837
	B(018)	
3	B(203)	2,862
	Fe ₂ B(004)	
	Fe ₂ B(202)	
4	FeB(001)	2,477
	B(206)	
	B(223)	
5	FeB(111)	2,357
	FeB(101)	
6	B(115)	2,6
	FeB(111)	
	FeB(001)	
	FeB(001)	
	FeB(101)	
	B(212)	
7	FeB(111)	2,089
	B(331)	
	FeB(001)	
	FeB(101)	
	B(206)	

Основными фазами боридных слоев, полученными в экспериментах, являются соединения железа с бором FeB, Fe₂B и B (рисунок 3). Эти фазы в образцах сформировали композиты с соответствующей микротвердостью (таблица 5).

Микроструктура боридных слоев стали 20

Рентгеноструктурный анализ борированной стали 20 показал присутствие фаз: α-Fe, B, FeB и Fe₂B, распределенных по диффузионной зоне (рисунок 4). Из рисунка 4 видно, что микроструктура исследуемых образцов окрашена: фаза FeB окрашивается в коричневый цвет, а Fe₂B сохраняет желтые тона, кристаллы бора окрашены в белый цвет.

В образцах, нагреваемых в течение 5 минут при температуре около 1000 °С, на поверхности образца формируется пористая зона (рисунки 4,а и 4,в). Появление пористой структуры поверхности связано с быстрой истощаемостью насыщающей смеси. Такая структура боридного слоя является наиболее оптимальной в условиях трения с использованием смазочного материала, так как полученная открытая пористость играет роль маслоудерживающих резервуаров.

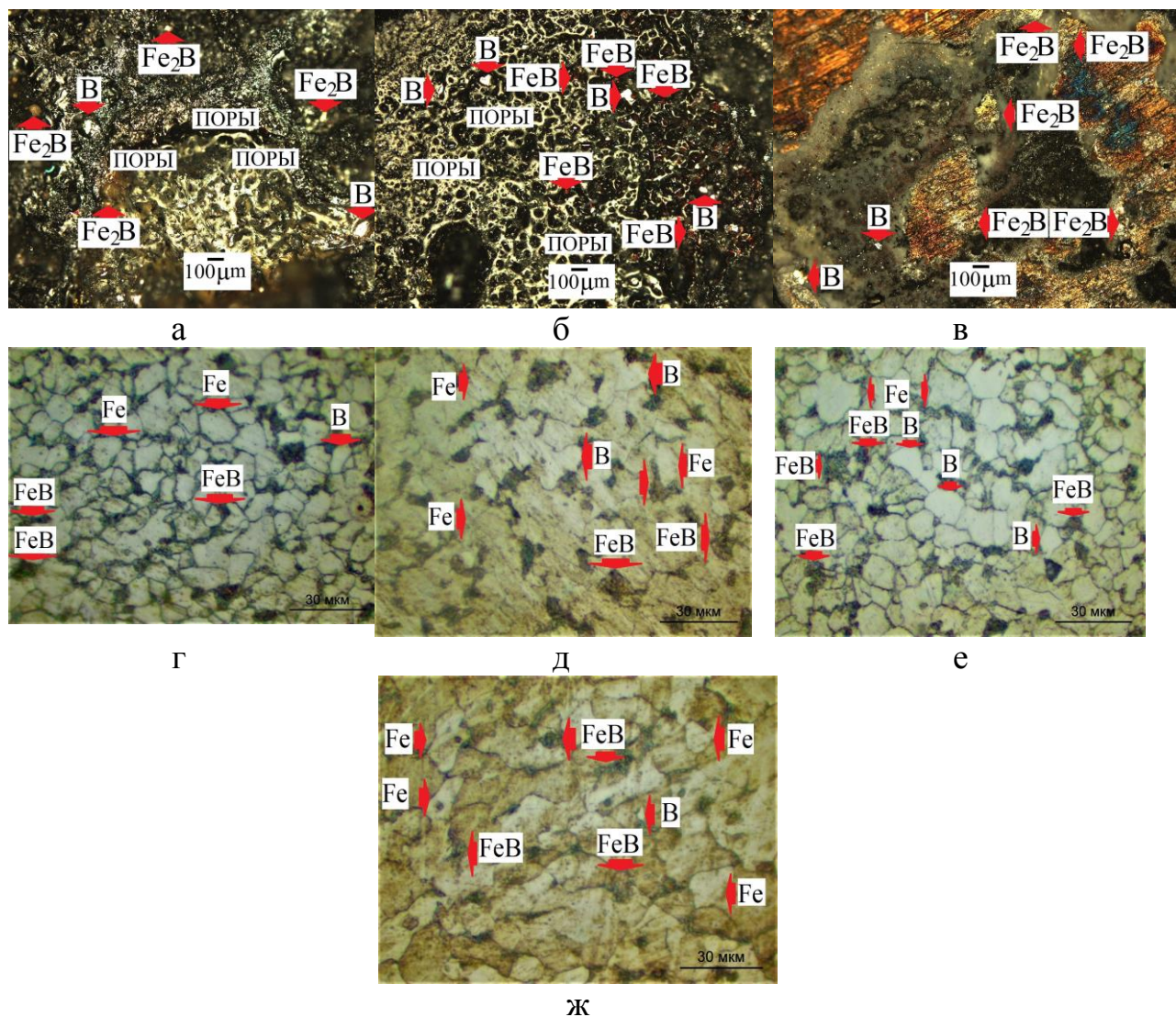


Рисунок 4 –Оптическая металлография боридных слоев стали 20 (после отжига в течение 5 минут: а, б, в; 10 минут: г, д; 15 минут: е, ж)

Из рисунка 4 видно, что бориды выделяются в виде равномерно распределенных зон, разделенных вязкой основой. Можно констатировать, что именно такой композиционный материал диффузионной зоны обладает меньшей хрупкостью и достаточно высокой твердостью. В наших экспериментах этот слой сформировался за небольшое время – 5 минут.

Выводы

При термической обработке образцов с борсодержащей обмазкой в индукционной печи выявлено, что на поверхности подложки наблюдается экзотермическая химическая реакция между материалом подложки и бором с образованием боридов, обладающих нужным набором физико-механических свойств.

Существенно, что обширная диффузионная зона сформирована при борировании в индукционной печи нагревом при температуре 1000 °С в течение 5 минут.

С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, наблюдаемые бориды железа представляют собой химические соединения FeB и Fe₂B.

Наличие в обмазке инертной составляющей Na_2OSiO_3 приводит к формированию пористой структуры борированного слоя, а отсутствие в составе обмазки инертной компоненты снижает толщину боридного слоя почти в три раза и приводит к исчезновению пор.

Библиографический список

1. Коррозионная сталь Boron 304 с бором, предназначенная для изготовления контейнеров с перегородками для транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива // Новости черной металлургии за рубежом: Экспресс-информация. 1981, в. 63-И, с. 1-4.
2. Т.А. Дергач. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (88). 2005, №5, с. 80-85.
3. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
4. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. М.: Металлургия, 1978. – 239 с.
5. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1981. – 296 с.
6. Шевчук Е. П. Исследование боридных слоев стали 20 после химико-термической обработки в индукционной печи. / Е. П. Шевчук, В. А. Плотников, Б. К. Ахметжанов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15, № 3. С. 386-391.
7. Шевчук Е. П., Плотников В. А. Структура диффузной зоны при борировании стали 20 методом индукционного нагрева. // Сборник статей VIII Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии», г. Барнаул, 2020 г., С. 98-103.
8. Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф. Электрохимические генераторы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 448 с., ил.
9. Павлов П. В. Физика твердого тела: учебник / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – Москва: Высшая школа, 2000. – 494 с.
10. Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Гурьев М. А., Мэй Шунчи, Власова О. А. Борирование малоуглеродистой стали // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 12-4. – С. 572-573.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Федоров В.В., Клименов В.А., Черепанов Р.О.

*Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
г. Томск, Россия, fedorov@tpu.ru*

Аннотация: В настоящее время для получения металлических изделий сложной формы с анизотропными свойствами все чаще применяется электронно-лучевые аддитивные технологии. В основе технологии лежит вакуумная камера с электронно-лучевой пушкой и модульными манипуляторами, что позволяет осуществлять послойное электронно-лучевое плавление (ЭЛП) порошков или трехмерное напыление расплавленной проволоки. Входящее в комплект установки ПО обеспечивает модульный обмен и синхронизированное управление всеми компонентами системы согласно поставленной задаче с помощью цифровых G-кодов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, электронно-лучевое сплавление, микроструктура.

DEVELOPMENT OF ELECTRON BEAM EQUIPMENT FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

Fedorov V.V., Klimenov V.A., Cherepanov R.O.

*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia, fedorov@tpu.ru*

Abstract. The technology is based on a vacuum chamber with an electron beam gun and modular manipulators that allow encapsulating layer-by-layer electron beam melting (EBM) of powders or three-dimensional deposition of molten wire. Currently, the software installation kit requires an exchange module and synchronized control of all system components according to the task set using digital G-codes.

Keywords: additive technologies, electron beam fusion, microstructure.

Развитие аддитивных технологий на основе электронно-лучевого синтеза [1] было связано с относительно высокой производительностью и низкими затратами конечного изделия. При этом в первую очередь рассматриваются материалы, для производства которых требуется вакуум (титановые сплавы, молибден, нержавеющая сталь и алюминий). Макро- и микроструктура формируемых материалов, и их конечные механические свойства при этом зависели от мощности, скорости и направления луча, режима подачи проволоки. Именно от этих параметров зависит скорость охлаждения ванны

расплава, формирование тепловых условий сплавления слоя, охлаждения и кристаллизации получаемого материала [2] (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение различных параметров и характеристик основных процессов печати металлами

Параметр или процесс	Спекание металлического порошка лазерным и электронным лучом	Осаждение металлического порошка при помощи направленного энергетического воздействия	Осаждение металлической проволоки при помощи направленного энергетического воздействия
Мощность источника (Вт)	50 – 1000	400 – 3000	1000 – 5000
Скорость осаждения (см ³ /ч)	25 – 180	20 – 450	100 до > 1000
Скорость охлаждения при затвердевании (К/с)	$10^5 - 10^7$	$10^2 - 10^4$	$10^1 - 10^2$
Градиент температуры (К/м)	$10^6 - 10^7$	$10^5 - 10^6$	$10^3 - 10^4$
Скорость движения фронта кристаллизации (м/с)	$10^{-1} - 10^0$	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10^{-2} - 10^{-1}$

Такие различия приводят к экстремально большим различиям возможных скоростей охлаждения (на 5 порядков) и кристаллизации, а также к образованию специфических температурных градиентов, недостижимых в случае обычных конвективных процессов [3-4]. Скорость охлаждения и тепловложение, обусловленные мощностью используемых источников, скоростями и геометрией перемещения лучей, влияют на формирующуюся микроструктуру и свойства структурных и фазовых составляющих сплавов, а значит, требуют более тщательного контроля, чем в случае обычных процессах, для обеспечения высокого качества и надёжности изделия.

В связи с этим многие вопросы, связанные с влиянием параметров электронно-лучевого оборудования на формирование структуры материала различного масштабного уровня и физико-механических свойств, в настоящее время являются актуальными и требуют комплексного подхода к разработке всех узлов и, как правило создаются в ведущих исследовательско-технологических центрах, таких, например, как исследовательский центр НАСА в Лэнгли [5], ИФПМ СО РАН [6], НИ ТПУ [7]. Современные технологические достижения в области аддитивных технологий позволяют формировать новые возможности технологии за счет расположения компонентов, реализации систем обратной связи и прочего.

Современный запрос промышленности связан с повышением производительности аддитивных технологий, минимизации простоя оборудования в связи с проведением технического обслуживания, а также с расширением возможного функционала аддитивных машин. Для решения такой задачи

необходима разработка универсальной установки, способной работать с проволочными и порошковыми материалами для формирования объемных изделий, при этом все основные механические узлы и блок электронно-лучевой пушки должны обладать высокой надежностью и иметь большой интервал между техническим обслуживанием.

С целью исследования элементарных процессов, сопровождающих формообразование при послойной наплавке при различном тепловом воздействии, и изучение некоторых механических характеристик полученных материалов с оценкой качества образцов с помощью компьютерной томографии в 2015 году в НИ ТПУ была создана модульная установка электронно-лучевого сплавления порошков и наплавки проволокой [7] (рисунок 1).



Рисунок 1 - Внешний вид электронно-лучевой установки с модулем наплавки

Технические характеристики установки, следующие: ускоряющее напряжение 40 кВ, рабочее давление - 5×10^{-3} Па, максимальный ток пучка 150 мА, минимальный диаметр пучка - 150 мкм, размеры рабочей области - 150×150 мм, потребляемая мощность – до 6 кВт. Электронный пучок генерируется источником с плазменным эмиттером.

Создание современного оборудования для проведения исследований в области аддитивных технологий требует обеспечения возможности максимально широкого регулирования параметров технологического процесса и повторяемости результата от слоя к слою. Архитектура управления и автоматизации в этом случае должна иметь возможность установки дополнительных локальных регуляторов, датчиков и исполнительных устройств без внесения существенных изменений в ее структуру. Данная концепция представляет собой отдельную научно-техническую задачу. Наиболее распространенная схема управления электронно-лучевого оборудования с плазменным катодом представлена на рисунке 2.

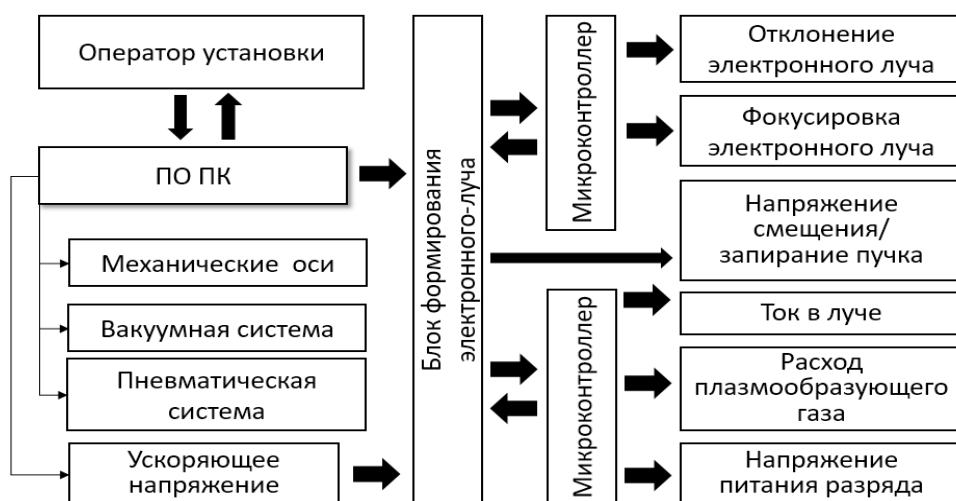


Рисунок 2 - Структурная схема управления электронно-лучевой установкой

Основным элементом системы управления при этом является оператор установки, непосредственно взаимодействующий с программным обеспечением управляющего компьютера установки путем введения конкретных параметров и/или команд. Даже выполненная в едином интерфейсе система управления не позволяет синхронизировать работу всех исполнительных органов управления установкой и напрямую зависит от квалификации и опыта оператора, при этом любое изменение параметров работы электронного луча требует «перепрошивки» ПО микроконтроллеров.

Если для сварочных процессов данная схема обладает достаточной гибкостью и надежностью, то для реализации аддитивных технологий на базе исследовательской электронно-лучевой установки потребовалась разработка принципиально иной схемы управления, в основе которой синхронизация и цифровизация всех технологических процессов на основе машинных кодов (рисунок 3).

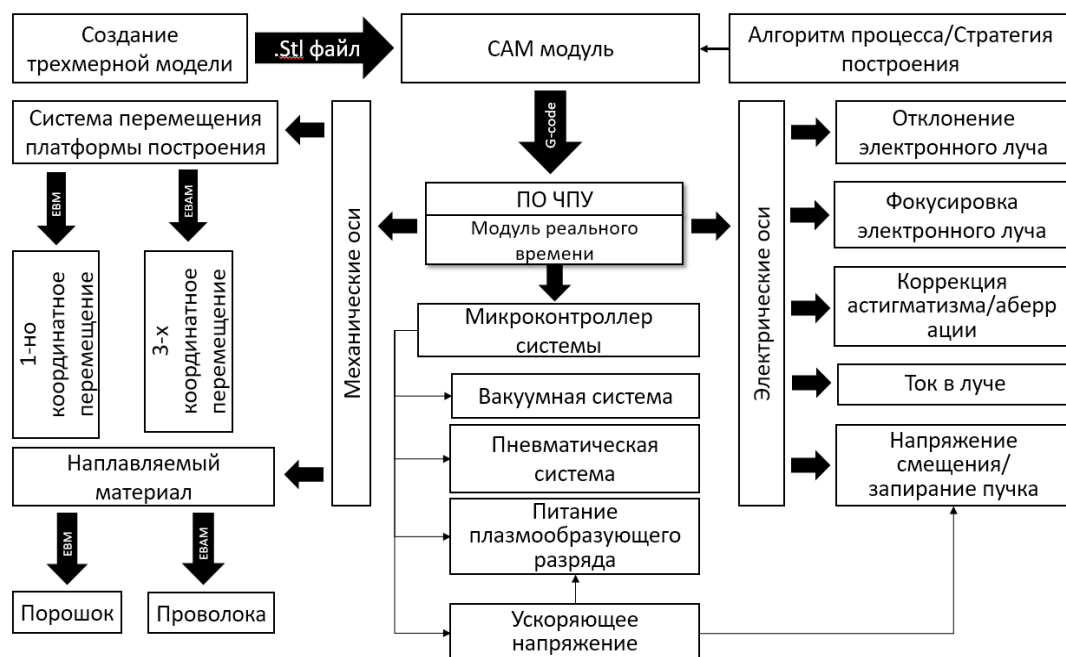


Рисунок 3 – Принципиальная аппаратно-структурная схема автоматизации

В качестве входных данных в данной схеме используется цифровая трехмерная модель в формате файлов STL (.stl), которая с применением специализированных САМ-модулей виртуально разделяется на слои с последующей генерацией цифровых управляющих команд (т.н. G-code). При этом возможно заложить такие особенности выбранного аддитивного процесса как распределение тепловых полей при изготовлении детали, плотность заполнения внутренней структуры, шероховатость наружных поверхностей и т.д.

Далее управляющий код (G-code) отправляется в ПК с промышленными платами с аппаратной обработкой G-code (так называемые Mesa платы) и установленному программному модулю реального времени. Это решение позволяет генерировать шаги (STEP-DIR-ENABLE), обрабатывать информацию с датчиков в режиме реального времени, позволяя решить проблему синхронизации и автоматизации механических и электронных осей созданной электронно-лучевой установки.

Сбором данных о текущем состоянии электронно-лучевой установки занимается микроконтроллерный блок, который также является собственной разработкой. В обязанности микроконтроллерного блока входит:

- опрос вакуумных датчиков;
- управление вакуумными насосами;
- управление блоком формирования пучка (БФП);
- опрос дискретных входов/выходов.

Обмен данными между микроконтроллерным блоком и приложением (Extended application) осуществляется по интерфейсу RS232 на скорости 1 Мбит/с.

В электронно-лучевой установке используется датчик вакуума VSM72 фирмы Thyracont, диапазон измерений от 10^3 мбар до 10^{-8} мбар. Обмен данными с датчиком производится по 485 интерфейсу, протокол – собственная разработка фирмы Thyracont.

В системе на данный момент используются два насоса: форвакуумный и турбомолекулярный насос. После создания в камере форвакуума (давление не более 2 мбар) в работу включается турбомолекулярный насос. Микроконтроллерный блок постоянно следит за текущим давлением в камере и при повышении давления в камере более 2 мбар производит отключение турбомолекулярного насоса. Защита турбомолекулярного насоса дублируется электроавтоматикой.

По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614248 2021 г. «Управление установкой электронно-лучевого сплавления порошков» [8].

При печати деталей использовались порошки и проволоки титановых сплавов (BT-1; BT-6) и нержавеющей стали (AISI 308) [9]. Качество полученных образцов и механические свойства изучались разрушающими (разрыв, сжатие, твердость) и не разрушающими методами (металлографии и компьютерная томография).

Условия печати часто выбирались на основе рекомендации на основа-

нии проб и ошибок, т.е. эмпирическим подбором. Предсказание микроструктуры, свойств и дефектов при печатании деталей требуют понимания металлургических процессов, протекающих в условиях характерных для аддитивных технологий. Однако металлургические принципы не позволяют в таких условиях предсказать параметры процесса, с помощью которых можно достичь хороших микроструктур и механических свойств. С целью обеспечения взаимосвязи между параметрами процессов, геометрией детали, составом и микроструктурой, мехсвойствами и дефектами данного сплава в НИ ТПУ был разработан программный комплекс для численного моделирования исследуемых процессов [10].

Данная модель была реализована с использованием численного метода конечных объемов, протестирована на аналитических решениях нестационарных тепловых задач (нагрев стержня), и показала высокую точность расчетов на модельных задачах. Кроме того, в расчетную программу была заложена функция непрерывного контроля баланса энергии, которая показала, что в ходе расчета полная энергия системы сохранялась с точностью $< 0.1\%$ во всех ситуациях.

Результаты моделирования температурного анализа порошкового слоя во время электронно-лучевого сплавления показаны на рисунке 4. Следует отметить, что порошок предварительно нагревается до $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. По мере приближения электронного луча к треку с анализируемой точкой температура порошка повышается из-за температурного поля, распространяющегося от ближайших треков, по которым проходит луч. Максимальная температура наблюдается при нахождении электронного пучка непосредственно в анализируемой точке. Температура снижается при движении электронного пучка по следующим трекам, удаляясь от трека с анализируемой точкой ($> 10, 250\text{ с}$).

Согласно расчетам, максимальная температура материала во время процесса составляет 3400 К , а ширина ванны расплава составляет примерно 500 мкм . Материал нагревают до температуры плавления $T_{пл}$ и охлаждают до температуры ниже перехода $\beta \rightarrow \alpha$; поэтому материал претерпевает этот переход несколько раз. Согласно расчетам, срок существования ванны расплава увеличивается с увеличением тока пучка с 10 мс ($2,5\text{ мА}$) до 30 мс (3 мА) и 54 мс ($3,5\text{ мА}$). Поскольку микроструктура сплава определяется не только температурой во время ЭЛС, но и скоростью охлаждения, последняя была рассчитана как функция тока пучка. Расчетное поле скорости охлаждения поперечного сечения образца представлено на рисунке 4. Средняя скорость охлаждения для последнего цикла (кристаллизации) рассчитывалась в каждой точке плоскости XZ при $Y = 3,75\text{ мм}$ (средняя линия между центром образца и граница, параллельно основному направлению луча).

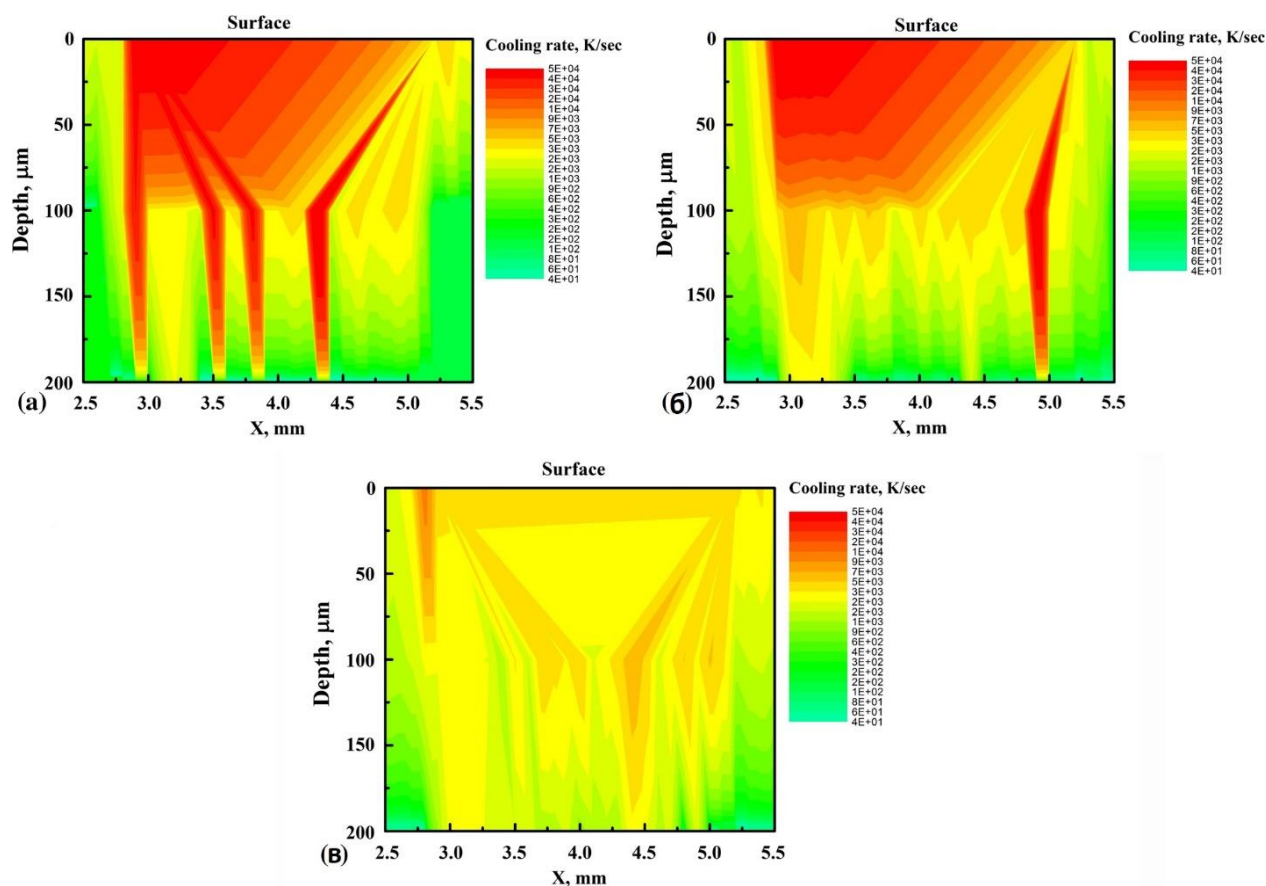


Рисунок 4- Скорость охлаждения порошкового слоя во время ЭЛС при токе пучка: а - 2,5 мА, б - 3 мА, в - 3,5 мА

Согласно результатам моделирования, повышенный ток пучка увеличивает срок существования ванны расплава и снижает скорость охлаждения материала (рисунок 4). Представленные результаты хорошо согласуются с микроструктурными наблюдениями.

Библиографический список

1. Vasiliy Fedorov, Vasiliy Klimenov, Roman Cherepanov, Andrey Batranin, Powder and wire melting of titanium alloys by electron beam // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 37. P. 584-591.
2. DebRoy, T. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing / I. DebRoy, I. Mukherjee, H. L. Wei, J. W. Elmer and J. O. Milewski // *Nature reviews*. – 2020.
3. Klimenov, V.A., Fedorov, V.V., Slobodyan, M.S. et al. Microstructure and Compressive Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Built by Electron Beam Free-Form Fabrication // *J. of Materi Eng and Perform* – 2020. – Vol. 29. – P. 7710–7721.
4. Mukherjee, T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components / T. Mukherjee, T. DebRoy // *Appl. Mater. Today*. -2019.-Vol.14.-P. 59-65.
5. R. Russell, NASAs Plans for Development of a Standard for Additively Manufactured Components, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2019, 28, p 1924–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03939-x>.
6. Kalashnikov K.N., Rubtsov V.E., Savchenko N.L., Kalashnikova T.A., Osipovich K.S., Eliseev A.A., Chumaevskii A.V. The effect of wire-feed geome-

try on electron beam freeform 3D-printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy//International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2019. - P. 1-10. DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.

7. V. Klimenov et al., “Structure and properties of parts produced by electron-beam additive manufacturing,” in Proceedings of the international conference on advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures 2017 (AMHS’17), AIP Conference Proceedings 1909, edited by Victor E. Panin et al. (American Institute of Physics, Melville, NY, 2017), 020085

8. Федоров В.В., Кузьменко И.Ю., Юркина В.А., Густомясов М.А., Юсупов Р.И., Клименов В.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021614248. «Управление установкой электронно-лучевого сплавления порошков» – 2021.

9. V. A. Klimenov, V. V. Fedorov, M. S. Slobodyan [et al.] Microstructure and Compressive Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Built by Electron Beam Free-Form Fabrication // Journal of Materials Engineering and Performance . — 2020 . — Vol. 29, iss. 11 . — [P. 7710-7721] . — Title screen. — [References: 78 tit.].

10. Pushilina, N.S., Klimenov, V.A., Cherepanov, R.O. et al. Beam Current Effect on Microstructure and Properties of Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V Alloy // J. of Materi Eng and Perform. – 2019. – Vol. 28. – P. 6165–6173.

УДК 539.098

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА AL-CO-Cr-Fe-Mn-Ni С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Осинцев К.А.^{1,2}, Коновалов С.В.², Иванов Ю.Ф.³, Громов В.Е.²,
Панченко И.А.², Воробьев С.В.², Бессонов Д.А.²**

¹*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара, Россия*

²*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия*

³*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Аннотация. Целью данного исследования является исследование микроструктуры и механических свойств высокоэнтропийного покрытия Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni, изготовленного на подложке AA5083 с использованием проволочно-дуговой аддитивной технологии. Результаты показали однородное распределение элементов вдоль поперечного направления в покрытии, которое имеет следующий средний химический состав: Al 8 ат.%, Co 28 ат.%, Cr 13 ат.%, Fe 33 ат.%, Mn 3 ат. .%, Ni 15 ат.%. Скорость изнашивания покрытия уменьшилась в ~5 раз по сравнению с подложкой, а твердость по Виккерсу улучшилась в ~3 раза.

Ключевые слова. высокоэнтропийный сплав, газовая дуговая сварка металла, проволочно-дуговое аддитивное производство, Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni,

алюминиевый сплав, покрытие, микротвердость, скорость износа, микроструктура.

FABRICATION OF AL-CO-CR-FE-MN-NI HIGH-ENTROPY ALLOY COATING USING WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Osintsev K.A.^{1,2}, Konovalov S.V.², Ivanov Yu.F.³, Gromov V.E.²,
Panchenko I.A.², Vorobyov S.V.², Bessonov D.A.²

¹*Samara National Research University named
after Academician S. P. Korolev, Samara, Russia*

²*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia*

³*Institute of High-Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia*

Abstract. *The aim of this study is to investigate the microstructure and mechanical properties of the Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy coating fabricated on AA5083 substrate using wire-arc additive manufacturing. The results showed homogeneous distribution of the elements alongside the transversal direction in the coating which has the following average chemical composition: Al 8 at.%, Co 28 at.%, Cr 13 at.%, Fe 33 at.%, Mn 3 at.%, Ni 15 at.%. The wear rate of the coating decreased by ~5 times comparing with the substrate, while the Vickers hardness improved by ~3 times.*

Keywords. *high-entropy alloy, gas metal arc welding, wire-arc additive manufacturing, Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni, aluminum alloy, coating, microhardness, wear rate, microstructure*

1. Introduction

Replacing steel components onto lightweight materials, such as aluminum and magnesium alloys, or composites is a crucial task for scientists and engineers around the globe [1]. The main issue in the weight reduction is to retain strength, durability, and other performance properties of machine parts. While aluminum alloys exhibit low density, high strength to weight ratio, good corrosion resistance and relatively low cost, they suffer from low wear resistance, as well as low hardness which restricts their applications [2].

There are several techniques which work well to fabricate hard coatings on Al alloys: hard anodizing [3], physical vapor deposition [4], thermal spraying of hard coatings [5], plasma electrolytic oxidation [6], and laser cladding [7]. For example, Al₂O₃ coating deposited by hard anodizing on AA6063 exhibited enlarged hardness by 5.7 times [3]. Laser cladding of Ni-WC coating onto AA5083 increases hardness of the alloy by about 12 times, while wear resistance rises by 2.5 times [7]. Cold spray deposited WC-CoCr coating followed by friction stir processing reinforced AA5083 matrix and increased the average hardness by 540% over the as-casted alloy [5].

Weld overlay cladding is a well-known technique in gas and mining industries that can provide thick coatings (up to 6 mm) by joining via welding a protec-

tion material to a base metal. This method is cost-effective because the deposition occurs at high rates (up to 8 kg/h) and the feeding material is a wire which is mainly cheaper than the powder used, for example, in laser cladding or thermal spraying [8]. Wire-arc additive manufacturing is a promising technology, but it has not yet been applied to fabricate high-entropy alloy coatings. Since HEA coatings obtained by other methods revealed excellent mechanical properties such as high hardness, wear, corrosion resistance, etc., a study of the application of wire-arc additive manufacturing to weld overlay HEA coatings can greatly expand this field and lay the groundwork for future research.

The aim of this study is to fabricate Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni HEA coating onto non-heat-treatable AA5083 substrate. Hardness was used to evaluate its mechanical performance, as well as scanning electron microscopy was carried out to investigate microstructure and distribution of chemical elements.

2. Materials and Methods

AA5083 plate with the chemical composition (wt.%) of 4.4-4.8 % Mg, 0.05-0.15% Cr, 0.6-0.9% Mn, 0.1% Cu, 0.25% Zn, 0.15% Ti, 0.4% Fe, 0.4% Si and Al – balanced (according to ASTM B209) and a size of 350 mm × 350 mm × 5 mm was selected as a substrate. The surface of the substrate was hand-held grinding wheel grinded until the surface showed a metallic luster.

According to the previous studies the following wires were selected for stranding into a cable-type wire: pure Co wire (Co 99.9 at.%, Ø 0.47 mm); Autrod 16.95 welding wire (Fe 65.3 at. %, Cr 19.6 at. %, Ni 7.3 at. %, Si 1.6 at. %, Mn 6.2 at. %, Ø 0.7); Ni80Cr20 wire (Cr 22.5 at. %, Fe 1.5 at. %, Ni 72.1 at. %, Al 0.8 at. %, Si 2.9 at. %, Mn 0.2 at. %, Ø 0.4 mm). The wires were stranded using special stranding equipment. The average diameter of the combined cable wire was 1.2 mm, with the lay length of 10 mm.

To deposit a single-layer coating, we used metal inert gas (MIG) automated setup with the following parameters of overlay cladding: wire feed speed 10 m/min, amperage ~100 A, voltage 22 V, inductance 3 H, travel speed 200, layer length of 100 mm. The gun moved with the drag travel angle of 10°. Argon (99.99 %) was used as a shielding gas.

Scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) of the cross-sectional view of the obtained samples was performed by «LEO EVO 50», Carl Zeiss equipped with a dispersive energy analyzer INCA Energy. Microhardness tests were carried by Vickers microhardness tester with the indenter load of 0.5 N and dwell time of 10 s.

3. Results and Discussion

Fig. 1 (a) shows a fragment of the Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy coating fabricated via gas-metal arc welding. The microstructure of the coating represents various areas with the different tonality: darker and brighter, which might be attributed to the inhomogeneous content of the chemical elements in these local regions and, correspondingly, different phases. The overall chemical composition of the coating is quite uniform, according to the Fig. 1 (b). The standard deviation from the average content of each component is not more than 1.4 % (for Al which reveals the highest deviation). This might be related to not complete

solid solubility of the main element of the substrate in the crystal lattice of the coating. The amount of Al atoms increases when approaching to the substrate, and in the beginning of the transition zone between the coating and the substrate reaches its maximum value of 32 at. % (Fig. 1 (d)). After the distance of 160 μm its value sharply drops down to 11 at.%, and gradually increases as the distance from the transition zone increases. The concentrations of Fe and Co slightly rise at 160 μm and after this distance steadily decrease with the following complete disappearing at 730 μm .

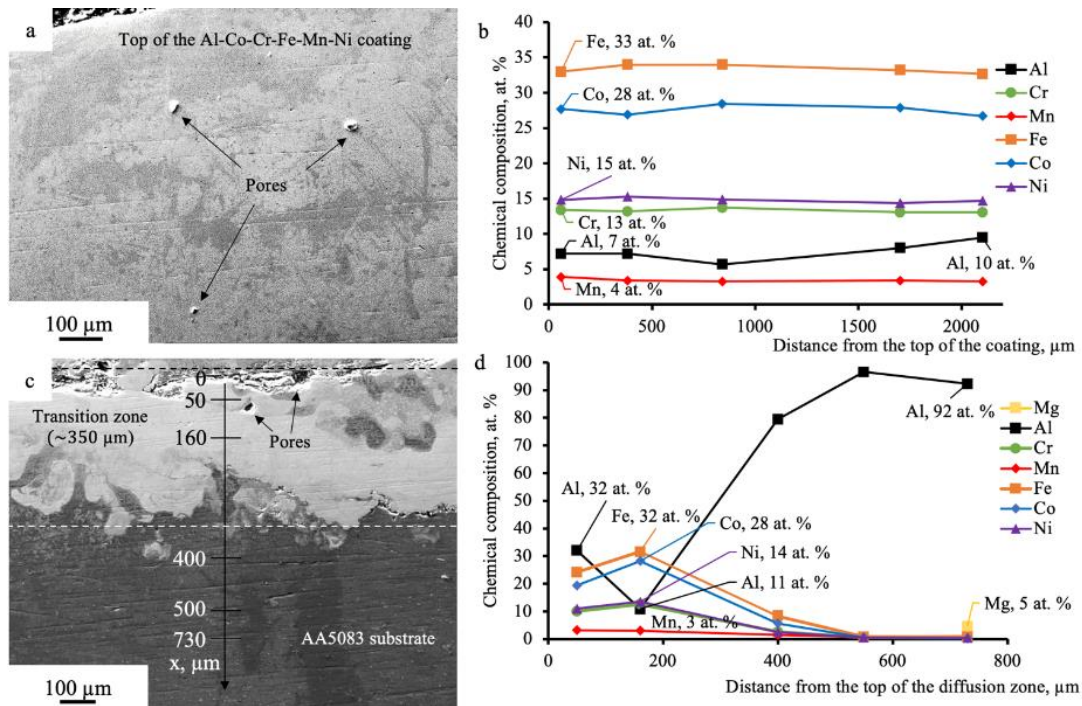


Figure 1 - (a) SEM of the Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni HEA coating, (b) the results of EDS analysis accomplished from the top of the coating, (c) SEM of the transition zone between the coating and the substrate. The distances from the top of the transition zone in which EDS analysis was carried out are marked on the axis, (d) the results of EDS analysis alongside the axis indicated in (c)

The thickness of the obtained coating is around 4.5 mm; its average Vickers hardness equals to 294 ± 53 HV, which is higher than the hardness of the substrate by 3 times. Comparing to the casted $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeMnNi}$ alloy [9] whose hardness is 175 HV, the hardness of the coating obtained in this study is relatively higher (by about 1.7 times); however, it is by about 1.2 times less than in the conventionally sintered $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeMnNi}$ HEA, which is probably due to the higher density of the sample, attributed to the simultaneous combination of pressure and temperature during the compaction of the powders [10].

In the area adjacent to the coating, the hardness of Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni reaches the highest value of 1010 ± 80 HV. This value is comparable with the Vickers hardness of $\text{Al}_{1.5}\text{CoCrFeMnNi}$ HEA fabricated by high-frequency induction heat sintering (HFIHS) (830 HV_{0.3}) because the samples sintered using the HFIHS method exhibit higher densification than the conventional sintering

(Fig. 2) [10].

Then as the distance from the beginning of the transition zone into the depth of the sample increases, the hardness rapidly drops down to 232 ± 9 HV and levels to the values of the substrate of 107 ± 8 HV.

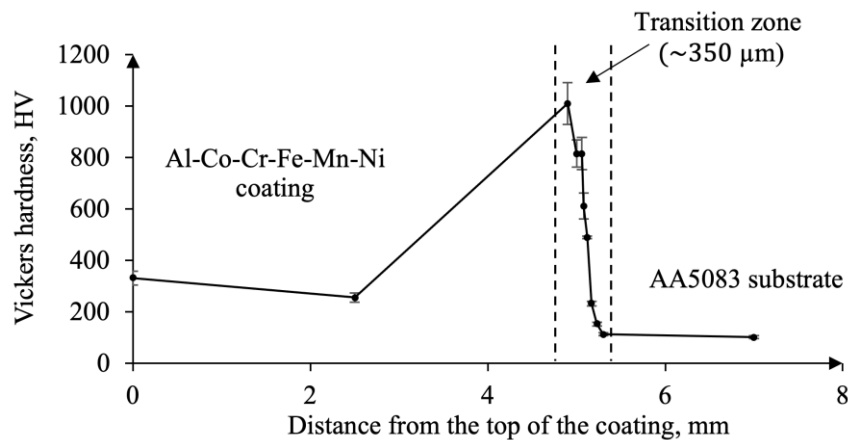


Figure 2 - Variations of Vickers hardness values across the coating and the substrate

4. Conclusions

In this study we fabricated Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy 4.5 mm thick coating on the AA5083 substrate using wire-arc additive manufacturing. The following results could be drawn:

1. The obtained coating has larger hardness (294 ± 53 HV) than that of the substrate (107 ± 7 HV) by ~3 times. The highest hardness (1010 ± 80 HV) was observed in the transition zone between the coating and the substrate.
2. The chemical composition of the coating is homogeneous, while in the transition zone there are areas enriched with the Al atoms.
3. The results show an applicability of wire-arc additive manufacturing technique for fabrication of a thick high-entropy alloy coating on Al-Mg aluminum alloy.

Acknowledgments

Funding: The study funded by Russian Science Foundation, grant number 20-19-00452.

References

1. Zheng K. et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex—shaped aluminium panel components // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. 2018. Vol. 1, № 2. P. 55–80.
2. Benedyk J.C. Aluminum alloys for lightweight automotive structures // Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles / ed. Mallick Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles P.K.B.T.-M. Elsevier, 2010. P. 79–113.
3. Kumar S.A. et al. Performance of alumina coatings prepared by hard anodizing, micro arc oxidation and detonation spray processes on Al-Mg-Si alloy under fretting wear loading // Proceedings of the Institution of Mechanical Engi-

neers, Part J: Journal of Engineering Tribology. Professional Engineering Publishing, 2014. Vol. 228, № 4. P. 454–462.

4. Bashir M.I. et al. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding // Surf Coat Technol. Elsevier B.V., 2017. Vol. 327. P. 59–65.

5. Peat T. et al. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing // Appl Surf Sci. Elsevier B.V., 2017. Vol. 396. P. 1635–1648.

6. Lu X. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review // Surface and Coatings Technology. Elsevier B.V., 2016. Vol. 307. P. 1165–1182.

7. Quazi M.M. et al. Laser Composite Surfacing of Ni-WC Coating on AA5083 for Enhancing Tribomechanical Properties // Tribology Transactions. Taylor and Francis Inc., 2017. Vol. 60, № 2. P. 249–259.

8. Luchtenberg P. et al. Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process // Surf Coat Technol. Elsevier, 2019. Vol. 375, № May. P. 688–693.

9. Li M. et al. Investigation on microstructure and properties of Alx-CoCrFeMnNi high entropy alloys by ultrasonic impact treatment // J Alloys Compd. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 816.

10. Ruiz-Esparza-Rodríguez M.A. et al. Evaluation of high-frequency induction heat sintering and conventional sintering in AlxCoCrFeMnNi high-entropy alloys // J Alloys Compd. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 910.

УДК 66-963

КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ИНТРЕМЕТАЛЛИДНОГО ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti-AL

**Яковлев В.И.¹, Собачкин А.В.¹, Логинова М.В.¹,
Мясников А.Ю.^{1,2}, Барсуков Р.В.³**

¹*Алтайский государственный технический университет,
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия*

²*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
Новосибирск, Россия*

³*Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
Бийск, Россия, anicpt@rambler.ru*

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования на кавитационную стойкость газодетонационного покрытия, напыленного из СВС порошка, состава 64 % Ti + 36 % Al по мас. %. Напыляемый порошок варьировался по фракционному составу. Выявлено, что основная убыль покрытия от ультразвукового воздействия происходит на первых 30 минутах, а затем происходит многократный спад убыли на 60 и 90

минутах. Лучшим результатом на кавитационную стойкость обладает покрытие, напыленное порошком фракции 50-63 мкм.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, защитные покрытия, износостойкость, детонационное напыление, интерметаллиды.

CAVITATION DESTRUCTION OF THE INTERMETALLIC GAS DETONATION COATING OF THE TI-AL SYSTEM

Yakovlev V.I.¹, Sobachkin A.V.¹, Loginova M.V.¹,
Myasnikov A.Y.^{1,2}, Barsukov R.V.³

¹*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia*

²*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

³*Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University, Biysk, Russia, anicpt@rambler.ru*

Abstract. The article presents the results of a study on the cavitation resistance of a gas detonation coating sprayed from a SHS powder of a composition of 64% Ti + 36% Al by weight. %. The sprayed powder varied in fractional composition. It was revealed that the main loss of the coating from ultrasonic exposure occurs in the first 30 minutes, and then there is a multiple decrease in the loss at 60 and 90 minutes. The best result for cavitation resistance is a coating sprayed with a powder fraction of 50-63 microns.

Keywords: cavitation erosion, protective coatings, wear resistance, detonation spraying, intermetallides.

Изготовление высоконагруженных деталей производится из высококачественных материалов, например, из специализированных легированных сталей, и, чаще всего, такое производство достаточно дорогое [1]. Для удешевления производства детали рабочие поверхности можно защитить с помощью покрытия, а основу сделать из недорогих материалов. Для получения покрытия на детали (подложки) в промышленности используются следующие методы: химико-термический; гальванический; газотермический; плазменный; детонационный (ДГН) и др. [1].

Газодетонационные покрытия получили широкое распространение благодаря комплексу уникальных, присущих только этому методу, свойств [2]. ДГН позволяет перенести свойства напыляемого материала на основу детали без изменения фазового состава. При соблюдении технологических требований покрытия обладают высокой адгезией, равномерностью слоя и необходимым заложенным комплексом свойств [2].

Большой интерес в промышленности представляют покрытия, полученные газодетонационным напылением интерметаллидов Ti-Al, т.к. этот материал обладает широким комплексом свойств, такими как высокая износостойкость и коррозионная защита [3]. Перенос этих свойств на подложку позволит улучшить свойства изделия и удешевить производство. Подложка,

изготовленная, например, из стали и напыление на эту подложку интерметаллидов группы Ti-Al, позволит в значительной степени снизить себестоимость готового изделия, обладающего заданными свойствами, например, износостойкостью [4]. В связи с этим актуальным является изучение возможностей напыленного покрытия из интерметаллида Ti-Al [3-4].

Для изучения износостойкости покрытия существуют методы механического износа, кавитационного разрушения, газообразивного изнашивания и т.д., которые выбираются под конкретные условия эксплуатации [5]. При работе в водной среде наблюдается такой эффект как кавитация – образование и схлопывание пузырьков воздуха у поверхности рабочего органа (например, лопадки двигателей судна) [6]. Пузырьки, обладая большой энергией при схлопывании, наносят поверхности гидравлический удар, что приводит к нарушению работы узлов. В связи с выше сказанным целью работы является определение степени кавитационного разрушения покрытий из интерметаллидов Ti-Al высокointенсивной ультразвуковой обработкой поверхности.

Методы и методики

Объектом исследования являлись гагодетонационные покрытия из интерметаллидов системы Ti-Al. Для получения напыляемого материала использовали порошки титана и алюминия. Из них приготавливалась смесь следующего состава в соотношении по мас. % - 64% Ti + 36% Al [7]. Далее проводилась механоактивация (МА) в планетарной шаровой мельнице марки 2SL. Энергонапряженность мельницы составляла 400 м/с², продолжительность механоактивации – 7 мин [8]. В полученной активированной смеси реализовывали самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [9]. Полученный после сжигания порошок с помощью тарированных сит был просеян на три фракции: 0-50 мкм, 50-63 мкм и 63-100 мкм.

Для напыления порошковой смеси использовалась установка для газодетонационного напыления «Катунь-М», доработанная в Проблемной научно исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза им. В.В. Евстигнеева. Для напыления в соответствии с опытом лаборатории были выбраны следующие параметры: эквимолярное соотношение кислородо-пропановой смеси, напыление производилось по 100 циклов на каждый образец, на стальную подложку, предварительно отпескоструеную перед напылением [10].

На всех этапах для фиксации фазового состояния порошковой смеси использовали установку для рентгено-структурного исследования ДРОН-6, с CuK α -излучением ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$).

Для проведения исследований на кавитационную стойкость был использован ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна-М» модели УЗТА-1/22-ОРв, предназначенный для кавитационной обработки жидких сред. Внешний вид ультразвукового технологического аппарата приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна-М» модели УЗТА-1/22-ОРв

Для реализации кавитационного удаления покрытий была собрана установка, представленная на рисунке 2.

Ультразвуковое (УЗ) воздействие осуществлялось в водопроводной воде. Для обеспечения одинаковых условий исследований (температура и газосодержание) был организован постоянный проток водопроводной воды, что позволило осуществить УЗ воздействие на все образцы при температуре 20-21°C. Измерение температуры осуществлялось с помощью термометра сопротивления.



Рисунок 2 – Экспериментальная установка

Образцы размещались в непосредственной близости от излучающей поверхности рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы – на расстоянии 1,5-2 мм. Для исключения смещения образцов в процессе УЗ воздействия использовался постоянный магнит.

УЗ воздействие осуществлялось со следующими энергетическими параметрами:

- активная потребляемая мощность $P_{\text{пот.}}$ равна 520 Вт;
- акустическая мощность $P_{\text{ак.}}$, выделяющаяся в обрабатываемой среде составила 320 Вт (определялась калориметрическим методом);
- интенсивность УЗ воздействия составила около 17,8 Вт/см²;
- частота УЗ воздействия равна 18,83 кГц;
- амплитуда колебаний излучающей поверхности составила 30 мкм;
- время воздействия 30,60,90 минут УЗ воздействия.

Наблюдения за изменениями, происходящими на поверхности детали, проводились визуально по истечению времени обработки. При этом образцы

подвергались промывке в проточной воде, сушке и фотофиксации.

После получения фотографий измерялась масса образцов. Для этих целей использовались лабораторные весы HR-250AG. Полученные результаты измерения массы образцов округлялись до миллиграмм.

Результаты и их обсуждение

В результате напыления были получены 3 образца:

- №1 – покрытие, напыленное фракционным составом 0-50 мкм;
- №2 – покрытие, напыленное фракционным составом 50-63 мкм;
- №3 – покрытие, напыленное фракционным составом 63-100 мкм.

На рисунке 3 изображены результаты ультразвукового воздействия на покрытие образца № 1, напыленного γ -TiAl фракционным составом 0-50 мкм, в течение 30, 60 и 90 минут. В таблице 1 приведена масса образца №1 до и после воздействия, а также убыль в мг, рассматриваемая как разница с предыдущим измерением.

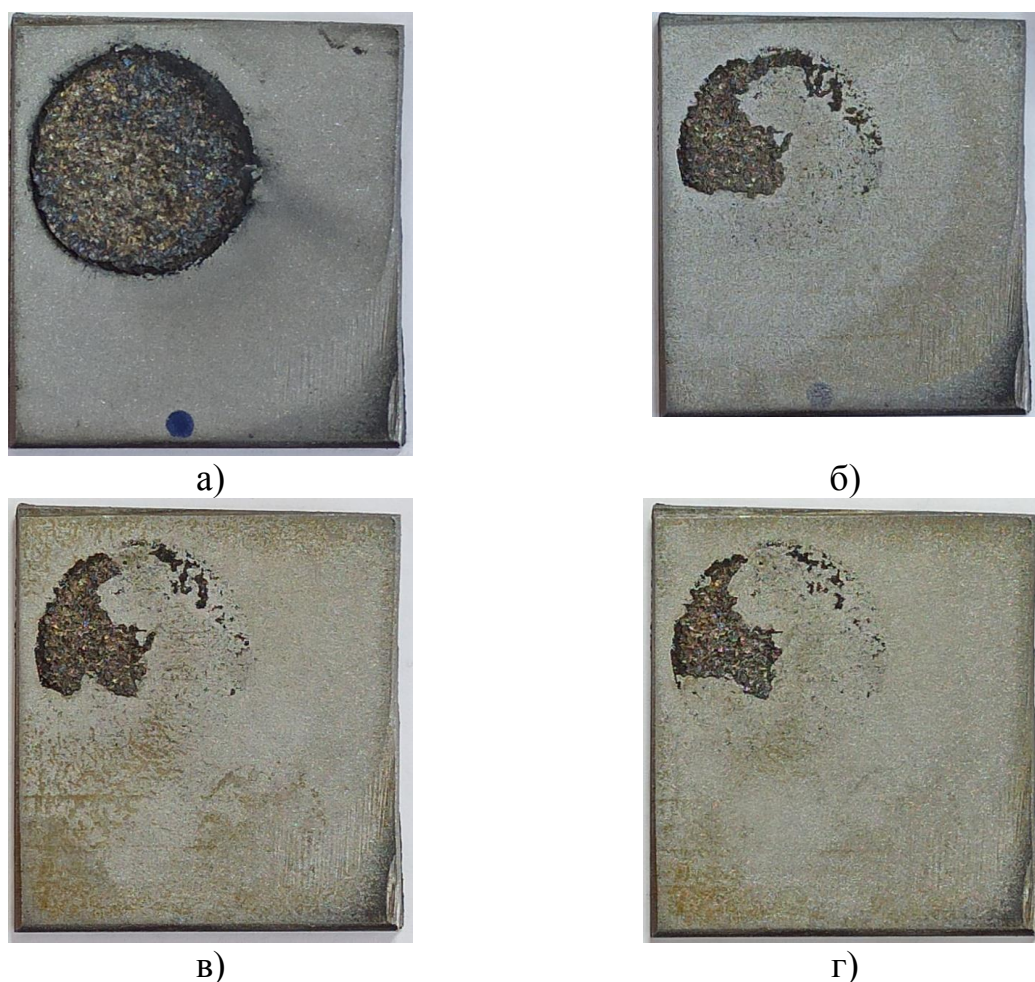


Рисунок 3 – Результаты УЗ воздействия на покрытие образца №1, γ -Ti-Al, фракция 0-50 мкм: а) исходный образец; б) 30 минут УЗ воздействия; в) 60 минут УЗ воздействия; г) 90 минут УЗ воздействия

Таблица 1 – Измерение массы и убыль образца № 1

Время УЗ воздействия, мин	Масса, гр	Убыль, мг
0	28,353	0
30	28,137	216
60	28,113	24
90	28,098	15
Сумма		255

На основании таблицы №1 и по результатам рисунка 3, можно видеть, что основная убыль покрытия происходит на первых 30 минутах (216 мг), а затем происходит многократный спад убыли до 24 мг на 60 минутах и 15 мг на 90 минутах УЗ воздействия.

На рисунке 4 изображены результаты кавитационного воздействия на покрытие образца № 2, напыленного γ -TiAl фракционным составом 50-63 мкм, в течение 30, 60 и 90 минут. В таблице 2 приведена масса образца №2 до и после воздействия, а также убыль в мг, рассматриваемая как разница с предыдущим взвешиванием.

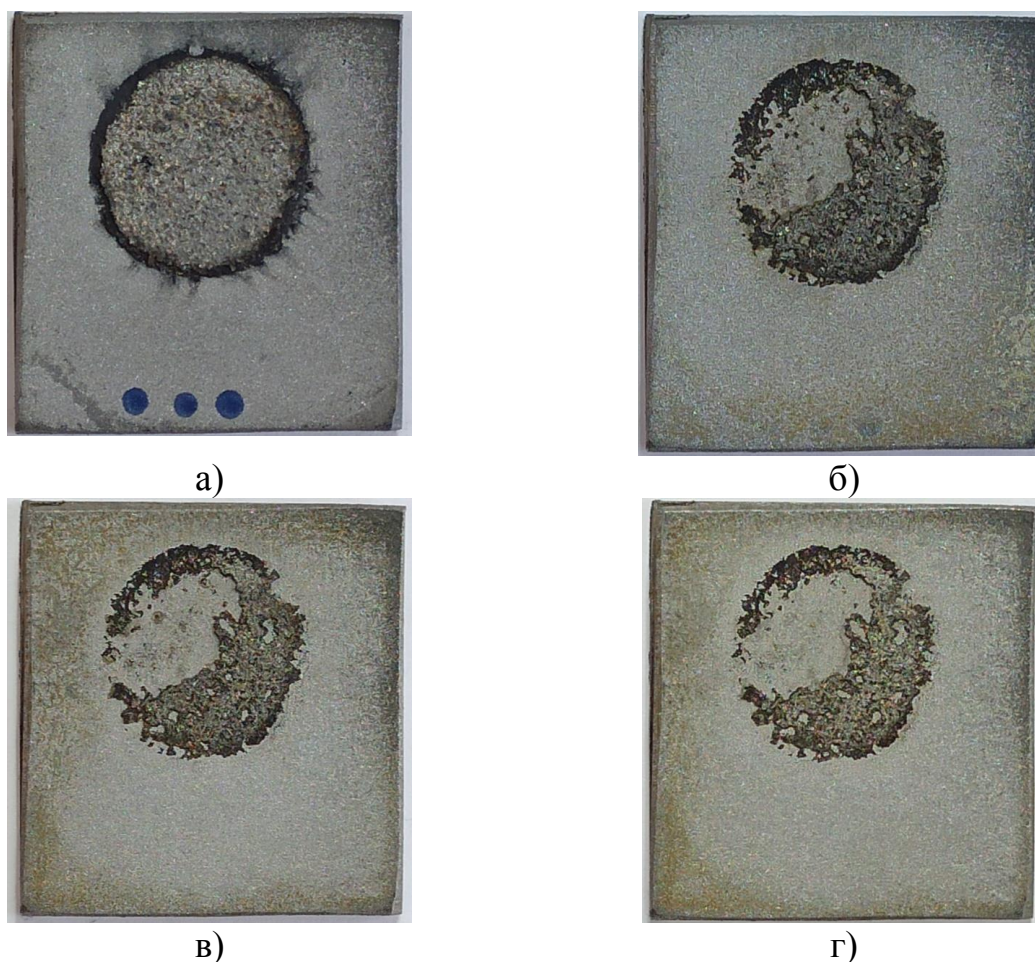


Рисунок 4 – Результаты УЗ воздействия на покрытие образца №2, γ -Ti-Al, фракция 50-63 мкм: а) исходный образец; б) 30 минут УЗ воздействия; в) 60 минут УЗ воздействия; г) 90 минут УЗ воздействия

Таблица 2 – Измерение массы и убыль образца № 2

Время УЗ воздействия, мин	Масса, гр	Убыль, мг
0	28,565	0
30	28,422	143
60	28,407	15
90	28,396	11
Сумма	-	169

Результаты ультразвукового воздействия представлены на рисунке 4 и в таблице №2, на основе анализа установлено, что основная и значительная убыль покрытия происходит на первых 30 минутах (149 мг), а затем происходит многократное уменьшение убыли до 15 мг на 60 минутах и очень малая на 90 минутах ультразвукового воздействия (11 мг).

На рисунке 5 изображены результаты ультразвукового воздействия на покрытие образца № 3, напыленного γ -TiAl фракционным составом 63-100 мкм, в течение 30, 60 и 90 минут. В таблице №3 приведена масса образца №3 до и после воздействия, а также убыль в мг, рассматриваемая как разница с предыдущим взвешиванием.

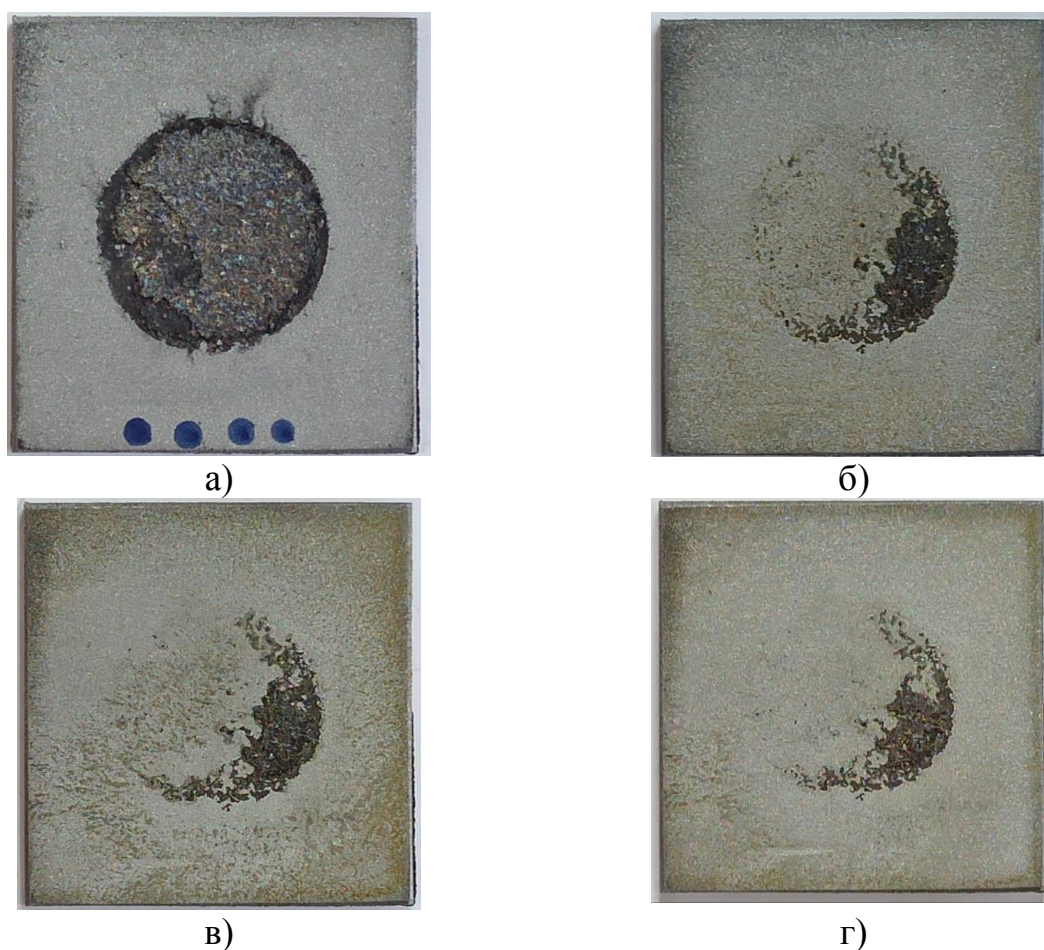


Рисунок 5 – Результаты УЗ воздействия на покрытие образца №3, γ -Ti-Al, фракция 63-100 мкм: а) исходный образец; б) 30 минут УЗ воздействия; в) 60 минут УЗ воздействия; г) 90 минут УЗ воздействия

Таблица 3 – Измерение массы и убыль образца № 3

Время УЗ воздействия, мин	Масса, гр	Убыль, мг
0	28,164	0
30	27,945	219
60	27,932	13
90	27,925	7
Сумма	-	239

Результаты ультразвукового кавитационного воздействия представлены на рисунке 5 и в таблице №3. Проведенный анализ показал, что основная и значительная убыль покрытия происходит на первых 30 минутах (219 мг), последующее УЗ воздействие в течении 60 и 90 минут приводит к незначительному изменению покрытия и его убыли в 13 и 7 мг соответственно.

На основании таблиц 1-3 была построена зависимость убыли покрытия в мг от времени воздействия в мин (рисунок 6). У образца №1 и №3 практически идентичные результаты, тогда как образец №2 показал наилучшие результаты по убыли покрытия.

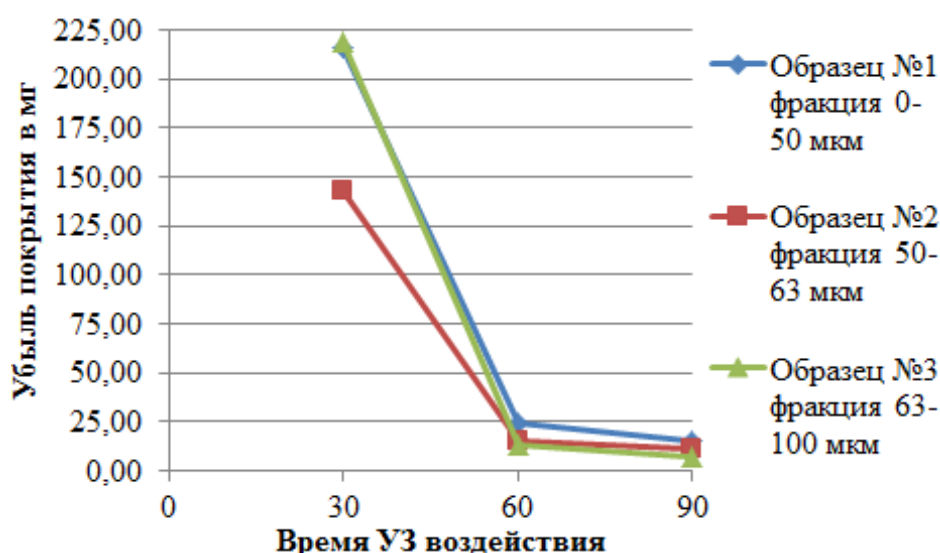


Рисунок 6 –Зависимость убыли массы покрытия от времени УЗ воздействия

По визуальному анализу рисунков 3-5 установлено, что наименьшая убыль покрытия у образца №2, а у образцов №1 и №3 покрытие практически полностью уничтожено.

Выводы:

1. Таким образом, анализируя полученные результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что УЗ обработка поверхностей образцов вызывает разрушение нанесенных на образцы покрытий за счёт возникающих кавитационных явлений в области водного зазора излучающей поверхности.

2. Степень и характер разрушения могут быть прослежены по визуальному представлению образцов на каждом этапе обработки и графикам убыли массы соответственно.

3. Лучшим результатом на кавитационную стойкость обладает покрытие образца №2 – напыленное фракционным составом 50-63 мкм.

Работа выполнялась в рамках государственного задания FZMM-2020-0002.

Библиографический список

1. Кондратов Л. П. Технология материалов и покрытий / Л. П. Кондратов, Н. Н. Божко. М. : МГУП, 2008. 226 с.

2. Сонин В. И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В. И. Сонин. М. : Машиностроение, 1973. 152 с.

3. Oliker V.E., Sirovatka V.L., Timofeeva I.I., Gridasova T.Ya., Hrechyshkin Ye. F. Formation of detonation coatings based on titanium aluminide alloys and aluminium titanate ceramic sprayed from mechanically alloyed powders Ti-Al // Surface and Coatings Technology 200 (2006).- p.3573-3581.

4. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский и др.; Отв. Ред. И.М. Федорченко. – Киев: Наук. Думка, 1985.-624с.

5. Защитные покрытия : учеб. пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардонина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.

6. Абачараев М.М. Кавитация и защита металлов от кавитационных разрушений. - Махачкала: Дагкнигоиздат, 1990. - 196с.

7. Выбор оптимального состава механоактивированной шихты Ti + Al для исследования динамики структурно-фазовых процессов при высокотемпературном синтезе / М. В. Логинова, А. В. Собачкин, А. А. Ситников [и др.] // Ползуновский вестник. – 2020. – № 4. – С. 136-139. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.04.026. – EDN YHOCAT.

8. Структурное состояние порошковой смеси Ti-Al при различных режимах механоактивационной обработки / М. В. Логинова, А. В. Собачкин, С. Г. Иванов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2019. – № 2. – С. 4-14. – DOI 10.17073/1997-308X-2019-2-4-14. – EDN PREMP

9. Особенности структурообразования в процессе высокотемпературного синтеза в активированной порошковой смеси Ti + Al / В. Ю. Филимонов, М. В. Логинова, А. В. Собачкин [и др.] // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55. – № 11. – С. 1162-1168. – DOI 10.1134/S0002337X19110046. – EDN FVDFLX.

10. The research of characteristics of powder dispenser of detonation unit "Katun-M" / N. A. Yakovleva, V. I. Yakovlev, A. V. Sobachkin [et al.] // Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys : Book of the International seminar articles, Barnaul-Belokurikha, 15–20 сентября 2015 года / Edition in Chief: Professor Sc. D., Starostenkov M.D.. – Barnaul-Belokurikha: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский центр "Системы управления", 2015. – Р. 101-102. – EDN TUMUFN.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В УСЛОВИЯХ ДВУХСТРУЙНОЙ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 45

Чинахов Д.А.¹, Рзаев Э.Д.²

¹ *Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, chinakhov_da@mail.ru*

² *Азербайджанский технический университет,
Баку, Азербайджан*

Аннотация. В работе приведены результаты исследования влияния параметров электродуговой сварки плавящимся электродом в условиях двухструйной газовой защиты в CO₂ на структуру и микротвердость сварных соединений из высокопрочной стали 45. Определено динамическое влияние струи активного защитного газа на структуру и микротвердость многослойных сварных соединений с целевой разделкой кромок из стали 45 с применением метода полного факторного эксперимента. По результатам проведенных исследований установлено, что электродуговая сварка в условиях двухструйной газовой защиты в CO₂ обеспечивает улучшение структурно-фазового состояния сварного соединения из стали 45 и снижает градиент микротвердости в ЗТВ.

Ключевые слова: сварка, защитный газ, структура, микротвердость, высокопрочная сталь.

INFLUENCE OF CONSUMABLE ELECTRODE WELDING PARAMETERS UNDER THE CONDITIONS OF TWO-JET GAS SHIELD ON THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF JOINTS FROM STEEL 45

Chinakhov D.A.¹, Rzaev E.D.²

¹ *Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, chinakhov_da@mail.ru*

² *Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan Republic*

Abstract. The paper presents the results of a study of the influence of the parameters of consumable electrode electric arc welding under conditions of two-jet gas shielding in CO₂ on the structure and microhardness of welded joints made of high-strength steel 45. The dynamic effect of an active shielding gas jet on the structure and microhardness of multilayer welded joints with slot grooves made of steel 45 is determined. using the method of full factorial experiment. Based on the results of the studies, it was found that electric arc welding under conditions of two-jet gas shielding in CO₂ provides an improvement in the structural-phase state of a welded joint made of steel 45 and reduces the microhardness gradient in

the HAZ.

Keywords: *welding, shielding gas, structure, microhardness, high-strength steel.*

Введение

Сварка используется для соединения различных материалов в условиях земной атмосферы, океана и космоса и остается одним из основных технологических процессов производства металлоконструкций и техники. Основным конструкционным материалом все еще остается сталь, несмотря на постоянное увеличение в современных изделиях доли легких сплавов, композитов и полимерных материалов. Спрос на производство сварных металлоконструкций, особенно из высокопрочных сталей, постоянно увеличивается не только в машиностроении, но и в добывающих и других отраслях [1].

Высокопрочные стали обладают комплексом эксплуатационных свойств и используются для производства ответственных сварных металлоконструкций [2-3], обеспечивают высокую прочность конструкций при одновременном снижении их металлоемкости. Однако у сталей данного класса при сварке в зоне термического влияния (ЗТВ) формируются закалочные структуры, которые характеризуются большим градиентом твердости и внутренних напряжений, что может привести к появлению холодных трещин и разрушению неразъемного соединения. Сварочные процессы протекают под влиянием различных факторов и явлений, которые определяют качество и эксплуатационную надежность [2, 4].

Уменьшить уровень структурной и механической неоднородности в металле сварного соединения можно за счет интенсивного перемешивания электродного металла с основным и управления термическим циклом сварки [4, 5]. Увеличение времени пребывания расплавленного металла сварочной ванны в расплавленном состоянии способствует лучшему перемешиванию электродного металла с основным, но в то же время увеличивает вероятность насыщения металла шва водородом, что приводит к его охрупчиванию [3], и обеспечивает перегрев основного металла околошовной зоны.

Уменьшить время нахождения расплавленного металла капли и сварочной ванны в жидкой фазе и при этом увеличить скорость его перемешивания можно при помощи импульсных или динамических воздействий – программируемый управляемый перенос электродного металла в сварочную ванну [6–8], управляемое динамическое воздействие струей защитного газа на процессы в зоне сварки [7, 9–15] и др.

Авторы работ [9–15] исследовали влияние динамики потока защитного газа на процессы сварки плавящимся электродом и установили, что с повышением скорости истечения газа из сварочного сопла происходит улучшение качества защиты зоны сварки и формирования сварного шва, повышается стабильность процесса сварки. Уменьшение вылета электродной проволоки приводит к увеличению микротвердости, т.к. повышается плотность и скорость истечения потока защитного газа (при постоянном расходе), что приводит к повышению скорости охлаждения металла под сварочным соплом и увеличению микротвердости в ЗТВ [4, 7, 16].

Методология

Для определения динамического влияния и технологических параметров сварки в условиях двухструйной газовой защиты на структуру и микротвердость сварных соединений из высокопрочной стали 45 провели исследования по методу полного факторного эксперимента (ПФЭ). Выполняли механизированную многопроходную сварку пластин из стали 45 размером 150×300 мм толщиной 10 мм с щелевой разделкой кромок сварочной проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2мм в СО₂ стационарной дугой с двухструйной газовой защитой без предварительного подогрева и последующей термообработки. Управляемые параметры варьировали на двух уровнях: сварочный ток $I_{св1} = 170$ А и $I_{св2} = 200$ А, напряжение дуги $U_1 = 26$ В и $U_2 = 29$ В, расход защитного газа $Q_1 = 25$ л/мин и $Q_2 = 30$ л/мин. Вылет электрода $L = 12$ мм, скорость сварки $V = 24...25$ см/мин. Источник питания ВС-300Б, автоматическая сварочная головка ГСП-2, блок управления автоматической сваркой БАРС-2Б.

Результаты исследования

Химический состав металла шва выполненных сварных соединений представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав металла шва многослойных сварных образцов из стали 45

№ опыта	С	Si	Mn
	Массовая доля элементов, %		
1	0,12	0,55	1,35
2	0,13	0,53	1,28
3	0,1	0,58	1,4
4	0,1	0,54	1,31
5	0,11	0,45	1,09
6	0,12	0,39	1,02
7	0,11	0,44	1,11
8	0,1	0,33	1,05

По результатам исследований разработаны зависимости содержания химических элементов (углерод, кремний, марганец) в металле шва многослойных сварных соединений из стали 45 от управляемых параметров режима сварки (Q , $I_{св}$, U), в которых управляемые параметры представлены в виде безразмерных величин ($x_1 - Q$, $x_2 - I_{св}$, $x_3 - U$), изменяющихся в диапазоне от -1 до $+1$. При этом относительная погрешность вычислений не превышает 10 %:

1. Регрессионная зависимость содержания углерода от управляемых параметров.

По результатам проведения полного факторного эксперимента установлено, что содержание углерода в металле шва многослойных сварных соединений из стали 45 (в условиях данного опыта) от управляемых параметров режима сварки (Q , $I_{св}$, U) не зависит, либо можно выделить слабовыраженную зависимость от сварочного тока:

$$C(45\_м) = 0,111 - 0,0084 \cdot x_2. \quad (1)$$

2. Регрессионная зависимость содержания кремния от управляемых параметров.

$$Si(45\_м) = 0,476 - 0,029 \cdot x_1 - 0,074 \cdot x_3. \quad (2)$$

3. Регрессионная зависимость содержания марганца от управляемых параметров.

$$Mn(45\_м) = 1,2 - 0,036 \cdot x_1 + 0,016 \cdot x_2 - 0,134 \cdot x_3. \quad (3)$$

Установлено, что с увеличением расхода защитного газа (CO_2) снижается содержание марганца и кремния в металле сварного шва. Повышение напряжения дуги оказывает аналогичное действие. Увеличение тока сварки в выбранном диапазоне повышает содержание марганца в металле сварного шва. Содержание углерода в металле шва многослойных сварных соединений из стали 45 (в условиях данного опыта) не зависит от управляемых параметров режима сварки (Q , $I_{св}$, U).

Для определения влияния выбранных управляемых параметров режима сварки (Q , $I_{св}$, U) на изменение распределения микротвердости в сечении сварных соединений провели измерения микротвердости по линиям, расположенным на расстоянии 2 и 4 мм от верхней поверхности сварных образцов (рисунок 1). Измерения проводили на микротвердомере Duramin-5.

Анализ распределения микротвердости в сечениях сварных соединений показал, что наблюдается резкое увеличение микротвердости в ЗТВ. Значения микротвердости металла шва примерно одинаковые по слоям и распределяются в диапазоне 190...250 HV, что совпадает с микротвердостью основного металла. Наблюдается асимметричное распределение микротвердости в сечениях сварных соединений относительно оси шва (рисунки 1 и 3), которое может быть вызвано неравномерным введением теплоты из-за колебаний сварочной дуги и некоторым отличием химического состава свариваемых пластин основного металла.

Установлено, что пик микротвердости (300...420 HV) располагается в зоне сплавления многослойных сварных соединений из стали 45, его величина уменьшается по глубине целевой разделки кромок (автотермообработка последующим слоем). Одновременное увеличение сварочного тока и напряжения дуги (увеличение погонной энергии сварки) приводит к уменьшению и сглаживанию пика (образец 7 и 8 на рисунке 1).

Микроструктура зон сварных соединений, полученных по режимам сварки 1 и 8 опытов матрицы планирования ПФЭ, представлена на рисунке 2.

Анализ микроструктуры образцов, представленных на рисунке 2, показал, что она в соответствующих участках несколько различается, структура образца № 8 имеет более крупную и грубую структуру, наблюдается смещение зон сварного соединения в сторону основного металла в сравнении с образцом № 1. Это можно объяснить увеличением напряжения дуги и сварочного тока, т.е. увеличивается количество введенной теплоты.

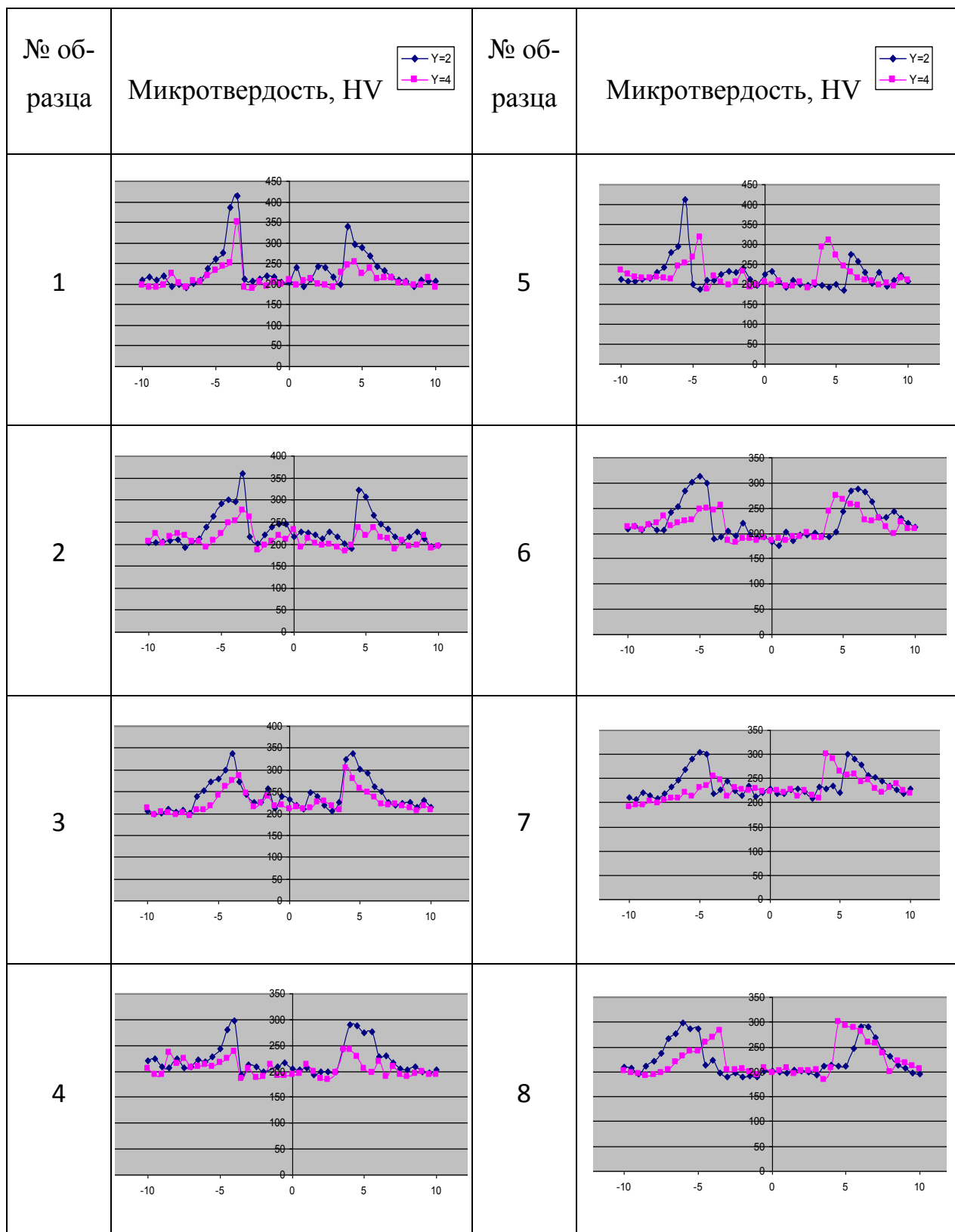


Рисунок 1 - Распределение микротвердости в сечениях сварных соединений в зависимости от управляемых параметров режима сварки (Q , $I_{св}$, U)

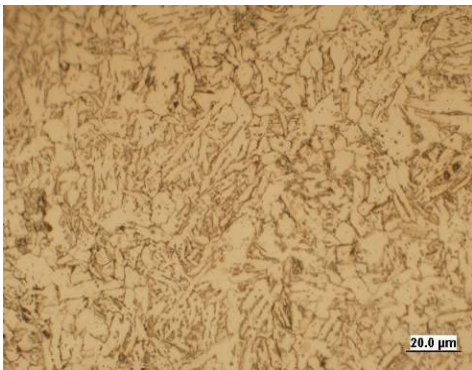
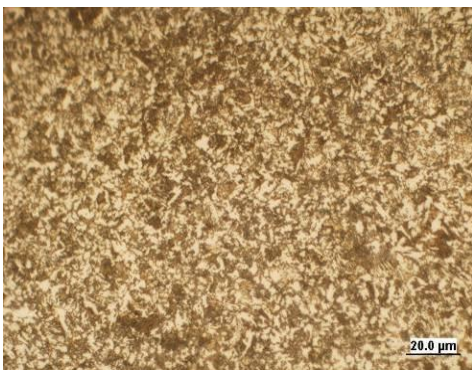
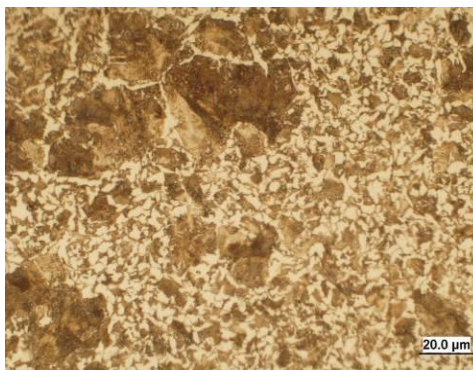
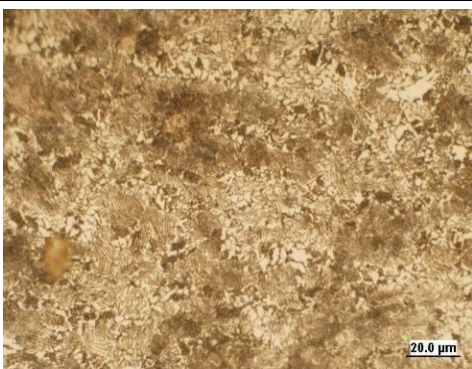
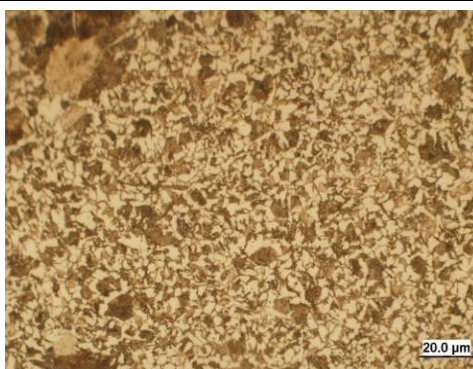
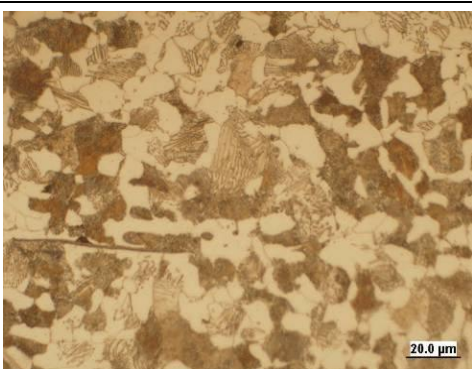
Участок	1	8
ШОВ		
ЗТВ 4 мм от оси шва		
ЗТВ 5 мм от оси шва		
ЗТВ 6 мм от оси шва		

Рисунок 2 - Микроструктура в зонах сварных соединений, полученных по режимам сварки 1 и 8 опытов матрицы планирования ПФЭ, по линии $Y = 4$ мм

На рисунке 3 для сравнения представлены распределения микротвердости в сечениях сварных соединений, полученных по разработанному способу сварки (двухструйная газовая защита) и по традиционному способу

сварки (одноструйная газовая защита) на следующих режимах: сварочный ток $I_{св} = 250$ А, скорость сварки $V = 25$ см/мин, расход защитного газа $Q = 28$ л/мин, напряжение дуги $U = 26$ В.

Распределения микротвердости, представленные на рисунке 3, идентичны, но пиковые значения микротвердости образцов, сваренных с двухструйной газовой защитой, на 30 НВ меньше. Это можно объяснить тем, что скорость истечения защитного газа из двухструйного сопла значительно выше, распределение и выравнивание тепла на поверхности изделия происходит быстрее [16]. Увеличивается скорость охлаждения околошовной зоны, в момент сварки, и уменьшается ее мгновенный перегрев, что изменяет картину структурно-фазовых превращений (рисунок 4) и распределение микротвердости в сечении сварных соединений из стали 45. Также при сварке с двухструйной газовой защитой под воздействием динамики защитного активного газа происходит уменьшение размера капель и увеличение частоты их переноса [17]. Это приводит к уменьшению перегрева металла сварочной ванны и ЗТВ, что изменяет картину структурно-фазовых превращений (рисунок 4) и распределение микротвердости в сечении сварных соединений (рисунок 3).

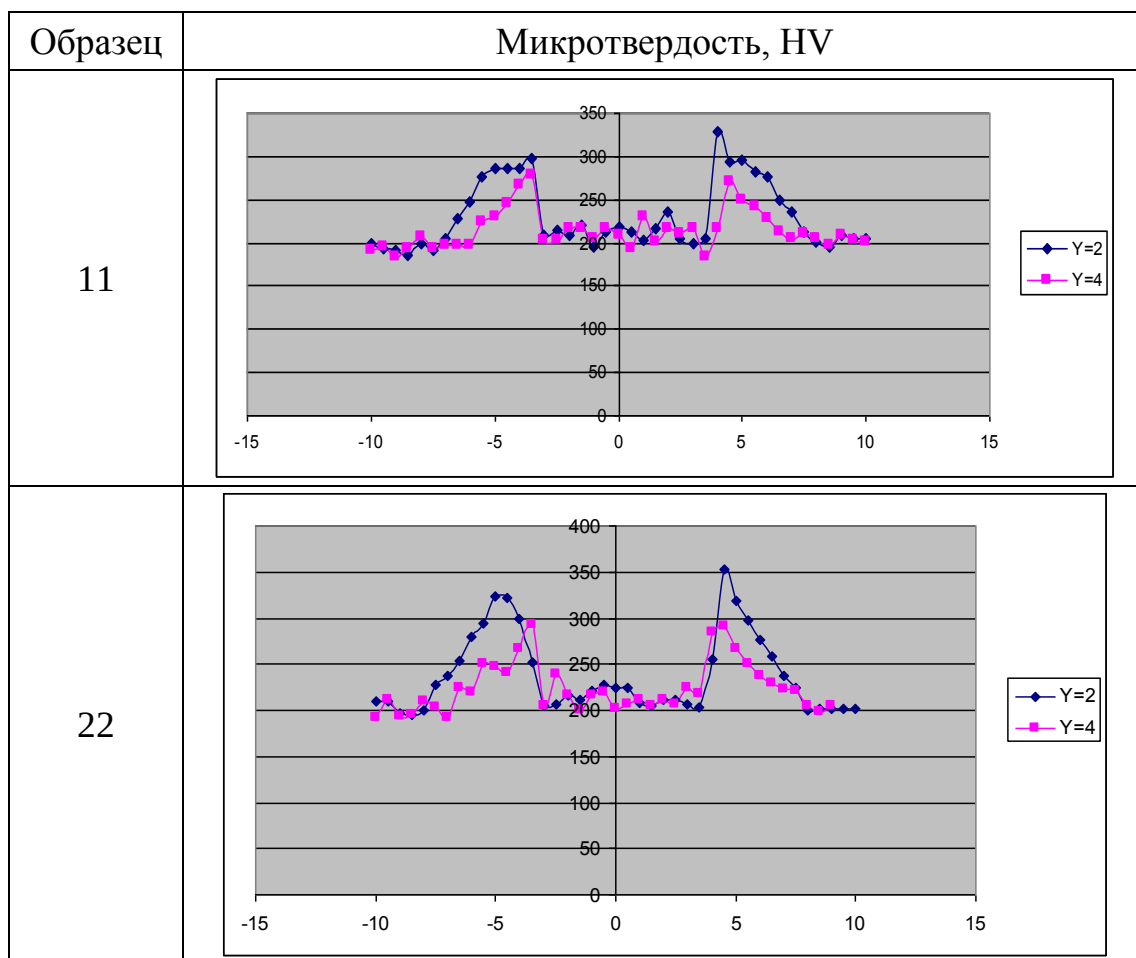


Рисунок 3 - Распределение микротвердости в сечениях сварных соединений, полученных разработанным способом (11) и традиционным (22)

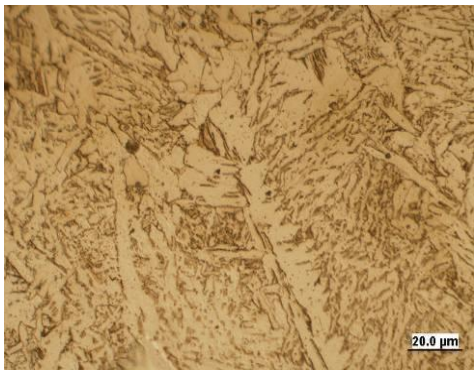
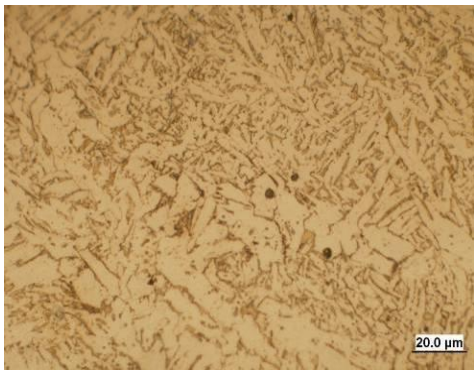
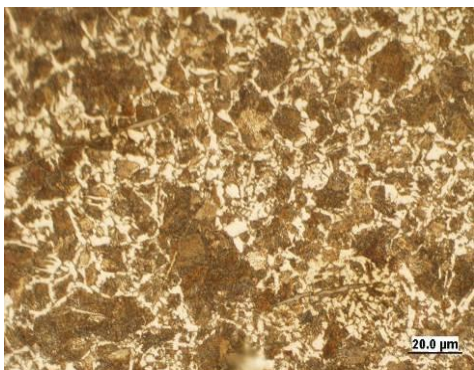
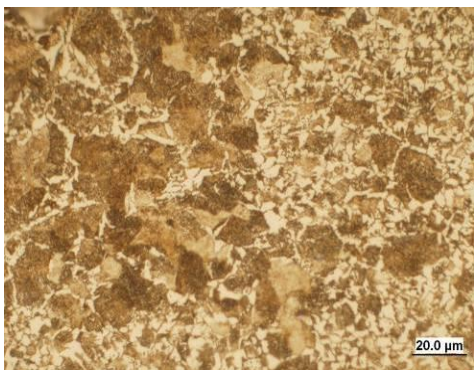
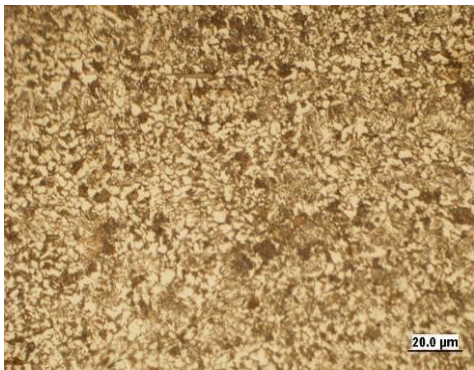
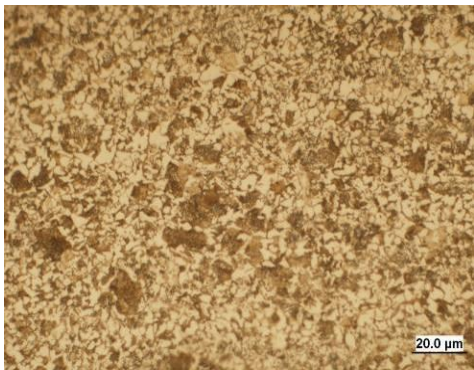
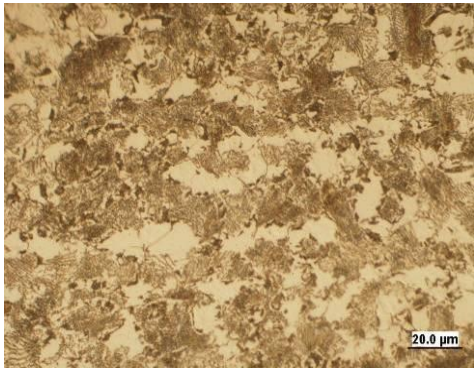
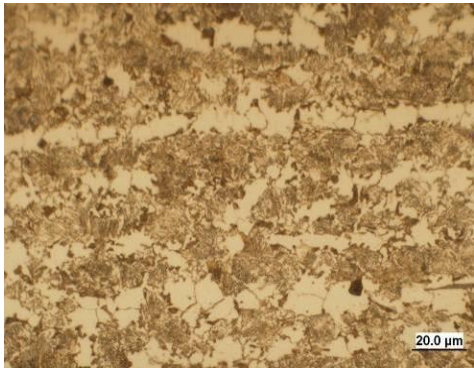
Уча- сток	11	22
ШОВ		
ЗТВ 4 мм от оси шва		
ЗТВ 5 мм от оси шва		
ЗТВ 6 мм от оси шва		

Рисунок 4 - Микроструктура в зонах сварных соединений, полученных по разработанному (11) и традиционному (22) способу, по линии $Y = 4$ мм

Выводы

По результатам проведенных исследований установлено, что при механизированной многопроходной сварке пластин из стали 45 в CO_2 стационарной дугой в условиях двухструйной газовой защиты без предварительной

го подогрева и последующей термообработки:

- наблюдается асимметричное распределение микротвердости в сечениях сварных соединений относительно оси шва, что свидетельствует о некотором отличии структуры и свойств околошовной зоны относительно сварного шва;

- значения микротвердости металла шва примерно одинаковые по слоям и распределяются в диапазоне 190...250 HV, что совпадает с микротвердостью основного металла;

- пик микротвердости (300...420 HV) располагается в зоне сплавления многослойных сварных соединений и его величина уменьшается по глубине щелевой разделки кромок в следствии автотермообработки верхними слоями;

- увеличение погонной энергии сварки (одновременное увеличение сварочного тока и напряжения дуги) приводит к уменьшению градиента (пика) микротвердости в ЗТВ;

- одновременное увеличение сварочного тока и напряжения дуги изменяет структуру в соответствующих участках ЗТВ, зерна становятся более крупными и грубыми, наблюдается расширение ЗТВ и смещение его участков в сторону основного металла;

- электродуговая сварка в условиях двухструйной газовой защиты обеспечивает более быстрое распределение и выравнивание тепла на поверхности изделия и уменьшает ее мгновенный перегрев, что улучшает структурно-фазовое состояние сварного соединения из стали 45 и снижает градиент микротвердости в ЗТВ.

Библиографический список

1. Вышемирский В.Е. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром» / В.Е. Вышемирский // Сварка и диагностика. – 2009. – № 1. – С. 16–19.

2. Сварка и свариваемые материалы: в 3-х т. Свариваемость материалов: справ. изд./ под ред. Э.Л. Макарова. – Москва: Металлургия, 1991. –Т. 1.– 527 с.

3. Лахтин Ю.М. Материаловедение : учеб. для высших технических учебных заведений. / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение. 1990. – 528 с.

4. Чинахов Д.А. Влияние режимов сварки плавлением на структуру и свойства соединений из легированных сталей: моногр. / Д.А. Чинахов. Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 114 с.

5. Химическая и структурная неоднородности в зоне сплавления низкоуглеродистой стали с аустенитным швом при сварке в защитных газах / В.П. Елагин, В.В. Снисарь, М.М. Савицкий, Г.Н. Гордань, В.Г. Васильев, Л.К. Дорошенко // Автоматическая сварка. – 2001. – № 4. – С. 8–13.

6. Патон Б.Е. Управление процессом дуговой сварки путем программирования скорости подачи электродной проволоки / Б.Е. Патон, Н.М. Воропай, В.Н. Бучинский [и др.] // Автоматическая сварка. – 1977. – № 1. – С. 1–5.

7. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электро-

дом / А.Г. Потапьевский. – Москва: Машиностроение, 1974. – 240 с.

8. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – Москва: Машиностроение, 1989. – 264 с.

9. Тарасов Н.М. Отрыв капли электродного металла кратковременным потоком газа / Н.М. Тарасов // Автоматическая сварка. – 1986. – № 7. – С. 10–13.

10. Островский О.Е. Новый метод дуговой сварки с импульсной подачей защитных газов / О.Е. Островский, О.М. Новиков // Сварочное производство. – 1994. – № 11. – С. 10–12.

11. Шейко П.П. Технологические особенности сварки плавящимся электродом низколегированных сталей с чередующейся подачей защитных газов / П.П. Шейко, А.М. Жерносеков, С.А. Шевчук // Автоматическая сварка. – 1997. – № 8. – С. 32–36.

12. Soderstrom E.J. Metal transfer during GMAW with thin electrodes and Ar-CO₂ shielding gas mixtures / E.J. Soderstrom, P.F. Mendez // Welding Journal (Miami, Fla). – 2008. – V. 87 (5). – P. 124–133.

13. Study the shielding gas effect on the metal transfer and weld pool dynamics in GMAW / Z.H. Rao, J. Hu, S.M. Liao, H.L. Tsai // Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference 2009, HT2009, 2009. – V. 3. – P. 675–684.

14. A computational fluid dynamic analysis of the effect of side draughts and nozzle diameter on shielding gas coverage during gas metal arc welding / G.M. Ramsey, A.M. Galloway, S.W. Campbell, N.A. McPherson, T.J. Scanlon // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – V. 212 (8). – P. 1694–1699.

15. Systematic study of effect of cross-drafts and nozzle diameter on shield gas coverage in MIG welding / V. Beyer, S.W. Campbell, G.M. Ramsey, A.M. Galloway, A.J. Moore, N.A. McPherson // Science and Technology of Welding and Joining. – 2013. – V. 18 (8). – P. 652–660.

16. Чинахов Д.А. Газодинамическое влияние на микротвердость и геометрию шва при сварке в условиях двухструйной газовой защиты / Д.А. Чинахов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 2 (15). – С. 61–66.

17. The influence of shielding gas flow rate on the transfer frequency of electrode metals drops / D.A. Chinakhov, E.G. Grigorieva, E.I. Mayorova, D.S. Kartsev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 142, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012005.

ОСОБЕННОСТИ СПЛАВЛЕНИЯ, СТРУКТУРО- И ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ И ПРОВОЛОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Клименов В.А., Федоров В.В., Черепанов Р.О., Хань Ц., Стрелкова И.Л.

*Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
г. Томск, Россия, klimenov@tpu.ru*

***Аннотация.** В настоящее время в аддитивных технологиях достаточно широко используются титановые сплавы, представляющие интерес, как для передовых отраслей промышленности, так и для медицины. Наряду с использованием порошковых материалов, наиболее интенсивно стали развиваться технологии с применением проволок. Методы отличаются по многим характеристикам, а значит и по свойствам, формируемого материала. Особенности сплавления, структуро- и фазообразования и свойств порошковых и проволочных титановых сплавов рассматриваются в работе.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, электронно-лучевое сплавление, титановые сплавы, порошок, проволока, макро- и микроструктура, контроль структуры, механические свойства*

FEATURES OF FUSION, STRUCTURAL AND PHASE FORMATION AND PROPERTIES OF POWDER AND WIRE TITANIUM ALLOYS FORMED IN ADDITIVE TECHNOLOGIES

Klimenov V.A., Fedorov V.V., Cherepanov R.O., Han Z., Strelkova I.L.

*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia, klimenov@tpu.ru*

***Abstract.** Currently, titanium alloys are widely used in additive technologies, which are of interest both for advanced industries and for medicine. Along with the use of powder materials, technologies with the use of wires began to develop most intensively. The methods differ in many characteristics, and hence in the properties of the material being formed. Features of fusion, structural and phase formation and properties of powder and wire titanium alloys are considered in the work.*

***Keywords:** additive technologies, electron beam fusion, titanium alloys, powder, wire, macro- microstructure, structural control, mechanical properties*

Титановые сплавы широко применяются в качестве биоматериалов из-за их хорошей биосовместимости и повышенной коррозионной стойкости по сравнению с более традиционными нержавеющей стали и сплавами на

основе кобальта [1]. В настоящее время для изготовления имплантатов и эндопротезов всё чаще используются аддитивные технологии (АТ). Среди АТ, способных работать с металлическими материалами, наибольшее распространение получают те, которые созданы на базе лазерных или электронно-лучевых установок. В основе технологических процессов лежат, как правило, три основных процесса, представленные в таблице 1 [2]. Хорошо известно, что на свойства материала, формируемого в условиях аддитивных технологий, оказывают влияние несколько десятков параметров основные из которых, включающие мощность и скорость перемещения источника нагрева, плотность мощности, геометрия фидстоков, метод подачи материала и шаблон или схема сканирования лучей представлены в таблице 1. Выбор параметров очень важен, так как они определяют форму и размер ванны расплава и результирующие термические циклы, скорость охлаждения, температурные градиенты и скорость затвердевания, которые в свою очередь определяют формирование микроструктуры, дефектов и свойств, как правило, отличающиеся от полученных традиционными методами [2-4]. Известно, что характерные уровни скоростей охлаждения для большинства традиционных методов могут находиться в диапазоне значений $48 - 4 \cdot 10^3$ K/s [3], и при этом происходят существенные изменения в структуре и свойствах формирующегося материала. В аддитивных технологиях температурный градиент достигает значений 10^6 K/cm, а скорости охлаждения расплава могут находиться в диапазоне $10^3 - 10^8$ K/s [4]. С учётом сложности процессов послойного сплавления исходного материала вопросы контроля состава и структуры на различных масштабных уровнях, в том числе и дефектов [4], представляется важным и необходимым как для прогнозирования свойств, так и для сертификации, как материала, так и технологии в целом.

Таблица 1 -Сравнение различных параметров и характеристик основных процессов печати металлами

Параметр или процесс	Селективное спекание металлического порошка лазерным и электронным лучом	Осаждение металлического порошка при помощи направленного энергетического воздействия	Осаждение металлической проволоки при помощи направленного энергетического воздействия
Мощность источника (Вт)	50 – 1000 (до 4х лучей)	400 – 3000	1000 – 5000
Скорость сканирования (мм/с)	10 – 1000	6 – 60	5 – 50
Скорость осаждения (см ³ /ч)	25 – 180	20 – 450	100 до > 1000
Размер печати (мм х мм х мм)	Максимум 1258 х 1258 х 1350	Максимум 2000 х 1500 х 1000	Максимум 5000 х 3000 х 1000

Продолжение таблицы 1

Параметр или процесс	Селективное спекание металлического порошка лазерным и электронным лучом	Осаждение металлического порошка при помощи направленного энергетического воздействия	Осаждение металлической проволоки при помощи направленного энергетического воздействия
Диаметр исходного сырья (мкм)	15 – 60 (лазер), 45 – 105 (электронный луч)	15 – 105	900 – 3000
Погрешность линейных размеров (мм)	0,04-0,20	0,20	1 – 5
Шероховатость поверхности (средне-квадратичное отклонение поверхности от ее среднего значения мкм)	7 – 30 (лазер), 20 – 50 (электронный луч)	15 – 60	45 – 200+, поверхность требует механической обработки
Постобработка	Термообработка, горячее изостатическое прессование, механическая обработка	Термообработка, механическая обработка, шлифовка	Термообработка, отжиг для снятия напряжений, механическая обработка
Скорость охлаждения при затвердевании (К/с)	$10^5 - 10^7$	$10^2 - 10^4$	$10^1 - 10^2$

Однако контроль микроструктуры, дефектов и свойств остаётся только желаемым, потому что необходимо проводить много экспериментов, для того чтобы исследовать влияние на них большого числа параметров процесса.

Условия печати часто выбираются на основе рекомендации производителей машин или на основании проб и ошибок, т.е. эмпирическим подбором. Предсказание микроструктуры, свойств и дефектов при печатании деталей требуют понимания металлургических процессов, протекающих в условиях характерных для АТ. Однако металлургические принципы не позволяют в таких условиях предсказать параметры процесса, с помощью которых можно достичь хороших микроструктур и механических свойств [2].

Улучшение качества детали методом проб и ошибок не является приемлемым для АТ, потому что высокая стоимость материалов и исполнения в условиях требований высокой производительности делает такой подход нереальным.

Методы физического и математического моделирования могут обеспечить взаимосвязь между параметрами процессов, геометрией детали, составом и микроструктурой, механическими свойствами и дефектами данного сплава. Взаимосвязи являются важными, так как они могут уменьшить число экспериментов, необходимых для достижения высокого качества деталей [2,5].

Механистические модели могут предсказать такие физические характеристики, как температурные и скоростные поля, микроструктуру и дефекты, формирующиеся на основе параметров процессов и термофизических свойств сплавов на основании использования феноменологических представлений. Если этих представлений недостаточно, но данные являются переменными от параметров процесса, свойства сплава и характеристик продукта, то можно применять методы машинного обучения [2]. Начиная с дизайна детали, планирования процесса, управления и контроля машинное обучение может помочь уменьшить снизить дефекты, достичь превосходных микроструктур и свойств и способствовать инспекции качества продукта для ускоренной квалификации продукта. Быстро разрабатывающие механистические модели и алгоритмы машинного обучения могут также открыть возможности печати новыми сплавами. Синергетический эффект применения металлургии, механистических моделей и машинного обучения является очень важным для конструирования, планирования процессов, производства, квалификации и оценки эффективности напечатанных деталей.

В качестве материалов, которые используются чаще всего для печати изделий из титановых сплавов, выбираются порошковые и проволоочные титановые сплавы, марки которых и их химический состав представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Химический состав титановых сплавов

Сплав	Материал	Ti	Al	V	Si	Fe	O	H	N	C	Сумма прочих примесей
BT1-0 (Grade2)	Порошок*	Основа	–	–	0,10	0,25	0,20	0,01	0,04	0,07	0,10
BT6 (Grade5)	Порошок*	Основа	5,3–6,8	3,5–5,3	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10	0,60
BT6св (BT-6)	Проволока**	Основа	3,5–4,5	2,5–3,5	0,10	0,15	0,12	0,003	0,04	0,05	0,30
BT6св (РФА)	Проволока	92,62±0,58	3,88±0,56	3,26±0,18		0,134±0,043					
BT6св (РФА)	Материал после печати	92,88±0,31	3,66±0,28	3,13±0,15	0,07±0,03	0,074±0,015					0,16±0,06
BT1-0 (РФА)	Литой	99,39±0,39				0,08±0,016					
Ti-6Al-4V (Grade5)***	Литой	Основа	5,5–6,75	3,5–4,5		0,4	0,2	0,015	0,05	0,08	
*: компания «Нормин», г. Боровичи, по ГОСТу 19807-91; **: компания «Аугемо» г. Санкт-Петербург, по ГОСТу 27265-87; ***: ASTM B265-20a.											

Обращает на себя внимание тот факт, что для используемого материала марки BT6св (сварочная проволока) концентрации таких легирующих элементов как Al и V несколько меньше значений типичных для наиболее часто используемого сплав типа Ti6Al4V.

Исследование особенностей печати титановых сплавов проводилось в

условиях селективной печати порошком и сплавления проволоки на электронно-лучевой модульной установке НИ ТПУ [5] и сплавлении проволоки из сплава ВТ6с диаметром 1,6 мм на титановой подложке с помощью лабораторной установки электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ [6]. Возможности регулирования токов пучка, скоростей и режимов его перемещения позволяют изменять термические условия при аддитивных технологиях, сравнивая их с теоретическими результатами, и анализировать структуру и свойства формируемого материала и изделия в целом. Это имеет принципиальное значение, так как подобные не позволяют установки, создаваемые серийно, особенно в случае зарубежных производителей.

Для контроля качества детали при печати нами активно применяется рентгеновская компьютерная томография для неразрушающего анализа структуры синтезированных материалов осуществлялось с использованием микро-томографа высокого разрешения TOLMI-150-10 (НИ ТПУ) [5]. Полученные рентгеновские изображения (проекции) обрабатываются специализированным программным обеспечением (ПО) с целью получения томограмм – плоских срезов, перпендикулярных оси вращения, а также строятся 3D-изображения. Для микроструктурных исследований использовался металлографический микроскоп Axio Observer.A1m (Carl Zeiss, Германия) увеличением до 1000 крат с программным обеспечением для количественного анализа фазового и структурного состава сплава. Микротвердость по Виккерсу определяли на автоматическом комплексе на базе микротвердомера Duramin-5 (Struers A/S, Дания) при нагрузке 100 г и времени 12 с.

На томографическом снимке образца, полученного при селективном сплавлении порошка титанового сплава [5,7] хорошо видны границы сплавляемых слоев материала и отдельные поры по слою (рисунок 1,а). На металлографических снимках исследуемых образцов, подтверждается плохое сплавление отдельных слоев сплавленного материала, неполное оплавление отдельных порошинок (рисунок 1,б).



Рисунок 1 -Томограмма образца (а) и металлографический снимок поперечного сечения (б) образца

В тоже время, анализ образцов, полученных при сплавлении проволоки [5,8,9] демонстрирует литую структуру без видимых слоев со сферическими порами от десятка микрон до 400 мкм (рисунок 2,а). Поскольку исходным материалом выбрана проволока, то наличие пор можно объяснить возникновением значительного перегрева и кипения жидкой металлической

ванны в момент прохода мощного электронного луча и последующей быстрой кристаллизации металла, что не дает возможности выходу образующегося газа (например, за счет выгорания металла) в полном объеме. Однако, по результатам томографических исследований установлено, что средняя объемная доля пористости не превышает 1%. На металлографических шлифах видна характерная для аддитивных образцов столбчатая структура в направлении выращивания образца и сферические поры (рисунок 2,б).

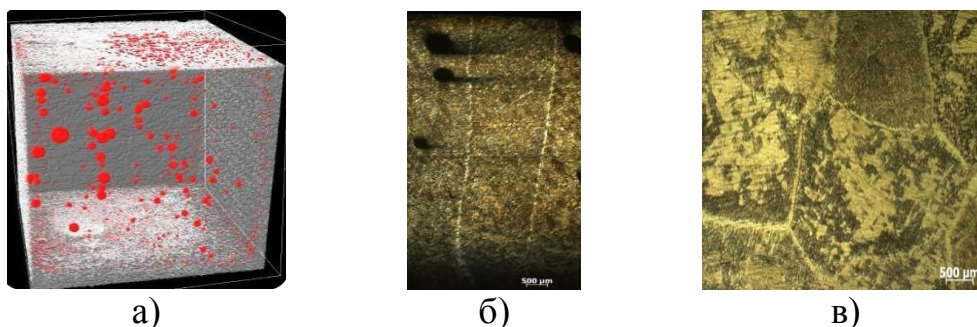


Рисунок 2 - 3D томограмма образца, полученного сплавлением (а), металлографическое изображение поперечного (б) и продольного шлифа (в)

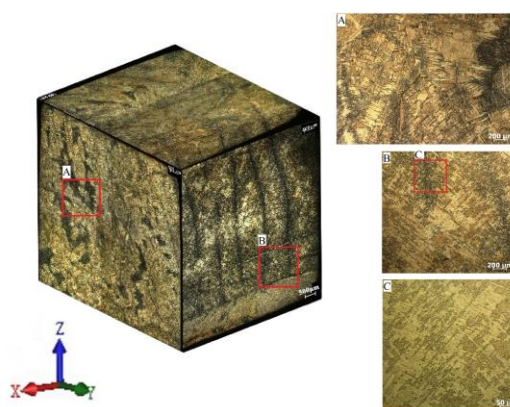


Рисунок 3 - Микроструктура сплава в трех плоскостях при малом увеличении (край образца)

Особенности формирования макро- и микроструктуры образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях аддитивных технологий, в том числе и в случае воздействия электронным лучом, наиболее глубоко исследованы применительно к порошковым материалам. Типично титановые образцы демонстрируют упорядоченную слоистую микроструктуру, состоящую из чрезвычайно мелких зёрен, как и может быть ожидаемо в случае термических условий при электроннолучевом оплавлении, обусловленных малыми размерами ванны расплава и быстрым охлаждением. Фазовый состав сплава представлен в основном α и β фазами, соотношение которых в сплаве, как показано нами ранее [5,7-9], может регулироваться значениями тока пучка.

Очень важной особенностью материалов, формирующихся в условиях электронно-лучевого сплавления при аддитивных технологиях, является как неоднородность состава и структуры на различных масштабных уровнях, обусловленных специфическими термическими условиями, в которых мате-

риал формируется. Данный факт хорошо демонстрируется рисунком 3. На построенной, на основе металлографических исследований 3Д модели элемента структуры наплавленной с применением проволоки [10], показаны особенности структуры в различных сечениях. Наиболее ярко видна столбчатая структура в направлении выращивания образца, а также характерное строение вблизи подложки.

Микроструктура состоит из столбчатых зерен диаметром $d=0,8-2,0$ мм, ориентированных обратному направлению теплоотвода параллельно оси Z. В каждом столбчатом зерне имеются чередующиеся на расстоянии $h=0,8-2,0$ мм черные слои с измельченной структурой, образованные в результате прохождения электронного луча и формирования каждого нового слоя. Светлые слои представляют собой Видманштеттную структуру корзиночного типа из колоний α' фазы разной кристаллографической направленности.

Особенности микроструктуры и дефектности материала титанового сплава, формирующегося в условиях исследуемых аддитивных технологий, сказываются на физико-механических свойствах и характере поведения титанового сплава при различных видах разрушения [9,10]. Как правило, материал исследуемых сплавов при растяжении и сжатии демонстрирует более высокие значения прочности и низкую пластичность. Обнаруживается различие в достигаемых значениях, для испытываемых образцов от направления их вырезки.

Наиболее чувствительной характеристикой к локальным термическим условиям и к условиям нагрева всего образца является твердость. В таблице 3, сведены значения получаемые для различных титановых сплавов и различных методов их сплавления.

Таблица 3 - Твердость сплава Ti-6Al-4V, сформированного в условиях селективного сплавления порошка (SEBM) и наплавки проволоки (EBM) в продольном и поперечном сечении

Микротвердость			
SEBM		EBM	
Ti-6Al-4V		Ti-6Al-4V	BT6св
Отпущ.	350 [7]	485±30 (вдоль) [5]	282±20(вдоль)
Закалённый	480 [7]	474±25 (попер.) [5]	267±10(попер.)
При $I = 2.5$ mA [7]	335 ± 30 (вдоль)		
	297 ± 20 (попер.)		
При $I = 3.0$ mA [7]	510 ± 27 (вдоль)		
	480 ± 9 (попер.)		

Как показывают проведённые нами теоретические и экспериментальные исследования [5,7] получаемые при численных исследованиях термические условия, для конкретных режимов электронно-лучевого воздействия, удовлетворительно объясняют различия в значениях твердости материалов, сформированных при аддитивной технологии сплавления титановых сплавов.

Заключение

Проведены исследования структуры и свойств титановых сплавов, полученных в условиях селективного и прямого послойного электронно-

лучевого воздействия на порошок и проволоку. Результаты исследований методами неразрушающего контроля показали особенности внутренней структуры материалов, которые следует принимать во внимание на стадии отработки технологии и корректировки процесса. Совместный анализ результатов неразрушающего контроля и данных микроструктурных исследований и механических испытаний даёт возможность получить более углублённое представление о механизмах формирования свойств исследуемых материалов, а также прогнозировать их поведение в условиях механического нагружения.

Авторы выражают благодарность инженеру НИИ ТПУ М.А. Густомясову и инженеру ИФПМ Никонову С.Ю. за изготовление на электронно-лучевых установках образцов для исследований.

Библиографический список

1. Long, M “Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective”. *Biomaterials*. 18 (19): 1621—1639. (1998). DOI:10.1016/S0142-9612(97)00146-4. PMID 9839998.
2. DebRoy T., Mukherjee T., Wei H. L., Elmer J. W. and Milewski J. O. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing // *Nature reviews. Materials* – 2020.
3. Microstructural Characterization of Ti-6Al-4V and its Relationship to Sample Geometry / Blake Gaspar. Materials Engineering Department, Cal Poly – San Luis Obispo. -2012. – 22 p.
4. Collins, P.C. et al. Microstructural control of additively manufactured metallic materials // *Annu. Rev. Mater Res*. 2016. Vol.46. P. 63-91.
5. Vasiliy Fedorov, Vasiliy Klimenov, Roman Cherepanov, Andrey Batranin, Powder and wire melting of titanium alloys by electron beam // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 37. P. 584-591.
6. Kalashnikov K.N., Rubtsov V.E., Savchenko N.L., Kalashnikova T.A., Osipovich K.S., Eliseev A.A., Chumaevskii A.V. The effect of wire-feed geometry on electron beam freeform 3D-printing of complex-shaped samples from Ti-6Al-4V alloy//*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 2019. - P. 1-10. DOI: 10.1007/s00170-019-04589-y.
7. Pushilina, N.S., Klimenov, V.A., Cherepanov, R.O., Kashkarov E.B., Fedorov V.V., Syrtanov M.S., Lieder A.M. and Laptev R.S. Beam Current Effect on Microstructure and Properties of Electron-Beam-Melted Ti-6Al-4V Alloy // *J. of Materi Eng and Perform*. – 2019. – Vol. 28. – P. 6165–6173.
8. Klimenov, V.A., Fedorov, V.V., Slobodyan, M.S., Pushilina, N.S., Strelkova I.L., Klopotov A.A. and Batranin A.V. Microstructure and Compressive Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Built by Electron Beam Free-Form Fabrication // *J. of Materi Eng and Perform* – 2020. –Vol. 29. – P. 7710–7721.
9. В.В. Федоров, В.А. Клименов, А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.В. Рыгин, И.А. Стрелкова, А.В.Батралин, М.Д. Старостенков Влияние структуры и дефектов на разрушение сплава Ti6Al4V, сформированного в условиях электроннолучевого послойного сплавления. Часть II: Испытание на сжатие

// Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2020, т.17, №2, стр.243-250.

10. Клименов В.А., Колубаев У.А., Клопотов А.А., Чумаевский А.В., Рубцов В.В., Хань Ц., Батрагин А.А., Стрелкова И.Л., Химич М.А., Никонов С.Ю. Применение методов физико-механических исследований и методов неразрушающего контроля при разработке аддитивных технологий с использованием титановых сплавов // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения, – 2022. – С. 430-431.

УДК 620.18

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ПРОВОЛОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Чумаевский А.В., Панфилов А.О.,
Зыкова А.П., Осипович К.С., Николаева А.В., Добровольский А.Р.,
Утяганова В.Р., Шамарин Н.Н., Никонов С.Ю.**

*Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Томск, Российская Федерация, tch7av@gmail.com*

***Аннотация.** В работе приведены результаты экспериментальных исследований формирования новых композиционных материалов различного назначения с использованием методов нестационарной локальной металлургии. Результаты исследований демонстрируют высокую степень применимости технологии проволочного электронно-лучевого аддитивного производства для получения композитов с различной структурой, несмотря на наличие ряда существенных ограничений, связанных с температурой плавления, плотностью, степенью взаимной растворимости компонентов и др.*

***Ключевые слова:** Электронно-лучевая аддитивная технология, композиционные материалы, нестационарная локальная металлургия, степень взаимного растворения компонентов, 3D-печать, управление структурой материалов при печати.*

PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS WITH METAL MATRIX USING NON-STATIONARY LOCAL METALLURGY IN ELECTRON BEAM ADDITIVE WIRE FABRICATION

**Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevskii A.V., Panfilov A.O., Zykova A.P.,
Osipovich K.S., Nikolaeva A.V., Dobrovolsky A.R., Utyaganova V.R.,
Shamarin N.N., Nikonov S.Yu.**

Abstract. *The paper presents the results of experimental studies of the formation of new composite materials for various purposes using the methods of non-stationary local metallurgy. The research results demonstrate a high degree of applicability of wire electron-beam additive manufacturing technology for obtaining composites with different structures, despite the presence of a number of significant limitations related to melting temperature, density, degree of mutual solubility of components.*

Keywords: *Electron-beam additive manufacturing, composite materials, non-stationary local metallurgy, the degree of mutual dissolution of the components, 3D-printing, control of materials structure during printing.*

Введение

В настоящее время интенсивно развиваются технологии аддитивного производства изделий из металлов и сплавов. С их внедрением в производственный цикл возможно добиться увеличения экономических показателей, снижения количества отходов при последующей обработке изделий и уменьшения сроков изготовления деталей машин и механизмов [1]. Технологии аддитивного производства различаются по источнику энергии для расплавления металла (лазерный луч, электронный пучок, электрическая дуга) и по способу введения металла в зону печати (направленное или послойное введение порошкового материала, подвод проволоочных филаментов) [2].

В зоне печати происходит плавление металла и его последующая кристаллизация с реализацией процессов по своей физической природе близких к происходящим при металлургическом производстве. К ним можно отнести помимо плавления и кристаллизации взаимную диффузию компонентов сплавов, формирование твердых растворов и интерметаллидных фаз при кристаллизации, конвекцию в ванне расплава, образование различного структурно-фазового состояния при охлаждении, а также при циклическом нагреве и охлаждении нанесенных слоёв за счет нанесения последующих. При этом, из-за локального характера реализации процессов и их нестационарного поведения во времени, и неоднородного в объеме ванны расплава данные процессы значительно отличаются от происходящих при традиционном металлургическом производстве. По этой причине данные процессы могут быть классифицированы как процессы нестационарной локальной металлургии [3].

По причине достаточно сложной реализации процессов нестационарной локальной металлургии при печати различных металлов и сплавов необходимо их детальное изучение, особенно, при получении изделий со сложной и композитной структурой [4]. Но, помимо различных сложностей в понимании процессов нестационарной локальной металлургии, возможно их использование для управления структурой металлов и сплавов при получении

нии изделий [5]. Например, возможно изменение скорости кристаллизации, изменение химического или фазового состава ванны расплава, введение дополнительных модифицирующих воздействий или постобработок [6].

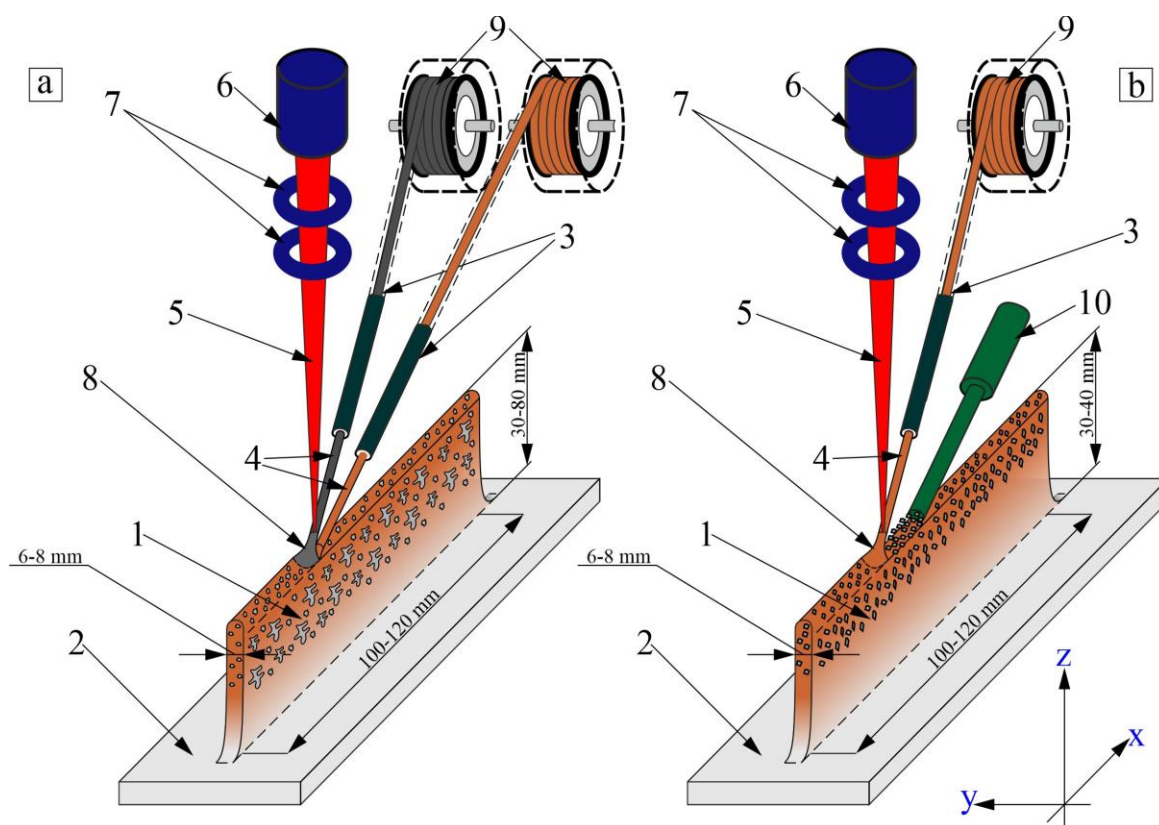
В данном направлении применение технологий аддитивного производства также является достаточно актуальным, так как возможно изготовление изделий с управляемым составом, механическими и эксплуатационными свойствами [7]. Таким образом, введение необходимых легирующих элементов возможно в тех областях изделий, где это действительно целесообразно, с экономией дорогостоящих легирующих элементов. Возможно и получение изделий с композитной структурой поверхностного слоя с высокими трибологическими свойствами или повышенной коррозионной стойкостью, без изменения прочности и пластичности основного объема [8].

Управление структурой изделий при их получении различными аддитивными методами может существенно отличаться. В области технологий, основанных на введении порошков в зону печати, возможно наиболее локальное управление структурой материала [9]. Но, при этом данные технологии отличаются существенно меньшей производительностью в сравнении с технологиями, основанными на использовании проволоочных филаментов. При этом из технологий проволоочной 3D-печати одной из наиболее подходящих для получения композитов является проволоочная электронно-лучевая аддитивная технология [10]. С использованием данного метода возможно получение изделий с управляемой структурой за счет управляемого введения в ванну расплава двух или более проволоочных филаментов. Также возможно изменение химического или фазового состава ванны расплава за счет совмещения проволоочной и порошковой подачи материала в ванну расплава. При этом каждый из способов управления структурой металлов и сплавов или композиционных материалов на их основе обладает рядом преимуществ и недостатков, обусловленных различными характеристиками вводимых в ванну расплава компонентов. В свою очередь это обуславливает необходимость исследования влияния на процесс формирования структуры при печати различных факторов, включая степень взаимного растворения компонентов системы, соотношение их плотности и температуры плавления, а также влияние объемной доли вводимых упрочняющих фаз и способа их введения в ванну расплава. Целью настоящей работы является сопоставление влияния вышеупомянутых факторов на формирование структуры при получении композиционных материалов на основе различных металлов и сплавов с использованием методов нестационарной локальной металлургии.

Материал и методика

В работе приведены данные, полученные при получении и исследовании композиционных материалов на экспериментальном оборудовании для проволоочного электронно-лучевого производства в Институте физики прочности и материаловедения. Композиционные материалы были получены по схемам, представленным на рисунке 1. Получение композитов с использованием управляемой подачи двух проволоочных филаментов производилось следующим образом. Образец 1 получали на поверхности подложки 1 путем

введения через сопла 3 филаментов 4 в зону печати. Плавление филаментов осуществлялось электронным пучком 5 от электронной пушки 6 подававшимся через систему фокусировки 7 в зону печати и формировавшему ванну расплава 8. Подача филаментов осуществлялась от барабанов 9 с использованием специализированных податчиков. Печать образцов с совмещением проволоочной и порошковой подачи осуществлялась аналогично, с заменой второго проволокоподатчика устройством, подающим порошок 10. Композиты были получены на основе меди марки М1, бронзы БрАМц9-2, алюминиевого сплава АК5, АМг5. Упрочнение материалов производилось за счет сталей 12Х18Н9Т, 06Х19Н9Т, никелевого сплава Udimet500, алюминиевого сплава АК12 при двухпроволочной подаче, и за счет порошков вольфрама, молибдена и др. при комбинированном методе. Приведенные результаты были получены методами оптической (Altami MET 1С, Olympus LEXT 4100), растровой электронной (Zeiss LEO EVO 50) микроскопии, рентгеновской томографии, механических испытаний на растяжение (УТС-110М) и трибологических испытаний.



- 1 - образец; 2 - подложка; 3 - сопло; 4 - филамент; 5 - электронный пучок;
6 - электронная пушка; 7 - система фокусировки; 8 - ванна расплава;
9 - проволокоподатчик; 10 - система подачи порошка

Рисунок 1 - Схемы процесса получения композиционных материалов с металлической матрицей с введением двух филаментов в ванну расплава (а) и с совмещением проволоочной и порошковой подачи материала в зону печати (b)

Результаты и обсуждение

Как было указано выше, формирование структуры при аддитивном получении металлических изделий с композитной структурой существенно зависит от таких параметров, как взаимная растворимость, соотношение плотности и температуры плавления компонентов. В первом случае формирование структуры материалов достаточно хорошо описывается соответствующими диаграммами состояния сплавов с определенными отклонениями, связанными с высокой скоростью кристаллизации материала в ванне расплава, наличием конвективного движения и гравитационного расслоения. Например, при получении композиционного материала на основе меди М1 и алюминиевого сплава АК12 формирование интерметаллидных фаз и твердых растворов происходит неравномерно из-за достижения разных концентраций алюминия в отдельных областях материала (рисунок 2, а-с). Это приводит к тому, что даже при достаточно высоком содержании алюминия и наличии крупных сеток из интерметаллидных фаз, имеются области со структурой преимущественно твердорастворного типа (рисунок 2, с).

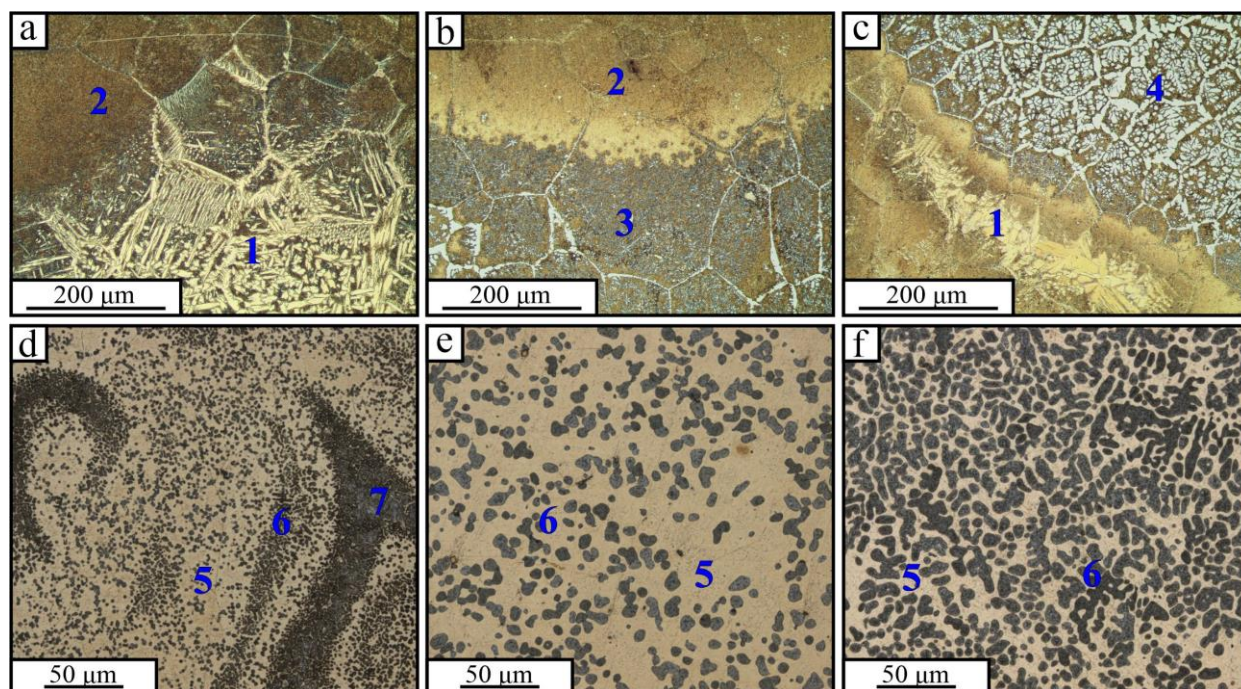


Рисунок 2 - Формирование структуры композиционных материалов на основе бронзы БрАМц9-2 с введением 10% (а), 25% (b) и 50% (с) стали и композиционных материалов на основе меди с введением 7% (d), 8% (е) и 9% (f) сплава АК12

В образцах композитов на основе меди или медных сплавов и сталей из-за нерастворимости основных компонентов системы происходит формирование в основном механических смесей. Например, это можно выделить при получении композитов на основе БрАМц9-2 с введением 10 % (рисунок 2, а), 25 % (рисунок 2, b) и 50 % (рисунок 2, с) стали 09Х19Н9Т. В данном случае механическая смесь из бронзовой матрицы и частиц стали дополняется микроскопическими частицами интерметаллидных фаз

(FeхAlу), что приводит к резкому повышению механических свойств до 625, 675, 815 МПа соответственно при временном сопротивлении чистой бронзы после печати 445 МПа. В приведенных изображениях можно выделить ещё один аспект, связанный с неоднородностью структуры материала при введении 10% стали. Он обусловлен неравномерностью плавления компонента, вводимого в наименьшем количестве в процессе печати, особенно если его температура плавления выше, чем у основного компонента. В таком случае возможен переход от струйного характера течения металла с проволоки на поверхность образца - к капельному режиму, характеризующемуся неоднородным отделением материала от проволоки и формирующем неоднородности структуры, в том числе макроскопического размера. Решением такой проблемы в ряде работ являлось изменение геометрии ввода филаментов в ванну расплава таким образом, чтобы компонент с наибольшей температурой плавления располагался ниже основного, чтобы оплавленный металл второй проволоки увлекался в общую ванну расплава металлом от первой.

Получение композитов с неограниченной взаимной растворимостью в твердом состоянии, например, на основе меди и никеля, характеризуется одними из наиболее простых структур, свободных от вторичных фаз. В то же время при получении композитов данного типа в структуре в большом количестве могут присутствовать неоднородности распределения элементов, связанные с быстрым затвердеванием ванны расплава.

При получении материалов на основе бронзы БрАМц9-2 и никелевых сплавов Udimet500 и Inconel625 было обнаружено, что, несмотря на неограниченную взаимную растворимость основных компонентов, между их легирующими элементами в большом количестве формируются частицы вторичных фаз (NixAlу) и фаз более сложной структуры и состава. Это также, как и при получении материалов на основе бронзы БрАМц9-2 и стали 06Х19Н9Т приводит к повышению предела прочности, например, до 675 МПа при введении 25 % сплава Udimet500. Также можно выделить достаточно существенное повышение износостойкости материала при сухом трении скольжения.

При получении композитов на основе материалов с существенной разницей температуры плавления, особенно с преобладанием её у компонента с большей температурой, происходит образование неоднородностей структуры, которые достаточно сложно устранять при печати. Например, при печати композитов на основе алюминиевого сплава АК5 с введением в объём 5-10 % никелевого сплава Udimet500 (рисунок 3), происходит образование участков с наличием крупных частиц не взаимодействовавшего с матрицей никелевого сплава (рисунок 3, а), в том числе макроскопического размера. Менее критичными являются неоднородности структуры с различным сочетанием интерметаллидных фаз и алюминиевой матрицы (рисунок 3, b,c). Несмотря на неоднородности структуры и низкие свойства материала при растяжении, предел прочности на сжатие может повышаться до 450-500 МПа.

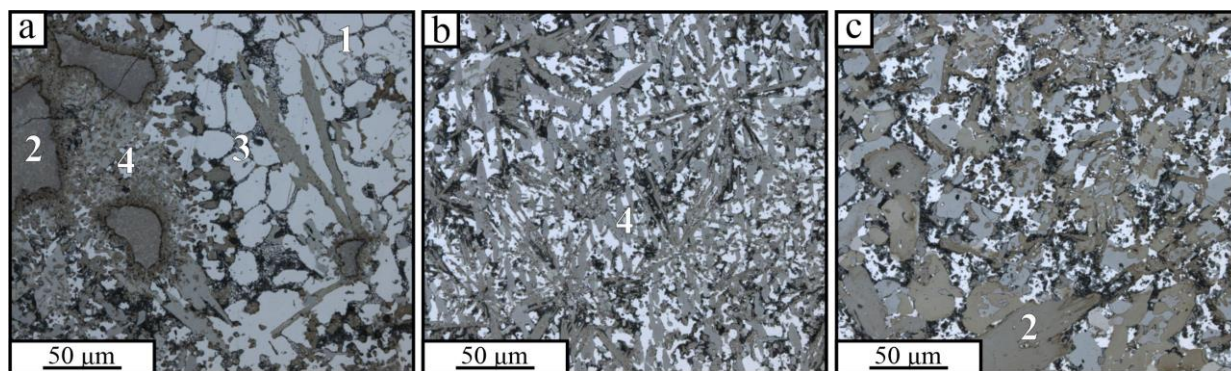
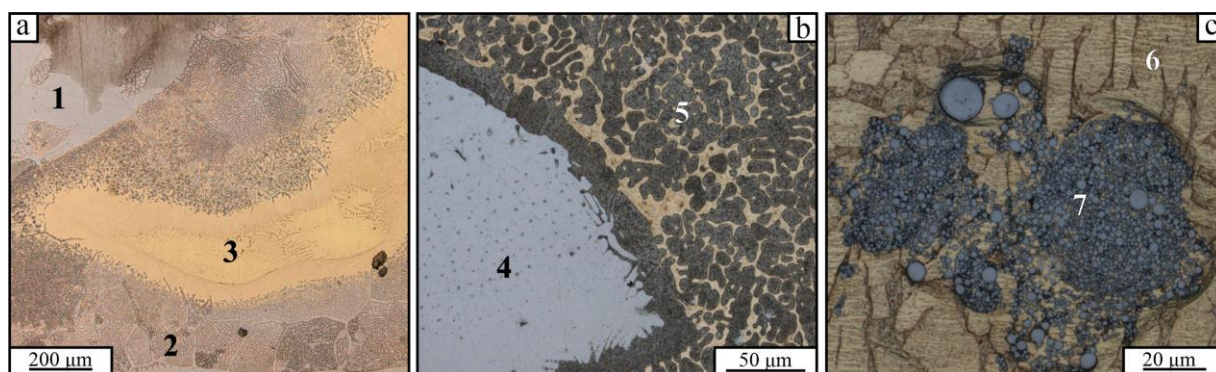


Рисунок 3 - Формирование структуры композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АК5 с введением 5 % (a) и 10% (b, c) никелевого сплава Udimet500

Следует отметить, что неоднородности в структуре материалов, полученных с использованием как проволочной (рисунок 4, a, b), так и комбинированной (рисунок 4, c) подачи материала присутствуют при печати широкого спектра материалов.



1 - интерметаллиды; 2 - механические смеси интерметаллидов и твердых растворов; 3 - твердые растворы; 4 - крупная частица стали; 5 - равномерно распределенные мелкие частицы стали; 6 - бронзовая матрица; 7 - агломераты порошков вольфрама

Рисунок 4 - Типичные неоднородности структуры композиционных материалов, полученных с введением в ванну расплава двух филаментов (композит на основе меди и 10 % сплава АК12 - a, композит на основе 50 % бронзы БрАМц9-2 и 50 % стали 06Х19Н9Т - b) и комбинацией порошковой и проволочной подачи (композит БрАМц9-2/W - c)

Неоднородности строения композиционных материалов в значительной степени определяются и различиями температуры плавления компонентов, и соответствующими диаграммами состояния, и жидкотекучестью компонентов и результатов их взаимодействия, и, что наиболее важно, различиями в плотности. Известно, что при металлургическом производстве отливок с их модификацией различными порошковыми материалами с относительно высокой плотностью возможно оседание порошков вниз ковша или формы и обеднение частицами основного объема. В таком случае применяются различные методики, например, ультразвукового воздействия на расплав в процессе кристаллизации или непосредственно перед разливкой. При получении

композитов на основе различных металлов и сплавов с введением в ванну расплава порошковых частиц с достаточно высокой плотностью по сравнению с основным металлом возможна реализация аналогичных особенностей организации структуры. Например, в композите на основе сплава АМг5 с введением порошка молибдена, несмотря на достаточно высокую скорость кристаллизации в ванне расплава порошок успевает оседать на дно ванны расплава и формировать макроскопические неоднородности структуры (рисунок 5). Такие образования приводят к падению механических свойств, хотя и повышают твердость и износостойкость поверхностного слоя. В дальнейших работах планируется применение ультразвукового воздействия при печати для устранения данных неоднородностей, но на настоящее время эта проблема ещё не решена.

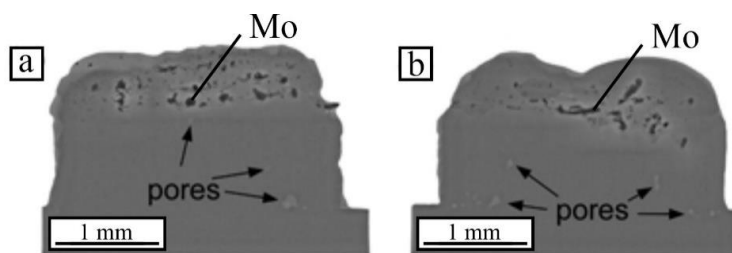
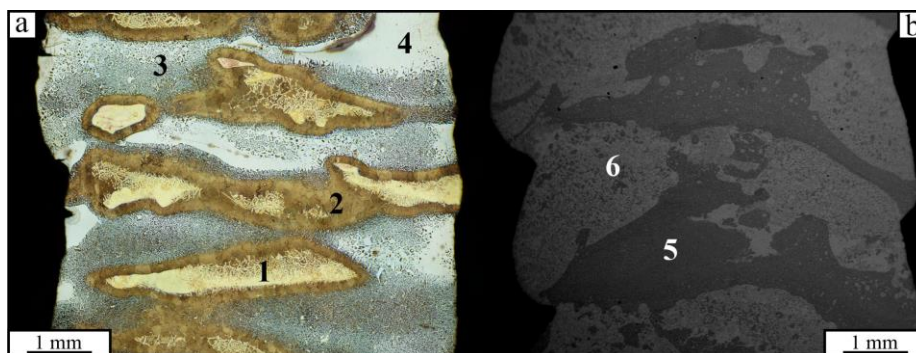


Рисунок 5 - Формирование макроскопических неоднородностей при печати алюминиевого сплава АМг5 с введением порошковых частиц молибдена при печати

Близкая ситуация наблюдается и при получении композиционных материалов с использованием технологии, основанной на введении двух проволок в ванну расплава (рисунок 6), хотя и имеется ряд отличий в этих материалах, где происходит взаимодействие между компонентами системы.



1 - слои обедненные алюминием, 2 - слои со средним содержанием алюминия, 3 - слои с ячеистой структурой интерметаллидов, 4 - интерметаллидные слои, 6 - слои с преимущественно медным составом, 7 - слои обогащенные сталью

Рисунок 6 - Влияние соотношения плотности, температуры плавления и жидкотекучести компонентов на формирование структуры при электронно-лучевой печати композитов на основе меди и алюминиевого сплава АК12 (а) и на основе меди и стали 12Х18Н9Т (б) с использованием двухпроволочной подачи

Например, при получении композитов на основе меди и алюминиевого сплава АК12 происходит образование ряда твердых растворов и интерметаллидных фаз, которые могут обладать меньшей температурой плавления и большей жидкотекучестью по сравнению с чистой медью (рисунок 6, а). В таком случае происходит инициированное различиями в плотности, жидкотекучести и температуре плавления растекание насыщенных алюминием слоёв с чередованием их со слоями с меньшим содержанием алюминия. При этом наиболее обедненные алюминием слои находятся ближе к центру образца в то время как обогащенные алюминием растекаются ближе к его границам. В результате формируется макрокомпозит с достаточно сложной и неоднородной структурой, требующей проведения дополнительных постобработок или управляющих воздействий при печати для гомогенизации структуры и упрочнения материала. По границам крупных интерметаллидных слоёв возможно образование крупных трещин, что не проявляется при образовании плавных границ. При этом, даже такой композит обладает достаточно высокими механическими свойствами (предел прочности до 700 МПа), по которым он намного превосходит чистую медь (предел прочности до 200 МПа после печати), что позволяет его использовать, например, для упрочнения поверхностных слоёв медных изделий.

При получении композитов на основе меди и нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т происходит образование близких неоднородностей структуры, особенно при введении стали в количестве 50% от объема образца. Несмотря на достаточно близкие значения плотности компонентов дополнительные отличия в температуре плавления приводят к образованию слоистой структуры, в которой сталь оседает на дно ванны расплава (рисунок 6) по причине её относительного недогрева в сравнении с медью при печати. При этом, даже оптимальное для получения достаточно однородной структуры содержание стали в медной матрице (25 %) приводит к формированию неоднородностей структуры с наличием крупных частиц стали (рисунок 7, а). Одним из способов повышения гомогенности структуры в таком случае может являться помимо введения управляющих воздействий при печати проведение постобработок. Наиболее выгодным процессом для этого является фрикционная перемешивающая обработка, широко применяемая для получения композиционных материалов с введением порошков металлов, сплавов, керамик, гибридных смесей порошков и др. Совмещение аддитивного получения изделий и фрикционной перемешивающей обработки перспективно с точки зрения получения деталей сложной формы с управляемой структурой с введением упрочняющих компонентов в нужных участках детали и дополнительным упрочнением поверхности с одновременной гомогенизацией структуры (рисунок 7, b,c). В проведенных исследованиях микротвердость возрастала до 2-х кратного размера, а коэффициент трения при испытаниях по схеме «диск-палец» снижался на величину до 27 %. При этом неоднородности в распределении частиц стали также сохраняются, хотя их размер снижается в 10 и более раз по сравнению с необработанным материалом.

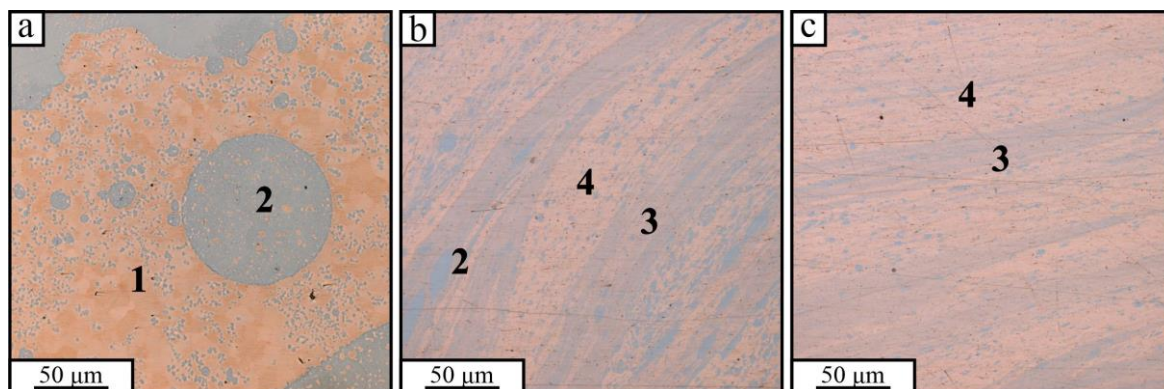


Рисунок 7 - Структура композиционного материала на основе меди М1 и стали 12Х18Н9Т (25 %) после печати (а) и после фрикционной перемешивающей обработки (b,c): 1 - медная матрица; 2 - крупные частицы стали. № 3 - слои обогащенные сталью; 4 - слои обедненные сталью

Заключение

В приведенных результатах экспериментальных работ можно выделить положительно влияющие на формирование композитов факторы:

1. Близкие значения температуры плавления компонентов;
2. Небольшие отличия в плотности исходных составляющих;
3. Оптимальное содержание компонентов в материале;
4. Оптимизация параметров пучка и геометрии ввода филаментов в ванну расплава;
5. Формирование плавных границ между компонентами структуры;
6. Применение постобработки для гомогенизации структуры.

При обратном соотношении вышеуказанных факторов происходит образование неоднородностей и дефектов различного структурно-масштабного уровня.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-19-00578.

Библиографический список

1. Debroy T., Wei H.L., Zuback J.S., et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties//Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 92. – P. 112-224.
2. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in additive manufacturing on new materials: A review // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – Vol. 35 (2). – P. 242-269.
3. Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Чумаевский А.В. и др. Научные подходы к микро-, мезо- и макроструктурному дизайну объемных металлических и полиметаллических материалов с использованием метода электронно-лучевого аддитивного производства/ Физическая мезомеханика. – 2022. – V. 25. – № 4. – pp. 5–18.
4. Wang J., Pan Z., Ma Y., Lu Y., Shen C., Cuiuri D., Li H. Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: Microstructure, mechanical properties and oxidation behav-

Journal of Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 734. – P. 110-119.

5. Osipovich, K.S., Chumaevskii, A.V., Eliseev, A.A., Kalashnikov, K.N., Kolubaev, E.A., Rubtsov, V.E., Astafurova, E.G. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62 (8). – P. 1486-1494.

6. Filippov A., Utyaganova V., Shamarin N., Vorontsov A., Savchenko N., Gurianov D., Chumaevskii A., Rubtsov V., Kolubaev E., Tarasov S. Microstructure and corrosion resistance of aa4047/aa7075 transition zone formed using electron beam wire-feed additive manufacturing // Materials. – 2020. – V. 14(22). – № 6931.

7. Moskvina V.A., Melnikov E.V., Panchenko M.Y., Maier G.G., Reunova K.A., Astafurov S.V., Kolubaev E.A., Astafurova E.G. Stabilization of austenitic structure in transition zone of “austenitic stainless steel/NiCr alloy” joint fabricated by wire-feed electron beam melting. Materials Letters. – 2020. – V. 277. – P. 128321.

8. Filippov A.V., Khoroshko E.S., Shamarin N.N., Savchenko N.L., Moskvichev E.N., Utyaganova V.R., Kolubaev E.A., Smolin A.Y., Tarasov S.Y. Characterization of gradient CuAl–B4C composites additively manufactured using a combination of wire-feed and powder-bed electron beam deposition methods. Journal of Alloys and Compounds. – 2021. – V. 859. – P. 157824.

9. Feenstra D.R., Banerjee R., Fraser H.L., Huang A., Molotnikov A., Birbilis N. Current Opinion in Solid State & Materials Science Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition. Current Opinion in Solid State & Materials Science. – 2021. – V. 25(4). – pp. 100924.

10. Shu, X., Chen, G., Liu, J., Zhang, B., & Feng, J. (2018). Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication. Materials Letters, 213, 374–377.

УДК 621.941.025.7

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ И РАДИУСА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МИКРОСТРУКТУРУ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

Дживишов В.Ф., Рзаев Э.Д.

*Азербайджанский Технический Университет,
г. Баку, Азербайджан, ejivishov@yahoo.com, elchin_rzayev@aztu.edu.az*

Аннотация. В статье рассмотрено влияния глубины резания и радиуса режущей кромки инструмента на образование остаточных напряжений и микроструктуру периферийной зоны после обработки образцов из закаленной стали 100Cr6 с твердостью по Виккерсу около 800 HV. Также проведен рентгенографический анализ напряжений в деталях после обработки с помощью двухконтурного рентгеновского дифрактометра MZ IV фирмы Зайферта.

Ключевые слова: остаточные напряжения, глубина резания, радиус режущей кромки.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DEPTH OF CUT AND THE RADIUS OF THE CUTTING EDGE OF THE TOOL ON THE FORMATION OF RESIDUAL STRESSES AND THE MICROSTRUCTURE OF THE SURFACE ZONE IN HARD TURNING

Jivishov V.F., Rzayev E.D

Azerbaijan Technical University

Baku, Azerbaijan , ejivishov@yahoo.com, elchin_rzayev@aztu.edu.az

Abstract. *The article considers the influence of the depth of cut and the radius of the cutting edge of the tool on the formation of residual stresses and the microstructure of the surface zone after processing samples of hardened steel 100Cr6 with a Vickers hardness of about 800 HV. An X-ray diffraction analysis of the stresses in the parts after processing using a two-loop X-ray diffractometer MZ IV from Seifert was also carried out.*

Keywords: *residual stresses, depth of cut, cutting edge radius, surface zone.*

Введение

Как известно после обработки материалов резанием на периферийной зоне обрабатываемой детали образуются остаточные напряжения. Проведено много исследований по определению влияния различных параметров резания на образование остаточных напряжений. Но недостаточно рассмотрен вопрос влияния радиуса закругления режущей кромки на периферийную зону [1]. Так как при обработке, закаленной стали влияние радиуса закругления режущей кромки выражено значительно сильнее, чем при обработке незакаленной стали, в данной статье рассмотрено влияния глубины резания и радиуса режущей кромки инструмента на образование остаточных напряжений и микроструктуру периферийной зоны после обработки образцов из закаленной стали 100Cr6.

Материалы и геометрия образцов

Исследования проводились на образцах из закаленной стали 100Cr6 с твердостью по Виккерсу около 800 HV. Эта подшипниковая сталь (1.3505) которая хорошо подходит для исследований благодаря равномерному профилю твердости. Твердость материала и структуру 100Cr6 после закалки можно увидеть на рисунке 1.

Поскольку термическая обработка также зависит от геометрии образцов, были использованы предварительные испытания, чтобы определить, должны ли образцы быть подготовлены до или после термической обработки. Результаты показывают, что предварительная обработка образцов до термообработки полезна для равномерного изменения глубины твердости и состояния структуры. Все образцы подвергались термообработке в одной партии. Измеренная твердость образцов после термической обработки нахо-

дится около 800 HV 0,1 (HRC 63-65) и равномерно распределена по всему сечению гребней.

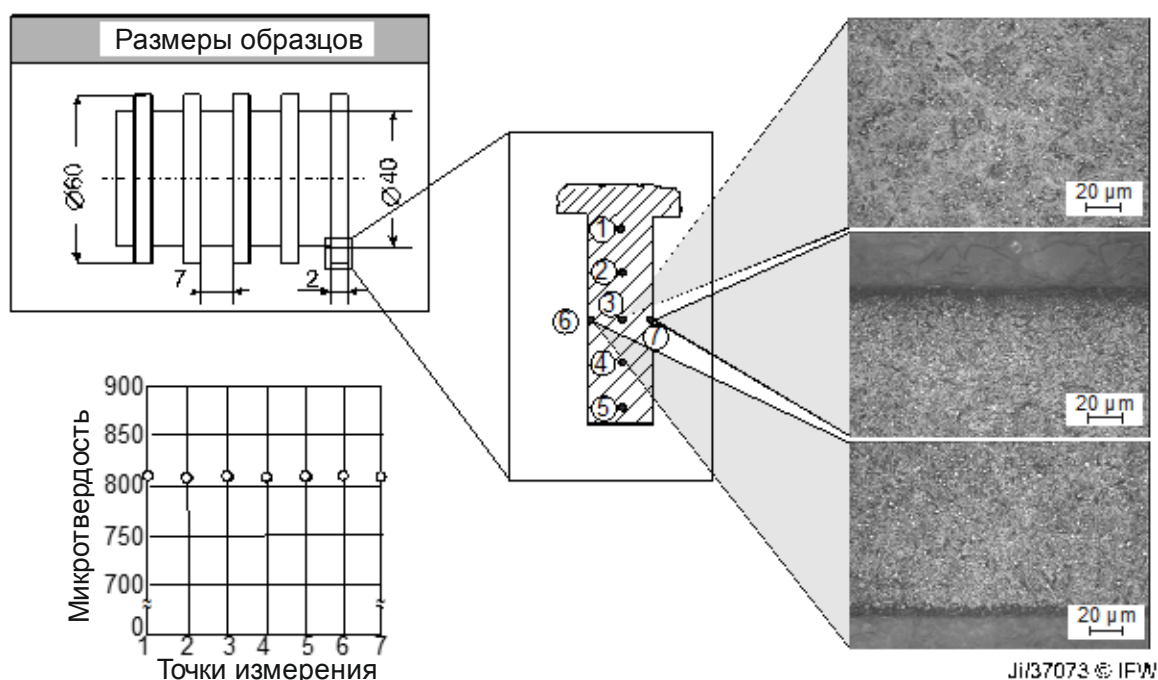


Рисунок 1 - Тестовый материал 100Cr6

Состав материала для 100Cr6 показан в таблице 1.

Таблица 1 - Состав материала 100Cr6

C	Si	Mn	P	S	Cr
1 %	0,23 %	0,35 %	max 0,025 %	max 0,025 %	1,45 %

Заготовку, снабженную гребнями, обрабатывают одновременно двумя инструментами. Первый инструмент (WSP 1) создает периферийную зону, далее исследуемую, а второй инструмент (WSP 2) разрезает трубу. Этот метод позволяет «заморозить» периферийную зону компонента для дальнейшего анализа. Благодаря высоким значениям твердости этот метод хорошо зарекомендовал себя для закаленной стали 100Cr6.

Используемые станки, инструменты и режущие материалы

Исследования проводились на станке с ЧПУ с наклонной станиной типа MD10S фирмы Max Müller. Станок имеет мощность привода $P_{A \max} = 50$ кВт и максимальную скорость $n_{\max} = 10\,000$ об/мин.

При обработке твердых материалов обычно используются инструменты из РКВ. По этой причине для закаленной стали 100Cr6 выбраны четыре инструмента из РКВ с разным радиусом режущей кромки ($r_{\beta} = 0,008; 0,02; 0,06; 0,12$ мм). Из-за высокой твердости материала и свойств режущего материала выбран максимальный радиус режущей кромки 0,12 мм. На рис. 3 показаны геометрия и измеренные значения выбранных закруглений режущей кромки для инструментов РКВ.

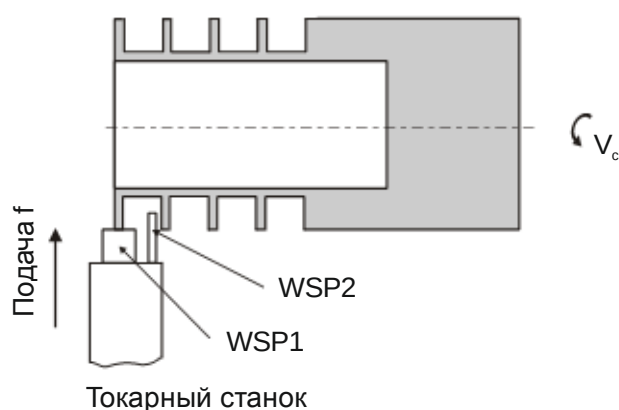
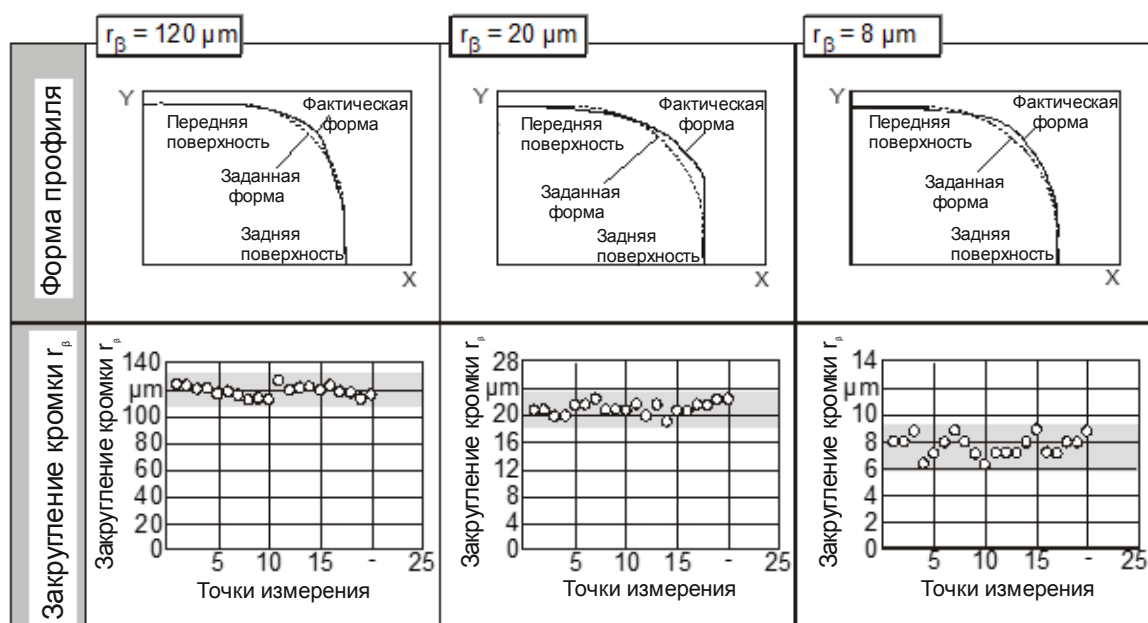


Рисунок 2 - Подготовка образца для анализа периферийной зоны во время ортогонального резания стали 100Cr6

Радиус передних кромок измеряется с помощью аппарата Perthometer Concept (производитель компания Mahr). Используется зонд с алмазным наконечником. Для измерения режущая кромка выравнивается по призме, а закругление кромки регистрируется с помощью щупа (рисунок 4).

Анализ результатов измерений показывает, что имеют место отклонения как размеров, так и формы. Эти неизбежные отклонения необходимо учитывать при интерпретации результатов испытаний на механическую обработку. Хотя, согласно новым данным, геометрию режущей кромки можно более точно описать с помощью других параметров, таких как S_α , S_γ , K и Δr (рисунок 4) [2], эти параметры в дальнейших исследованиях не рассматриваются, так как они усложняют определение влияния радиуса режущей кромки на результаты обработки.



Ji137074 © IГW

Рисунок 3 - Измерение радиуса режущих кромок инструментов РКВ

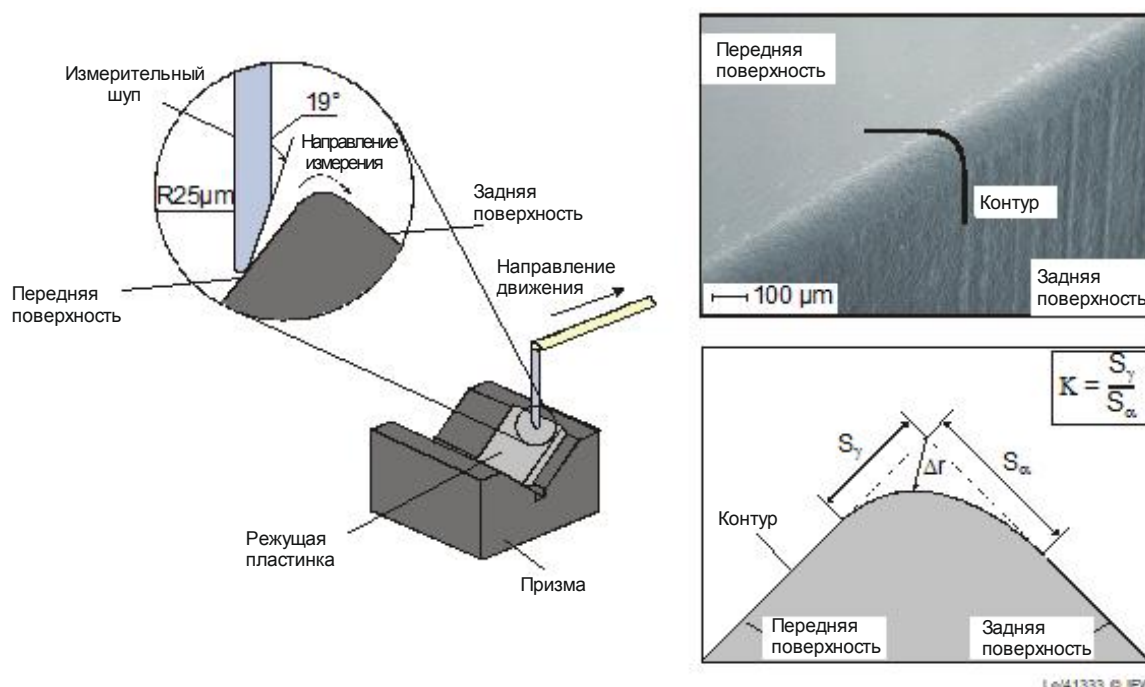


Рисунок 4 - Измерение геометрии режущей кромки

Рентгенографический анализ напряжений выполняется с помощью двухконтурного рентгеновского дифрактометра MZ IV фирмы Зайферта, который имеет большую камеру для образцов, так что измерения поверхности компонентов могут быть выполнены неразрушающим образом.

Установка для измерения напряжения имеет автоматический блок вращения и перемещения образца, а также компьютеризированный блок оценки. В качестве типа излучения используется хромированное излучение $\text{Cr-K}\alpha$ (35 кВт, 35 мА), средняя глубина проникновения которого в сталь составляет от $\tau \approx 5$ мкм.

Это означает, что значение измерения является интегральным значением периферийного слоя. Контрольный угол для измерения остаточных напряжений на мартенситной фазе составляет $2\theta_0 = 156,07^\circ$ (плоскость сетки 211). Дифрактометр работает по принципу фокусировки Брэгга-Брентано. При таком расположении выходной зазор первичного излучения и входной зазор детектора находятся на одной фокусирующей цепи. Исследуемый образец находится в центре круга и установлен с возможностью вращения. Дифрагированные рентгеновские лучи регистрируются позиционно-чувствительным детектором (OED) типа Braun PSD 50M. Способом определения остаточного напряжения является метод $\sin^2\psi$. Повторные измерения одной и той же точки дают максимальное отклонение ± 15 МПа для 10 измерений. Измерения остаточных напряжений выполняются параллельно направлению резания.

Влияние глубины резания на периферийную зону детали

Результаты экспериментов показывают (рисунок 5), что в случае закаленной стали 100Cr6 при изменении глубины резания в основном возникают остаточные напряжения сжатия. Поскольку закаленная сталь 100Cr6 менее деформируемая, термические напряжения в приповерхностной зоне ниже.

Кроме того, механическое напряжение в краевой зоне детали является причиной возникновения остаточных напряжений сжатия из-за более высоких технологических сил, вызванных высокой твердостью материала.

Взаимосвязь между механическим напряжением в зоне поверхности и возникающими остаточными напряжениями при твердой обработке уже была продемонстрирована в более ранних исследованиях [3].

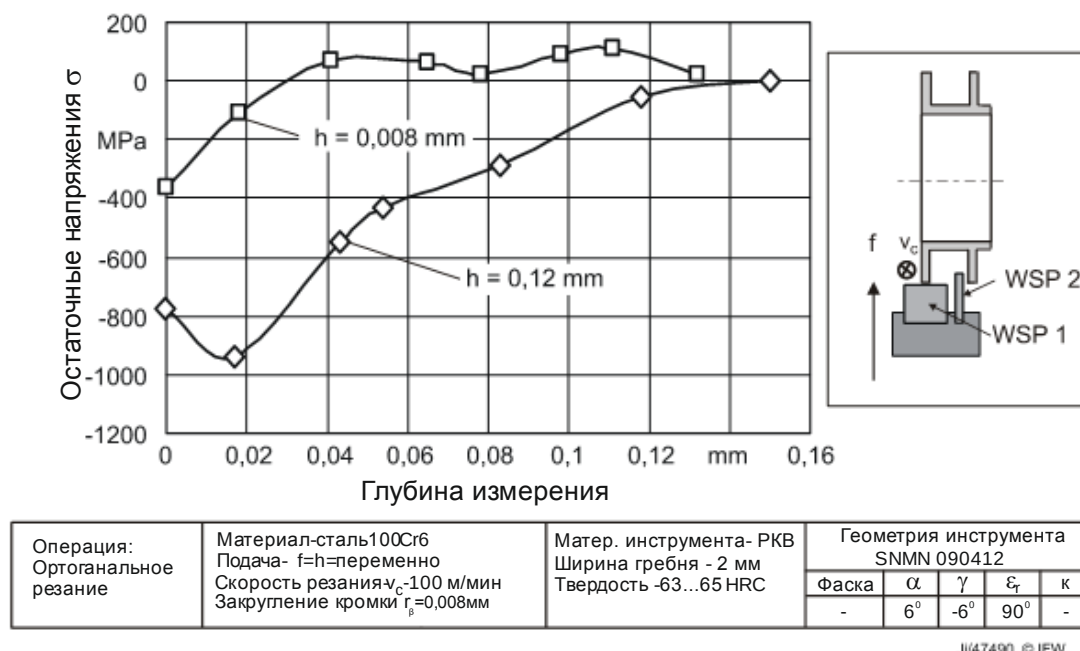


Рисунок 5 - Влияние глубины резания на кривые остаточного напряжения для стали 100Cr6

Остаточные напряжения увеличиваются с увеличением глубины резания. Максимальное напряжение сжатия при глубине резания $h = 0,008$ мм составляет около 400 МПа. При большей глубине резания $h = 0,12$ мм и, соответственно, более высоких механических нагрузках максимальное остаточное сжимающее напряжение увеличивается и составляет около 950 МПа, при этом с увеличением глубины резания поверхностные остаточные напряжения смещаются в область растяжения. Это показывает, что увеличение глубины резания вызывает не только высокое механическое напряжение, но и термическое напряжение.

На рисунке 6 показаны результаты микрофотографий закаленного сплава 100Cr6. Как видно из рисунка 6, при глубине резания $h = 0,12$ мм на поверхности детали имеется тонкий слой белого цвета, в то время как при глубине резания $h = 0,008$ мм структура практически не изменяется. Образование белого слоя обусловлено термическим воздействием на деталь. Микроструктура с белым слоем также доказывает, что с увеличением толщины стружки в дополнение к высокому механическому напряжению возникает термическое напряжение.

В литературе указывается, что на поверхности белых слоев преобладают остаточные растягивающие напряжения [4]. Шмидт, с другой стороны, продемонстрировал, что при наличии белых слоев не обязательно измерять остаточные напряжения при растяжении на поверхности детали [5]. Кроме

того, рассматривается еще одна возможность, которая может способствовать образованию белого слоя. Используемый здесь режущий материал имеет относительно более низкую теплопроводность – около 39 Вт/мК. Более низкая теплопроводность приводит к меньшему отводу тепла из зоны резания, что способствует образованию термически обусловленных белых слоев.

Влияние закругления режущей кромки на периферийную зону детали

Результаты экспериментов показали, что при обработке стали 100Cr6 с различным радиусом закругления режущей кромки возникают остаточные напряжения сжатия (рисунок 7). Остаточные напряжения сжатия на поверхности заготовки относительно невелики. С другой стороны, ниже поверхности развивается ярко выраженный градиент напряжения. Как максимальные напряжения, так и глубина максимальных напряжений различаются в зависимости от радиуса закругления режущей кромки.

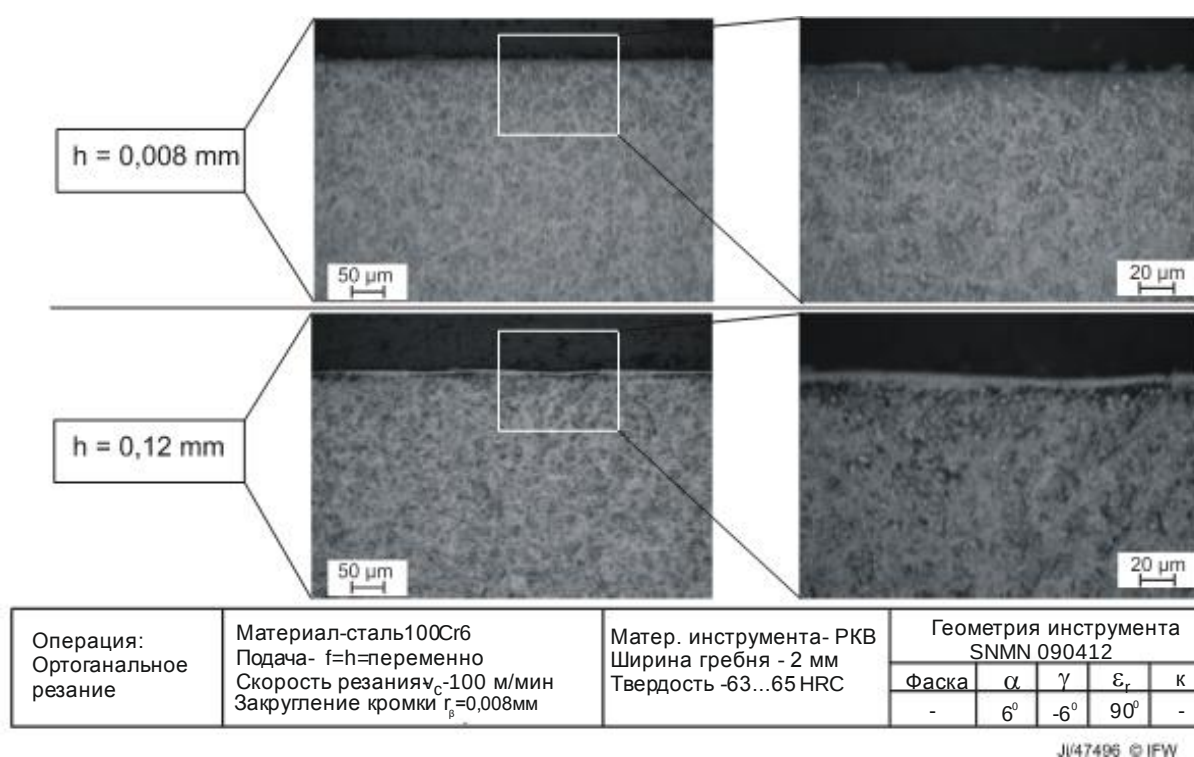


Рисунок 6 - Влияние глубины резания на структуру периферийной зоны детали из стали 100Cr6

Максимальное значение остаточных напряжений при $r_\beta = 0,06$ мм составляет около 1200 МПа на глубине 50 мкм. С другой стороны, максимальное напряжение при радиусе закругления режущей кромки $r_\beta = 0,008$ мм составляет около 950 МПа и на глубине около 20 мкм. Большее значение радиуса закругления режущей кромки в процессе вызывает высокие механические сжимающие нагрузки, которые вызывают как увеличение максимального значения остаточных напряжений, так и увеличение глубины максимального напряжения.

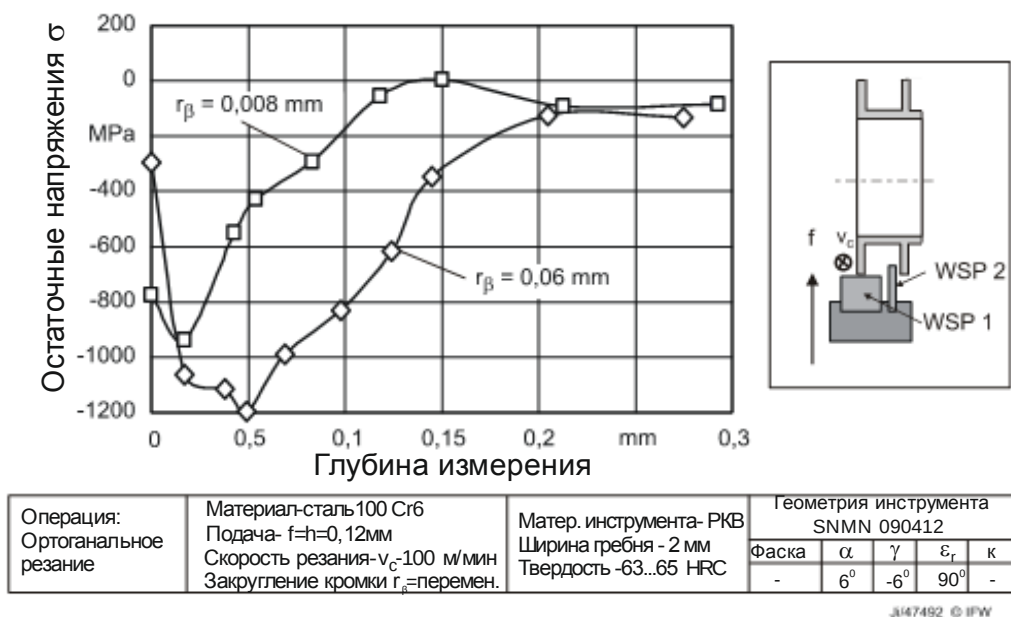


Рисунок 7 - Влияние радиуса режущей кромки на кривые глубины распределения остаточного напряжения для стали 100Cr6

Если посмотреть на остаточные напряжения на поверхности детали из стали 100Cr6, то можно увидеть их зависимость от радиуса режущих кромок. С увеличением радиуса режущей кромки остаточные поверхностные напряжения смещаются в область растяжения. Причина этого в том, что больший радиус режущей кромки вызывает не только высокие механические нагрузки от давления, но и большую зону деформации перед режущей кромкой и большую зону трения на режущей кромке. Увеличение зоны деформации и трения приводит к повышению температуры процесса, что приводит к смещению остаточных напряжений в область растяжения.

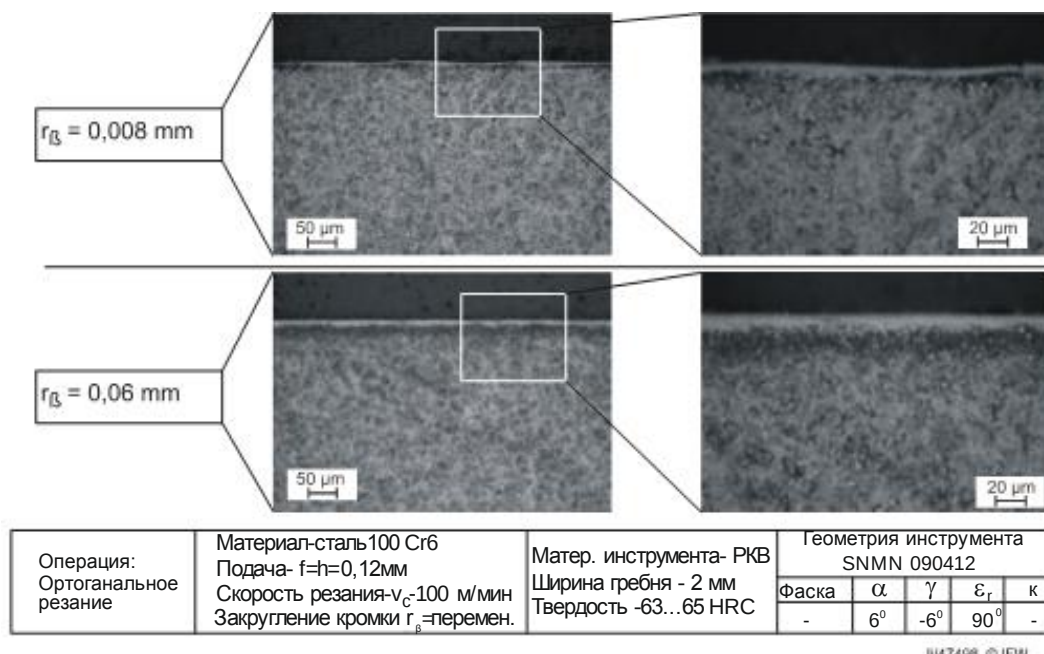


Рисунок 8 - Влияние радиуса режущей кромки на структуру периферийной зоны для 100Cr6

Снимки структуры, представленные на рисунке 8, показывают, что при увеличении радиуса режущей кромки в закаленной стали 100Cr6 присутствует влияние на периферийную зону детали. Хотя белый слой также развивается с меньшим радиусом режущей кромки, площадь поражения значительно меньше. При этом на белый слой в большей степени влияет более высокая глубина резания h , чем на радиус режущей кромки. Белый слой значительно увеличивается с увеличением закругления режущей кромки. В дополнение к новой зоне закалки или белому слою толщиной примерно 10 мкм также можно увидеть зону отпуска.

Выводы:

1. Результаты экспериментов показывают, что в случае закаленной стали 100Cr6 при изменении глубины резания в основном возникают остаточные напряжения сжатия. Поскольку закаленная сталь 100Cr6 менее деформируемая, термические напряжения в приповерхностной зоне ниже. Кроме того, механическое напряжение в краевой зоне детали является причиной возникновения остаточных напряжений сжатия из-за более высоких технологических сил, вызванных высокой твердостью материала.

2. Результаты экспериментов показали, что при обработке стали 100Cr6 с различным радиусом закругления режущей кромки возникают остаточные напряжения сжатия. Остаточные напряжения сжатия на поверхности заготовки относительно невелики. С другой стороны, ниже поверхности развивается ярко выраженный градиент напряжения. Как максимальные напряжения, так и глубина максимальных напряжений различаются в зависимости от радиуса закругления режущей кромки.

Библиографический список

1. Jivishov, V.: Mikrogeometrische Einflüsse beim Weich- und Hartspanen. Dissertation IFW Universität Hannover, Hannover, 2008.
2. Denkena, B., Becker, J.C., de León García, L.: Study of the influence of the Cutting Edge Microgeometry on the Cutting Forces and Wear Behavior in Turning Operations. 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, 2005, pp: 503-508.
3. Wobker, H.-G.: Hartbearbeitung. Habilitation Universität Hannover, 1997.
4. Brandt, D.: Randzonenbeeinflussung beim Hartdrehen. Dr.-Ing. Diss. Universität Hannover, 1995.
5. Schmidt, J.: Mechanische und thermische Wirkungen beim Drehen gehärteter Stähle. Dr.-Ing. Diss. Universität Hannover, 1999.

МИКРОСТРУКТУРА КЕРАМИКИ B_4C-CrB_2 , СИНТЕЗИРОВАННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА

Дик Д.В.¹, Гудыма Т.С.¹, Филлипов А.А.², Крутский Ю.Л.¹

¹Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, Россия, dickdmit@yandex.ru

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия, filippov@itam.nsc.ru

Аннотация. Керамика на основе карбида бора является перспективной для ряда промышленных применений. Использование модифицирующей добавки из диборида хрома позволяет улучшить эксплуатационные характеристики такой керамики. Сырьем для ее изготовления может являться порошковая композиционная смесь карбид бора-диборид хрома, полученная карбидоборным методом. Для исследования структурных свойств такой керамики, синтезированной СВС одновременно с горячим прессованием, было проведено данное исследование.

Ключевые слова: карбид бора, диборид хрома, композиционные материалы, горячее прессование, микроструктура.

MICROSTRUCTURE OF B_4C-CrB_2 CERAMICS SYNTHESIZED USING NANOFIBER CARBON

Dik D.V.¹, Gudyma T.S.¹, Phillipov A.A.², Krutsky Y.L.¹

¹Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia, dickdmit@yandex.ru

²S.A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,
Novosibirsk, Russia, filippov@itam.nsc.ru

Abstract. Ceramics based on boron carbide are promising for a number of industrial applications. The use of a modifying additive made of chromium diboride makes it possible to improve the performance characteristics of such ceramics. The raw material for its manufacture can be a powder composite mixture of boron carbide-chromium diboride obtained by the carbide-boron method. To study the structural properties of such ceramics synthesized by SHS simultaneously with hot pressing, this study was conducted.

Keywords: boron carbide, chromium diboride, composite materials, hot pressing, microstructure.

Сочетание высокой температуры плавления, высокой прочности и твердости, износостойкости, жаростойкости и химической инертности делает керамику на основе карбида бора привлекательным материалом для

многочисленных применений [1]. Композиционные материалы на основе карбида бора с содержанием боридов металлов IV-VI групп таблицы Менделеева обладают хорошими механическими свойствами и являются весьма перспективными материалами в ряде областей современной техники. Известно, что даже незначительная растворимость металлов в карбиде бора существенно повышает микротвердость соединения [2], а равномерно распределенная вторая фаза (в виде борида металла) препятствует росту зерен. Возможны следующие способы изготовления композиционных порошков, используемых для приготовления керамики B_4C-CrB_2 : а) смешивание карбида бора и диборида хрома [3]; б) смешивание бора, углерода и хрома [4]. Особенностью процессов а) и б) является необходимость тщательного смешения шихтовых материалов перед спеканием. При карбидоборном восстановлении оксида хрома при избытке карбида бора эта необходимость отпадает, поскольку образовавшиеся частицы его диборида хрома явно будут равномерно распределены в матрице карбида бора.

Получать керамику B_4C-CrB_2 можно следующими способами: а) горячее прессование порошков, полученных карбидоборным восстановлением с использованием нановолокнистого углерода; б) горячее прессование одновременно с реакцией карбидоборного восстановления. Свойства керамики, изготовленной такими способами, в литературе не описаны. Так же не изучены различия свойств керамики, полученной по методу а), и керамики, полученной по методу б).

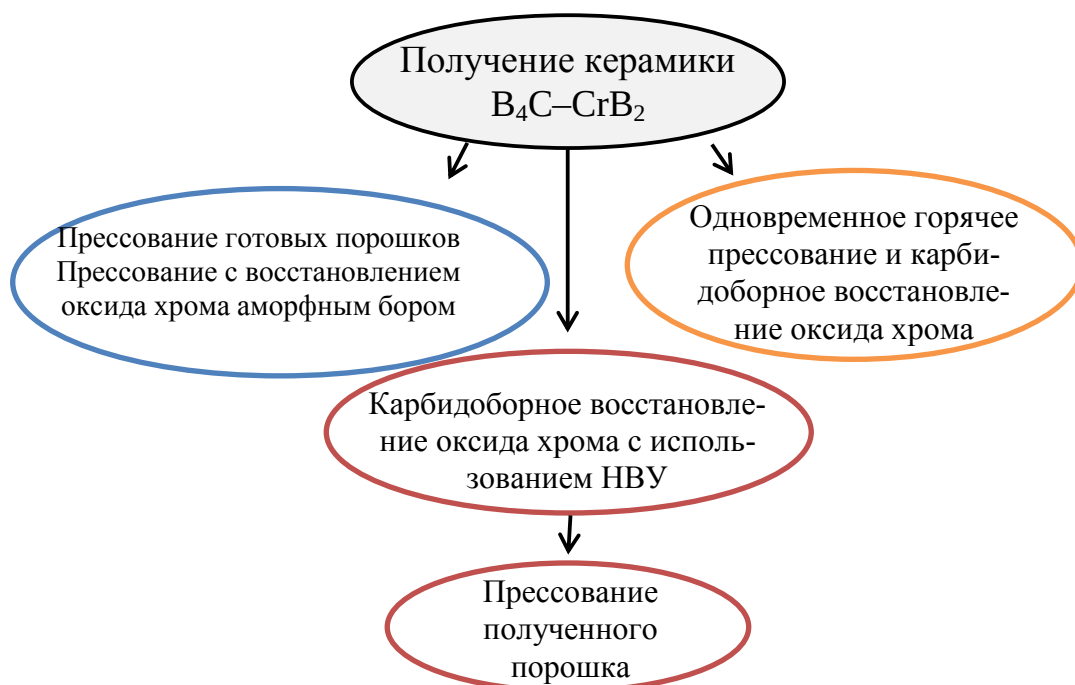
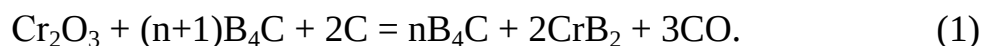


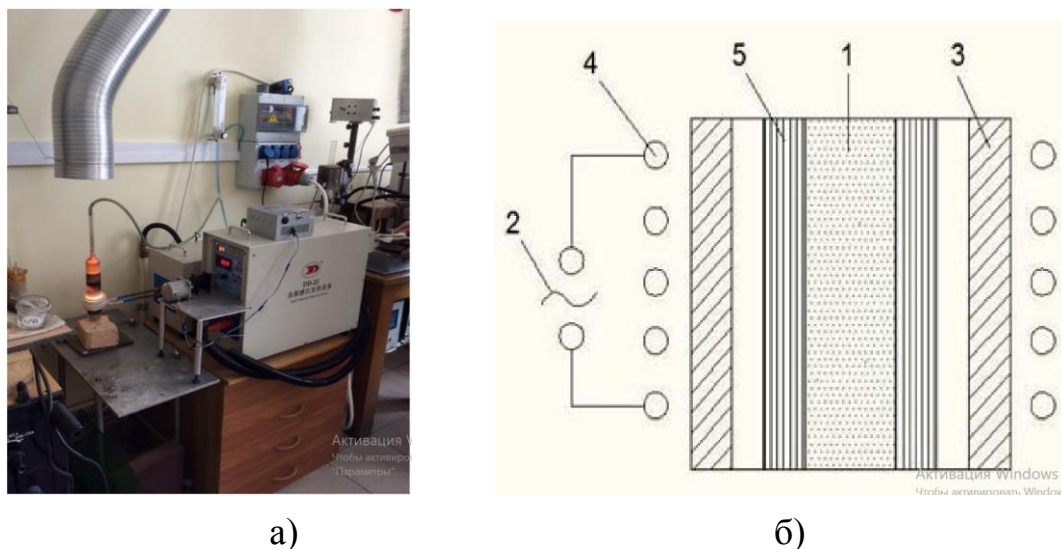
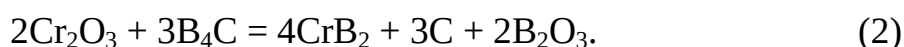
Рисунок 1 - Схема способов получения керамики B_4C-CrB

Целью работы является изучение свойств композиционной керамики B_4C-CrB_2 , синтезированной с использованием нановолокнистого углерода.

Для исследования были выбраны шихты разного состава (0-70 мол.%) для получения композиционного порошка при осуществлении реакции



Высокотемпературный синтез порошков для способа получения а) проводился в индукционной печи тигельного типа ВЧ–25АВ (рис. 1) в среде аргона для предотвращения нежелательного азотирования карбида бора и образующегося диборида хрома. Давление в реакторе было сопоставимо с атмосферным. Расчеты показали [5], что при избытке карбида бора по сравнению со стехиометрическим для реакции (1), оксид хрома уже при относительно невысоких температурах (до 1200 К) может полностью переходить в диборид с одновременным образованием оксида бора по реакции:



а) 1- нагреваемое тело (шихта), 2 - источник питания, 3 - кварцевый реактор, 4 - индуктор, 5 - промежуточное нагреваемое тело (тигель)

Рисунок 2 - а) Общее изображение печи; б) схема устройства индуктора с химическим реактором

Навески для шихты рассчитывались исходя из стехиометрических коэффициентов. Для приготовления реакционных смесей использовали просушенные в вакууме при температуре 100 °С порошки оксида хрома, карбида бора и углерода (НВУ с удельной поверхностью 150 000 м²/кг). Порошки перемешивали и дробили в шаровой мельнице (Активатор-2S, Россия) при нагрузке 20g 5 минут. Далее смесь просеивали через сито 100 мкм.

На рисунке 3 приведены снимки растровой электронной микроскопии (РЭМ) образцов порошковых материалов, синтезированных при разном составе шихты. Исследование микроструктуры осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе EVO MA 15 (Zeiss, Германия) в режиме обратно-рассеянных электронов. Рентгеновский энергодисперсионный анализ проводился с помощью анализатора X-Max 80 (Oxford Instruments, Велико-

британия). На снимках образцов можно наблюдать однородные агрегированные частицы, размер которых не превышает 5 мкм.

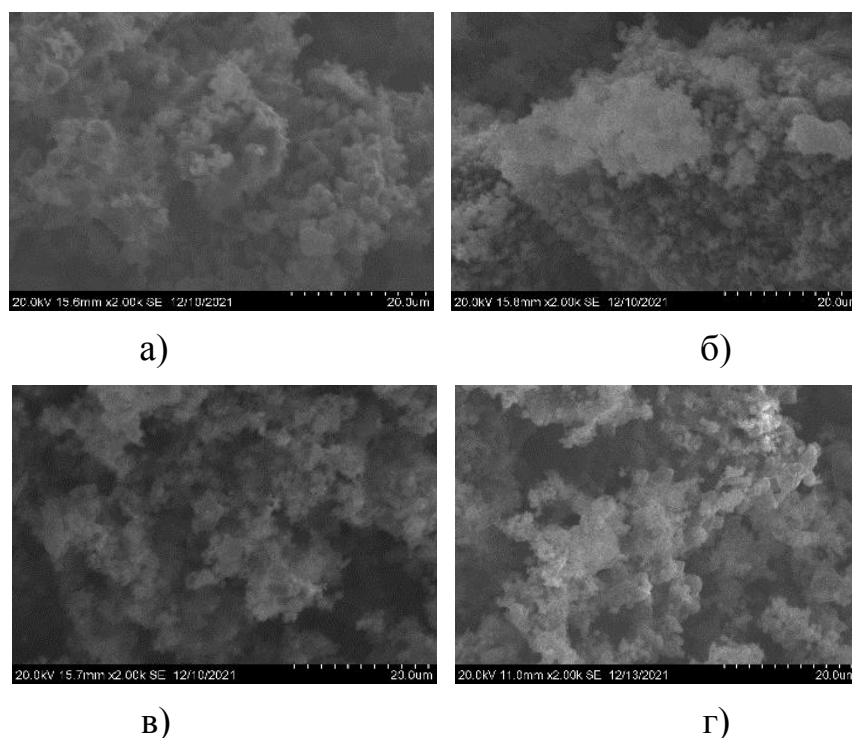


Рисунок 3 - Снимки РЭМ порошковых материалов B_4C-CrB_2 , мол.% CrB_2 : 10 (а), 20 (б), 30 (в), 70 (г)

Для определения атомного состава образцов была проведена рентгеновская спектроскопия. Результаты представлены в таблице 1.

Шихты для изготовления керамики методом б) прессовали на компактном лабораторном горячем прессе (КТИ НП СО РАН, Россия (рисунок 4) при максимальном давлении прессования 17 МПа, максимальной температуре 2000 °С с выдержкой максимальных параметров в течение 10 минут в атмосфере аргона.

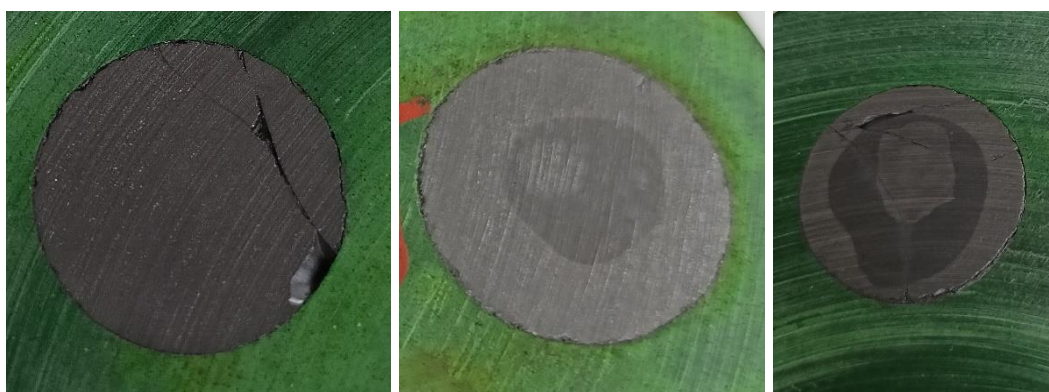
Образцы 20 и 30 мол.% CrB_2 имеют выраженную неоднородную структуру: внутри образцы серые матовые, снаружи серебряные блестящие. Образец 10 мол.% CrB_2 имеет однородную структуру (рисунок 5).

Таблица 1 - Весовой и атомный составы образцов

Элемент	Весовой %				Атомный %			
	10 мол.% CrB_2	20 мол.% CrB_2	30 мол.% CrB_2	70 мол.% CrB_2	10 мол.% CrB_2	20 мол.% CrB_2	30 мол.% CrB_2	70 мол.% CrB_2
В	68.92	67.21	62.22	48.45	74.87	74.63	71.46	61.98
С	22.86	22.17	23.57	25.92	22.35	22.16	24.36	29.85
О	1.85	1.40	1.40	2.24	1.36	1.05	1.09	1.94
Cr	6.37	8.83	12.04	23.38	1.41	2.08	3.01	6.23



Рисунок 4 - Лабораторный горячий пресс КТИ НП СО РАН



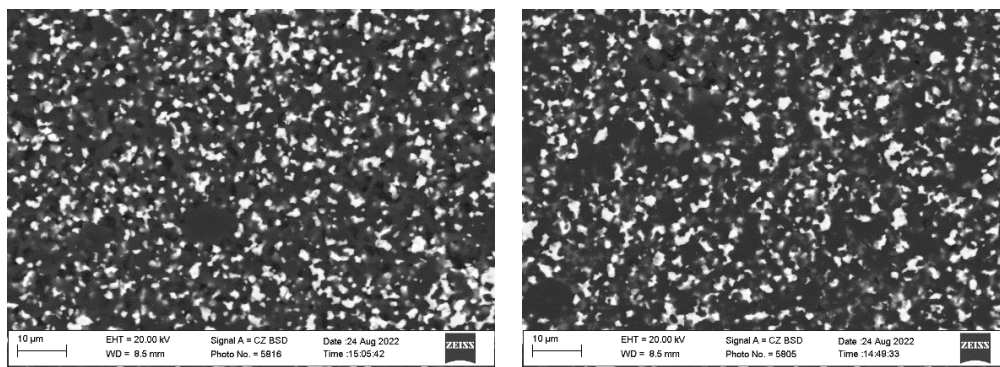
а)

б)

в)

Рисунок 5 - Внешний вид композиционных материалов B_4C-CrB_2 синтезированных для составов, мол.% CrB_2 : 10 (а), 20 (б), 30 (в)

Темная матовая область мягче, легче обрабатывается и царапается. Был проведен анализ различий микроструктуры темной и светлой частей (рисунок 6).



а)

б)

Рисунок 6 - Снимки РЭМ композиционного материала 20 мол.% CrB_2 . Темная область(а) и светлая область (б)

Отчетливо видно, что в темной области количество и размер пор больше, чем в светлой. Размер частиц CrB_2 одинаков. Такие же результаты видны и для образца 30 мол. % CrB_2 . Так же рассмотрена граница двух областей на образце 30 мол.% CrB_2 , так как его структура более информативна (рисунок 7).

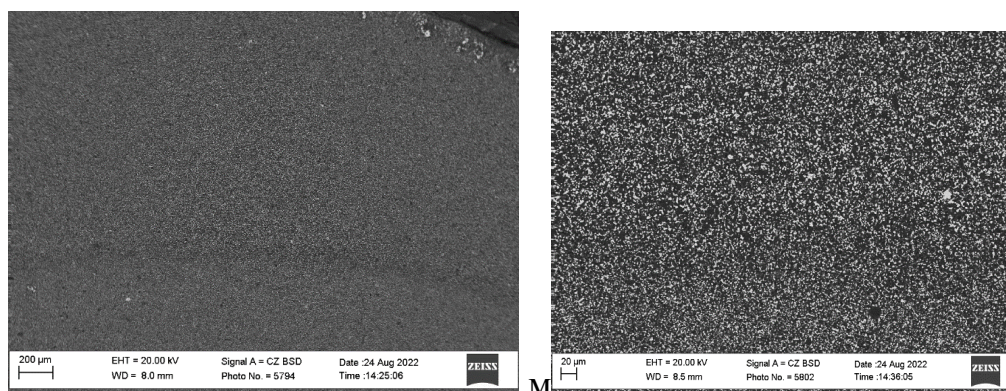


Рисунок 7 - Снимки РЭМ композиционного материала 30 мол. % CrB_2 .
Граница темной и светлой областей

Граница видна на снимке РЭМ, но интенсивность изображения не меняется, что свидетельствует о однородности фазового состава и разделении по границе за счет размера частиц CrB_2 , и разной пористости. В темной части частицы CrB_2 меньше и пористость больше. Для определения элементного состава был проведен спектральный анализ, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Весовой и атомный составы образцов, различие темной и светлой областей

Элемент	Весовой %			
	20 мол.% CrB_2 светлая	20 мол.% CrB_2 темная	30 мол.% CrB_2 светлая	30 мол.% CrB_2 темная
В	72.68	61.71	70.86	56.75
С	16.43	29.34	16.58	32.01
О	2.24	0.9	1.00	0.83
Cr	8.65	8.05	11.56	10.41

В темных областях содержание В и О меньше, а С больше. Можно предположить, что в темной области образовался избыток С, который способствовал более активному связыванию О и выделению газов реакции, что в свою очередь повышало пористость в этой области. Мягкость объясняется остатком избыточного С в темной области.

Можно сделать вывод о том, что нужная по свойствам и составу нам керамика образуется в светлой области. Дальнейшее исследование микроструктуры относится к светлым областям образцов 20 и 30 мол.% и образцу 10 мол.% CrB_2 .

На рисунке 8 приведены снимки растровой электронной микроскопии (РЭМ) образцов керамических материалов, синтезированных при разном составе шихты. На снимках образцов можно наблюдать равномерное

распределение частиц двухфазной системы во всем объеме для всех образцов. Размер агрегатов CrB_2 растет с увеличением концентрации данного соединения. Для образца 10 мол.% CrB_2 он не превышает 2 мкм, для образцов 20 и 30 мол.% CrB_2 он не превышает 3 мкм. Размер и количество пор увеличиваются с с увеличением концентрации CrB_2 , что объясняется увеличением объема выделяющихся в ходе реакции газов CO , CO_2 . Но пористость все же меньше, чем для чистой керамики B_4C , что обуславливается прохождением двухфазной системы через твердую эвтектику с частичным расплавлением и дополнительным уплотнением. Средний размер пор образцов с увеличением концентрации диборида хрома равен соответственно 1,2 и 3 мкм.

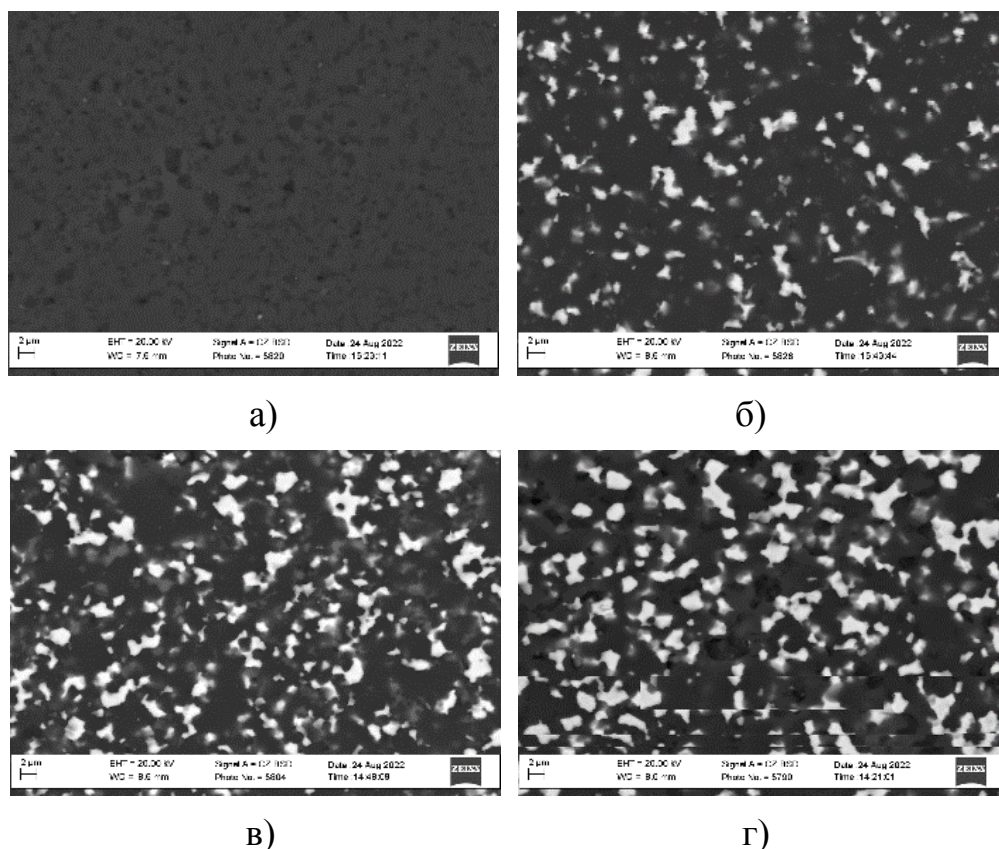


Рисунок 8 - Снимки РЭМ композиционных материалов $\text{B}_4\text{C-CrB}_2$ синтезированных для составов, мол.% CrB_2 : 0 (а), 10 (б), 20 (в), 30 (г)

Для определения атомного состава образцов была проведена рентгеновская спектроскопия. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Весовой и атомный составы образцов

Элемент	Весовой %				Атомный %			
	0 мол.% CrB_2	10 мол.% CrB_2	20 мол.% CrB_2	30 мол.% CrB_2	0 мол.% CrB_2	10 мол.% CrB_2	20 мол.% CrB_2	30 мол.% CrB_2
В	72.33	75.86	72.68	70.86	74.74	80.35	80.06	79.74
С	25.62	19.01	16.43	16.58	23.83	18.12	16.29	16.79
О	2.05	0.80	2.24	1.00	1.43	0.57	1.67	0.76
Cr	-	4.33	8.65	11.56	-	0.95	1.98	2.7

Результаты анализа содержания Сг в керамике, изготовленной методом б), наиболее близки к расчетным значениям для исследуемых составов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ (научный проект №С22-11)

Библиографический список

1. Zhang, X. // Effect of pressure on densification behavior, microstructures and mechanical properties of boron carbide ceramics fabricated by hot pressing. X. Zhang, H. Gao, Z. Shang, R. Wen, G. Wang, J. Mu, H. Che // Ceramics International. 2017. V. 43. P. 6345–6352.
2. Thévenot F. Boron carbide-A comprehensive review // Journal of the European Ceramic Society. 1990. № 4 (6). С. 205–225.
3. Yamada S., Hirao K., Yamauchi Y. and Kanzaki S. Sintering behavior of B₄C-CrB₂ ceramics. 2002. J. Mater. Sci. Lett. V. 21. P. 1445–7.
4. Suzuya Yamada, Kiyoshi Hirao, Yukihiro Yamauchi S. K. B₄C- CrB₂ composites with improved mechanical properties. 2003 . J. Eur. Ceram. Soc. V. 23. P. 561–5.
5. Krutskii Y. L. , Dyukova K.D., Kuz'min R.I., Netskina O.V., Iorkh A.E.. Synthesis of finely dispersed chromium diboride from nanofibrous carbon // Izvestiya Ferrous Metallurgy. 2018. № 10 (61). С. 800–806.

УДК 620.170: 621.791

ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛЮСА НА ОСНОВЕ ШЛАКА СИЛИКОМАРГАНЦА И ФД-УФС

Крюков Р.Е., Михно А.Р., Жуков А.В., Бендре Ю.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк Россия, rek_nzrmk@mail.ru*

***Аннотация.** Выполнен количественный анализ параметров структуры и дислокационной субструктуры металла сварных швов выполненных с использованием разработанных флюсов и флюс-добавки на основе техногенных металлургических образований Кузбасса. Оценены вклады скалярной и избыточной плотности дислокаций в прочность металла сварных швов. Исследованы структурно-фазовое состояние и поверхность разрушения металла сварных швов методами СЭМ и ПЭМ.*

***Ключевые слова:** сварочный флюс; шлак силикомарганца; микроструктура; сканирующий электронный микроскоп, просвечивающий электронный микроскоп, поверхность разрушения, фазовый состав.*

FAULT SURFACE AND STRUCTURAL-PHASE STATE OF METAL OF WELDED JOINTS MADE WITH USE OF FLUX BASED ON

SILICOMANGANESE SLAG AND PD-UFS

Kryukov R.E., Mikhno A.R., Zhukov A.V., bendre Yu.V.

Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia, rek_nzrmk@mail.ru

Abstract. *A quantitative analysis of the parameters of the structure and dislocation substructure of the metal of welds made using the developed fluxes and flux additives based on technogenic metallurgical formations of Kuzbass was carried out. The contributions of the scalar and excess dislocation density to the strength of the weld metal are estimated. The structural-phase state and fracture surface of the weld metal were studied by SEM and TEM methods.*

Keywords: *welding flux; silicomanganese slag; microstructure; scanning electron microscope, transmission electron microscope, fracture surface, phase composition.*

На данный момент в условиях нестабильной глобальной экономики, когда наше государство находится под санкциями, производство вынуждено перейти на новый уровень, чтобы обеспечить экономическую независимость от других государств.

В настоящее время ситуация в сварочном производстве в России весьма противоречива. В условиях санкции большинство сварочных предприятий пользуются либо услугами параллельного импорта либо услугами производителей сварочных материалов находящиеся на территории Российской Федерации [1,2]. Использование сварочных материалов поставляемых параллельным импортом приводит к удорожанию производства металлических сварных конструкции, что в свою очередь подталкивает разработчиков сварочных материалов наладить выпуск собственно разработанных сварочных материалов [3-5].

В условиях НПЦ «Сварочные процессы и технологии» ФГБОУ ВО «СибГИУ» разрабатывается широкий спектр сварочных материалов изготавливаемых, в том числе из техногенных образований [6-9], одним из таких материалов является флюс - добавка на основе отходов пыли газоочистки алюминиевого производства (углеродфторсодержащий материал) .

Использование углеродфторсодержащих материалов во флюсах открыло новые технологические возможности в повышении качества макроструктуры стальных сварных соединений по содержанию неметаллических включений и газовых пор [10-12]. Однако недостаток данных о структурно-фазовых состояниях, дислокационной субструктуре и морфологии поверхностей разрушения сварных швов, полученных с использованием новых флюсов из шлака силикомарганца и углеродфторсодержащей добавки (ФД-УФС), сдерживает прогресс этого перспективного направления.

Сварку под флюсом, на основе шлака производства силикомарганца с применением ФД-УФС в количестве 6 % (образец 1) и без нее (образец 2) производили встык без скоса кромок с двух сторон на образцах размером

500×75 мм толщиной 16 мм из листовой стали марки 09Г2С. Процесс проводили проволокой Св-08ГА с использованием сварочной установки АСАW-1250 при режимах: $I_{св} = 700$ А; $U_d = 30$ В; $V_{св} = 35$ м/ч.

Исследования структуры поверхности разрушения и поверхности травления металла сварного шва анализировали методами сканирующей электронной микроскопии. Травление поверхности образцов осуществляли путем облучения импульсным электронным пучком на установке «СОЛО» [13]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 10 Дж/см², длительность импульса воздействия пучка электронов 50 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, облучение проводили в среде остаточного инертного газа (аргон) при давлении 0,02 Па. Исследование морфологии фаз, дефектной субструктуры и фазового состава металла сварного шва осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии.

Исследование химического состава полученных образцов (таблица 1) показывает, что образцы сварного шва отличаются по степени легирования, а именно, суммарная концентрация легирующих элементов (С, Si, Mn, Cr, Ni, Cu, Nb, Al) в образце с добавкой ФД-УФС составляла 2,413 вес.%; в образце без нее – 1,487 вес.%. При этом основное отличие в элементном составе металла шва исследуемых образцов наблюдается по концентрации марганца и углерода.

Таблица 1 – Химический состав металла сварного шва (ост. Fe, вес. %)

Образец	Массовая доля элементов, %									
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Nb	Al	S	P
1	0,12	0,66	1,43	0,02	0,06	0,10	0,011	0,012	0,027	0,008
2	0,09	0,71	0,51	0,03	0,10	0,11	0,014	0,023	0,018	0,012

Следующей отличительной особенностью изломов данных сварных швов, является наличие неметаллических включений, характерных преимущественно для сварного шва №2 - без добавки (рисунок 1). Размеры неметаллических включений изменяются в пределах от 10 мкм до 15 мкм. Следует ожидать, что присутствие в сварном шве таких включений будет способствовать его охрупчиванию. Таким образом, анализ структуры поверхности разрушения позволяет говорить о том, что сварной шов образца №2 (без добавки), содержащий сравнительно большое количество неметаллических включений, может быть более хрупким по сравнению со сварным швом образца №1 (с добавкой ФД-УФС).

Фазовый состав и дефектную субструктуру металла сварного шва изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии [14]. Установлено, что основной фазой исследуемых сварных швов, независимо от введения добавки, является твердый раствор на основе α -железа (феррит, ОЦК кристаллическая решетка, α -фаза). Кроме α -железа в сварном шве присутствуют частицы карбида железа (цементит) и, преимущественно

в образце №2 (без добавки), силицида железа состава Fe_3Si (ОЦК кристаллическая решетка, $a = 0.28277 \text{ нм}$).

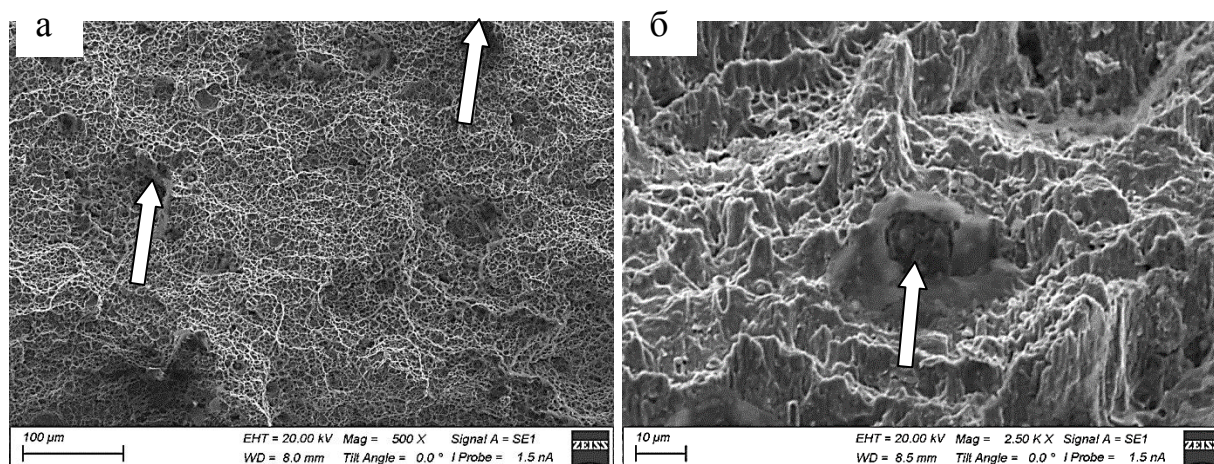


Рисунок 1 - Поверхность вязкого излома металла сварного шва образца №2. Стрелками указаны неметаллические включения.

На рисунке 2 представлены области с фрагментированной дислокационной субструктурой. Средний размер фрагментов в образце №1 составляет 450 нм, в образце №2 – 550 нм. В объеме фрагментов присутствует дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокации в такой структуре одинакова и составляет в образце №6 $2,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а в образце №2 - $2,65 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

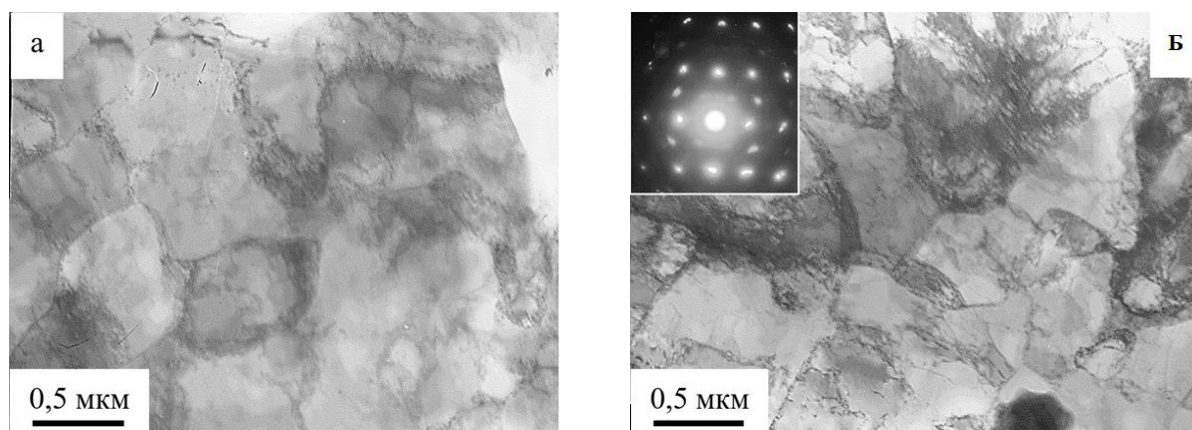


Рисунок 2 - Фрагментированная дислокационная субструктура сварного шва

Амплитуда внутренних полей напряжений, напрямую связана с поперечным размером изгибных контуров. При этом, чем меньше поперечный размер контура, тем выше амплитуда полей напряжений в данной области материала. Анализируя электронно-микроскопические изображения структуры сварного шва, было замечено, что наиболее узкие контуры формируются у межфазных границ включение / матрица (рисунок 3).

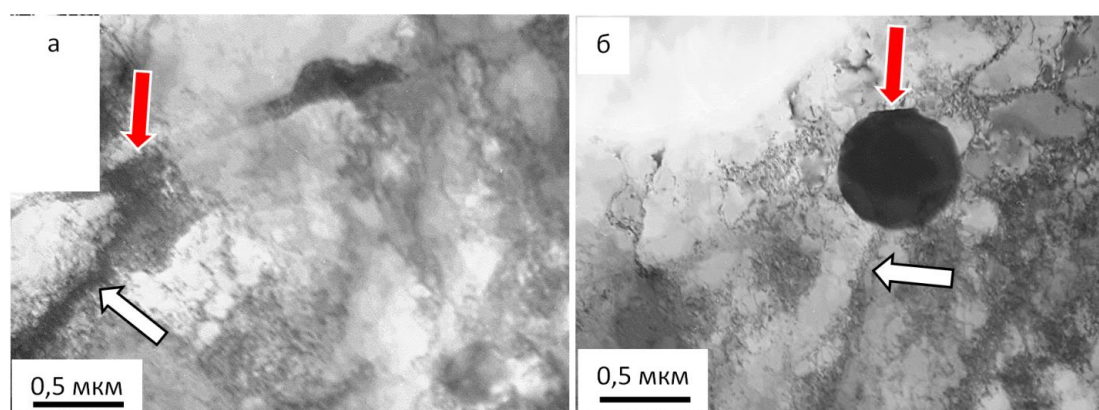


Рисунок 3 - Изгибные контуры экстинкции, присутствующие на электронно-микроскопических изображениях структуры сварного шва. Контуры указаны светлыми стрелками, включения второй фазы – красными стрелками.

Таковыми включениями, выявленными методами просвечивающей электронной микроскопии, могут являться частицы цементита, расположенные в объеме и на границах зерен феррита (рисунок 4, а), и частицы силицида железа, имеющие округлую (сферическую) форму и расположенные в объеме зерен феррита (рисунок 4, б). Следовательно, включения второй фазы, присутствующие в сварном шве, являются концентраторами напряжений и могут быть центрами зарождения микротрещин при механическом воздействии на материал.

Электронно-микроскопические исследования металла сварного шва позволили привести количественный анализ характеристик структуры стали, результаты которого представлены в таблице 2. Определяли скалярную (ρ) и избыточную ($\rho_{\pm}$) плотность дислокаций, проводили оценку упрочнения металла вследствие присутствия дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений.

Таблица 2 – Результаты анализа дефектной субструктуры и фазового состава сварного шва

Параметры структуры*	Обр. № 1 (с добавкой ФД-УФС)	Обр. № 2 (без добавки)
$\rho, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	2.92	3.22
$\rho_{\pm}, 10^{10}, \text{см}^{-2}$	2.04	2.87
$\sigma_L, \text{МПа}$	340	360
$\sigma_{\partial}, \text{МПа}$	285	465
*Обозначено: ρ - скалярная плотность дислокаций; $\rho_{\pm}$ - избыточная плотность дислокаций; σ_L – вклад в упрочнение металла, обусловленный торможением подвижных дислокаций дислокациями «леса»; σ_{∂} – вклад в упрочнение металла, обусловленный внутренними полями напряжений;		

Скалярная и избыточная плотность дислокаций в структуре металла сварного шва №2 выше, чем в металле сварного шва №1. Более высокая скалярная и избыточная плотность дислокаций привела к более высокому значению вклада в упрочнение металла, обусловленного торможением подвижных

ных дислокаций дислокациями «леса» (σ_L) и вклада в упрочнение металла, обусловленного внутренними полями напряжений сварного шва №2, относительно металла сварного шва №1. Последнее указывает на более высокий уровень внутренних напряжений в сварном шве №2 и, возможно, на более значительное количество концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала данного образца.

Выводы

Методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведены исследования структуры и фазового состава, поверхности разрушения металла сварного шва. Показано, что в сварном шве №1 (флюс из шлака силикомарганца с добавкой ФД-УФС) частицы второй фазы расположены хаотически, а в сварном шве №2 (без добавки) частицы второй фазы декорируют границы зерен феррита. Анализ структуры поверхности разрушения исследуемых сварных швов выявил наличие неметаллических включений, характерных преимущественно для сварного шва №2 (без добавки), что может указывать на его повышенную хрупкость, по сравнению со сварным швом №1 (с добавкой ФД-УФС). Показано, что структура металла сварного шва №2 характеризуется более высоким уровнем внутренних полей напряжений (относительно металла сварного шва №1) и, возможно, большим количеством концентраторов напряжений, которые могут приводить к охрупчиванию материала.

Библиографический список

1. Маковецкая, О. К. Современный рынок сварочной техники и материалов / О. К. Маковецкая // Автоматическая сварка. – 2011. – № 6(698). – С. 23-38.
2. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов / А. А. Мазур, О. К. Маковецкая, С. В. Пустовойт, Н. С. Бровченко // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5-6(742). – С. 68-74.
3. Зудинова, К. Ю. Импортзамещение в судостроении: путь к экономической и политической безопасности, или новый этап в стремительном повышении конкурентоспособности отрасли на мировой арене / К. Ю. Зудинова // Экономические науки. – 2016. – № 143. – С. 69-72.
4. Рухлин, Г. В. Использование природно-сырьевых ресурсов РСО-Алания в производстве сварочных электродов / Г.В. Рухлин, Н. И. Рухлина // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы : Материалы III Международной научно-практической конференции, Коломна, 30 апреля 2016 года. – Коломна: Коломенский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)", 2016. – С. 132-137.
5. Ремонт вооружения, военной и специальной техники при помощи сварки под флюсом с использованием сварочных материалов из минерального сырья Уральского региона / А. Г. Журба, С. В. Наумов, В. А. Белинин [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. –

2020. – Т. 11. – № 1. – С. 59-61.

6. Патент № 2772822 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/362. Флюс для механизированной сварки и наплавки сталей : № 2021128315 : заявл. 27.09.2021 : опубл. 26.05.2022 / А. Б. Юрьев, Н. А. Козырев, А. Р. Михно [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет", ФГБОУ ВО "СибГИУ".

7. Патент № 2772824 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/362. Флюс для механизированной сварки и наплавки сталей : № 2021128316 : заявл. 27.09.2021: опубл. 26.05.2022 / А. Б. Юрьев, Н. А. Козырев, А. Р. Михно [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет", ФГБОУ ВО "СибГИУ".

8. Патент № 2779557 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/368. Порошковая проволока: № 2022106815 : заявл. 15.03.2022 : опубл. 09.09.2022 / А. Б. Юрьев, Н. А. Козырев, П. В. Киселев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет" ФГБОУ ВО "СибГИУ".

9. Патент № 2683164 С1 Российская Федерация, МПК В23К 35/362. Флюс для механизированной сварки и наплавки сталей : № 2018117404 : заявл. 10.05.2018 : опубл. 26.03.2019 / Р. Е. Крюков, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный индустриальный университет", ФГБОУ ВО "СибГИУ".

10. Крюков Р. Е. Физико-химические принципы выбора углеродсодержащих материалов для электродуговых способов соединения и упрочнения металлов / Р. Е. Крюков // Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности : Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции, Тольятти, 13–17 сентября 2021 года. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2021. – С. 216-217.

11. Влияние введения добавок углерода и фтора во флюсы, изготовленные из шлака силикомарганца / Р. Е. Крюков, Н. А. Козырев, А. Р. Михно [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 1. – С. 34-39. – DOI 10.17073/0368-0797-2020-1-34-39.

12. Крюков Р. Е. Теоретические и технологические основы создания углеродсодержащих сварочных и наплавочных материалов / Р. Е. Крюков // Сварка в России - 2019: современное состояние и перспективы : тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона , Томск, 03–07 сентября 2019 года / Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2019. – С. 170-171.

13. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой

электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.

14. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

УДК 669.713.017:538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИНДУКЦИЕЙ 0,5 ТЛ

Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, aserebrakova87@gmail.com*

***Аннотация.** Проведены механические испытания на ползучесть и микротвердость образцов технически чистого свинца без воздействия и при воздействии внешнего магнитного поля с индукцией 0,5Тл. Получены кривые ползучести и зависимости микротвердости от времени выдержки в магнитном поле, отражающие влияние магнитного поля на процесс ползучести свинца. Произведен расчет скорости ползучести исследуемого материала до и после применения внешнего магнитного поля с индукцией 0,5Тл. Проанализированы показатели по результатам испытаний. Выявлена корреляция скорости ползучести и изменений микротвердости материала, подвергнутого воздействию магнитного поля с магнитной индукции 0,5Тл.*

***Ключевые слова.** Свинец, магнитное поле, ползучесть, микротвердость, пластичность.*

INVESTIGATION OF THE CREEP RATE AND MICROHARDNESS OF COMMERCIALLY PURE LEAD IN A MAGNETIC FIELD WITH INDUCTION 0.5 TL

Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, aserebrakova87@gmail.com*

***Abstract.** Mechanical tests for creep and microhardness of samples technically pure lead were carried out without and under the influence of an external magnetic field with an induction of 0,5 T. Creep curves and microhardness dependences on the holding time in a magnetic field were obtained, reflecting the influence of the magnetic field on the creep process of lead. The creep rate of the material under study was calculated before and after the application of an external magnetic field with an induction of 0,5 T. The indicators based on the test results were analyzed. The correlation of the creep rate and changes in the microhardness of the material subjected to magnetic induction of 0.5 T was revealed.*

Keywords. *Lead, magnetic field, creep, microhardness, plasticity.*

Введение

В настоящее время известны различные способы изменения свойств материалов при помощи воздействия внешней энергии. Одним из видов такой энергии является магнитное поле [1], которое, как показывают исследования способно влиять на структуру и свойства металлов и сплавов [2-3]. Воздействие постоянного магнитного поля позволяет управлять механическими свойствами (прочность, пластичность и твердость) и процессами пластической деформации материала [4-5]. В данной работе предлагается рассмотреть изменение микротвердости и пластичности свинца в процессе ползучести под влиянием магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. Ранее были проведены исследования процесса ползучести сплавов алюминия, меди и т.д. [4-7]. Исследований свойств технически чистого поликристаллического свинца при воздействии магнитного поля до 1Тл ранее не проводилось.

Материалы и методы. В исследованиях ползучести использована свинцовая проволока марки С2, диаметром 2 мм. Для испытаний на микротвердость применялись образцы свинца в форме прямоугольного параллелепипеда, высотой 12 мм, шириной 5 мм, длиной 15 мм. Образцы свинца предварительно подвергнутые рекристаллизационному отжигу при температуре 200 °С в течение двух часов, в последующем охлаждались 24 часа до комнатной температуры. В процессе данной процедуры структура поликристаллического свинца была приведена в наиболее однородное состояние.

Испытание на ползучесть осуществлялось с помощью экспериментальной установки на растяжение до разрушения, разработанной и изготовленной в ФГБОУ ВО «СибГИУ» [8]. Установка состоит из жесткого металлического каркаса, в котором установлен источник магнитного поля с измерительной аппаратурой. Сигналы с датчика передаются на ПК и обрабатываются программой. Полученные данные об удлинении образца и времени процесса ползучести позволили построить кривые процесса ползучести. Дальнейший анализ данных производился в Microsoft Excel. При помощи перечисленных инструментов выполнялось выявление линейной (установившейся) стадии ползучести. Линейная стадия ползучести определялась при помощи построения касательной к кривой ползучести находится прямолинейный участок на кривой, тангенс угла наклона данной прямой равен значению скорости ползучести материала.

Величина постоянного растягивающего напряжения была рассчитана путем отнесения усилия, растягивающего образец, к площади сечения образца и составила $\sigma = 5,57 \text{ МПа}$.

Индукция магнитного поля составляла 0,5 Тл. В качестве источника магнитного поля использовался постоянный электромагнит, имеющий возможность регулирования индукции магнитного поля двумя способами: 1) путем изменения силы тока в катушках; 2) путем изменения расстояния между полюсами. В данной работе индукция была отрегулирована с помощью изменения силы тока в катушках. Величина индукции магнитного поля

измерялась миллитесламетром ТПУ. Испытания проводились при комнатной температуре.

При исследованиях микротвердости, образцы располагались в магнитном поле таким образом, чтобы линии индукции были перпендикулярны стороне образца с размерами $1,5 \times 1,2$ см и пронизывали ее. Обработку магнитным полем в настоящей работе проводили по четырем режимам. Режим 1, 2, 3 и 4 представляли собой выдержку внутри поля с индукцией 0,5 Тл в течении 1 часа, 2 часов, 3 часов, 4 часов. После чего проводилась процедура микроидентирования, сразу же после выведения образца из поля. Процедура микроидентирования проводилась на микротвердомере HVS-1000 по Виккерсу. Испытательная нагрузка: 10 г. Время нагружения и под нагрузкой составляло 10 с время разгрузки 5 с. Обработка данных по результатам микроидентирования выполнена в программах Excel и Origin Pro 8.

Основные результаты. В результате испытаний, набраны статистические данные по процессу ползучести свинца, получены кривые ползучести поликристаллического свинца в обычных условиях и при действии магнитного поля с индукцией 0,5 Тл (рисунок 1).

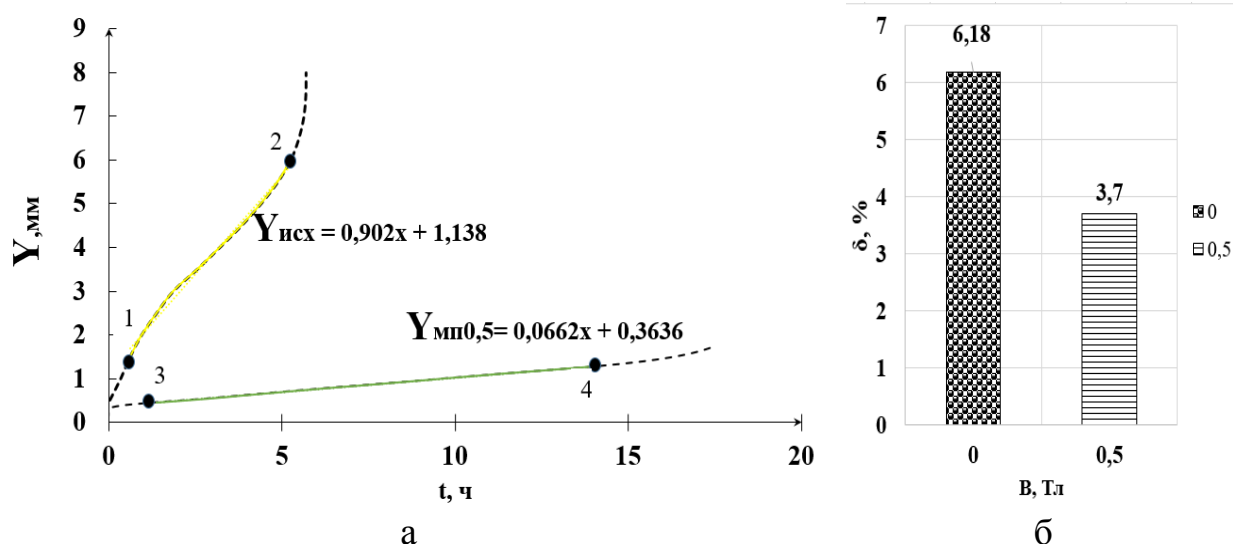


Рисунок 1 - Кривые ползучести поликристаллического свинца в исходном состоянии ($Y_{исх}$) и в МП ($Y_{мп}$) с индукцией $B=0,5$ Тл (а), процент относительной остаточной деформации образцов (б)

На рисунке 1,а представлены кривые ползучести технически чистого поликристаллического свинца в исходном состоянии - $Y_{исх}$, и с воздействием магнитного поля с индукцией 0,5Тл – $Y_{мп}$. Проанализируем полученные результаты.

Линейная стадия на кривой $Y_{исх}$ выявлена на отрезке 1-2, а на кривой $Y_{мп}$ линейная стадия процесса ползучести показана на отрезке 3-4. По данным отрезкам осуществлен расчет скорости ползучести поликристаллического свинца. Среднее значение скорости, рассчитанное по 3 испытаниям на ползучесть в исходном состоянии, составило 0,902 мм/час. Среднее значение скорости ползучести при воздействии магнитного поля с индукцией 0,5 Тл

составило 0,0662 мм/час, что показывает снижение скорости ползучести свинца по сравнению с исходным значением на 97 %. Предположительно, данный эффект обусловлен влиянием магнитного поля на образование и движение дислокаций в образце. Магнитное поле замедляет процесс деформации.

Магнитное поле, применяемое в процессе ползучести свинца С2, повлияло также и на процент относительной остаточной деформации образцов (рисунок 1,б). Деформация образцов до разрушения, не подвергнутых магнитному влиянию в процессе ползучести в среднем составляет 6,18 % (рисунок 1,б). Значение деформации образцов подвергнутых воздействию магнитного поля составило 3,7 %, по сравнению с исходным значением, деформация уменьшилась в 1,6 раз.

Исследования микротвердости технически чистого поликристаллического свинца позволили определить эффект воздействия магнитного поля на материал. Начальный эффект воздействия магнитного поля на материал отражает значения микротвердости, измеренные сразу же после извлечения образца из магнитного поля, изменения которых показывают эффект влияния магнитного поля на значения микротвердости материала. Начальный эффект представлен на рисунке 2.

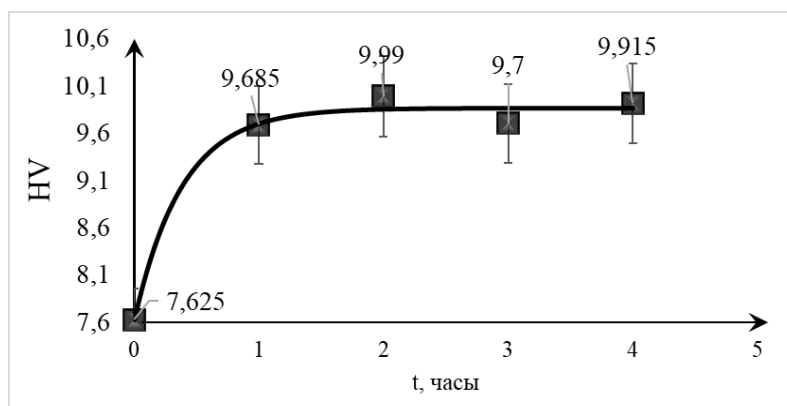


Рисунок 2 - Начальный эффект воздействия магнитного поля на микротвердость свинца С2

Величина микротвердости до обработки свинца составила $HV_0 = 7,6$ (точка 1, рисунок 2). В точках 2-5 представлены значения микротвердости полученные при измерениях сразу после выдержки в магнитном поле в течение 1 часа (точка 2, рисунок 2), 2 часов (точка 3, рисунок 2), 3 часов (точка 4, рисунок 2) и 4 часов (точка 5, рисунок 2).

В течение первого часа нахождения образца в магнитном поле (рис.2, отрезок 1-2), наблюдается резкое увеличение микротвердости до $HV_1 = 9,685$ (точка 2, рисунок 2) на 27,43 %. Далее в точках 2-5 не происходит значительного увеличения значений микротвердости. Максимальное изменение по сравнению с исходным наблюдается после выдержки в магнитном поле в течение 2 часов, $HV_2=9,99$ (точка 3, рисунок 2). Таким образом, начальный эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,5Тл выражен увеличением прочности свинца. Это можно объяснить тем, что существует связь прочно-

сти и микротвердости заключается в том, что при испытаниях на микротвердость исследуется сопротивление внедрению в поверхность твердого тела, чем тверже материал, тем сложнее его деформировать. Разрушение материала начинается с образования трещин на поверхности, поэтому чем тверже материал, тем сложнее нанести ему дефект поверхности, а значит сложнее разорвать, сломать или разрушить. Предположительно, одной из возможных причин упрочнения исследуемого материала под воздействием магнитного поля может быть снижение подвижности дислокаций материала [9].

Проанализировав полученные данные по микротвердости, можно отметить что наиболее эффективным является режим 1, в котором образец выдержан в магнитном поле в течении 1 часа с индукцией $B=0,5\text{Тл}$. Дальнейшее увеличение времени выдержки в магнитном поле не приводит к усилению эффекта.

Выводы

В результате испытаний, набраны статистические данные по влиянию магнитного поля на пластические свойства свинца марки С2. В качестве анализируемых характеристик были выбраны микротвердость и скорость ползучести, для оценки пластических свойств свинца и их зависимости от воздействия магнитного поля с индукцией 0,5 Тл. Получены кривые ползучести поликристаллического свинца, которые позволили выявить линейную стадию ползучести и рассчитать скорости ползучести без воздействия магнитного поля и под воздействием. Анализ полученных данных показал, что под воздействием магнитного поля происходит снижение скорости ползучести свинца на 97 % по сравнению с исходной скоростью. Также был рассмотрен процент деформации образцов, разрушенных без воздействия магнитного поля и под воздействием. По сравнению с исходным значением деформация уменьшилась в 1,6 раз. Кроме того, исследования позволили выявить эффект влияния магнитного поля на значение микротвердости. Микротвердость образца, подвергнутого влиянию магнитного поля, увеличивается. Максимальное увеличение происходит в течение 1 часа воздействия. Микротвердость после 1 часа увеличивается на 27, 43 % по сравнению с исходным значением. Выявлено, что при последующей выдержке в магнитном поле, значение микротвердости остается на одном уровне. На основании этого, можно сделать вывод о том, что эффект влияния магнитного поля с индукцией 0,5 Тл на свинец не зависит от времени выдержки в нем исследуемого материала. Таким образом, наблюдается корреляция анализируемых характеристик, которые позволяют сделать вывод о том, что воздействие магнитного поля на поликристаллический свинец приводит к упрочнению материала, снижению подвижности дислокаций и меньшей остаточной деформации образцов.

Библиографический список

1. Ida, N. The Static Magnetic Field / N. Ida // In book: Engineering Electromagnetics. 2021. - pp.377-418.
2. Cai, Q. Effects of magnetic field on the microstructure and mechanical property of Mg-Al-Gd alloys / Q. Cai, C. Zhai, Q. Luo, T.-Y. Zhang// Materials

Characterization. 2019. - № 154. - pp. 233-240

3. Bilal N., Effect of magnetic field on microstructure and mechanical properties of austempered 70Si3MnCrsteel / N. Bilal, L.Xiaoyan, Y. Zhinan, Z. Jiali, Z. Fucheng, L. Junkui // Materials Science and Engineering: A. -2019. - V.759.-pp. 11–18.

4. Загуляев, Д.В. Закономерности изменения деформационного поведения поликристаллической меди после магнитной обработки / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, И.А. Комиссарова, Н.Г. Литвиненко (Ярополова), В.Е. Громов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. - Т.18. - №4-2. - С. 1763-1766.

5. Загуляев, Д. В. Влияние слабого магнитного поля на пластичность алюминия А85 / Д.В. Загуляев, С.В. Коновалов, М.В. Пономарева [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2010. - Т.15. - № 3-1. - С.820-821

6. Pshonkin D.E., Effect of static magnetic fields on creep of aluminum alloy / D.E. Pshonkin // Solid state phenomena.2017. - № 269. - pp. 1-6.

7. Скворцов, А.А. Влияние магнитного поля на ползучесть алюминиевого сплава с Fe-содержащими включениями/ А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин // «ФППК – 2018»: Тез. докл. междунаrodn. конф. Черноголовка. 2018. - С.91.

8. Коновалов, С. В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов / С. В. Коновалов, В. И. Данилов, Л. Б. Зуев и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. - № 8. – С. 64 – 66.

9. Альшиц, В. И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля / В. И. Альшиц [и др.]. // ФТТ. – 1987. – № 2. – С. 467–471.

УДК 669.15:620.186:539.12

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСНОВОЙ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКЕ

**Будовских Е.А., Романов Д.А., Филяков А.Д.,
Башенко Л.П., Ионина А.В.**

***Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, budovskikh@mail.ru***

Аннотация. Методами световой и растровой электронной микроскопии выявлено, что при электровзрывной обработке меди в зоне термического влияния происходит растрескивание по границам зерен с заполнением трещин материалом взрываемого проводника (углеродных волокон и металлической фольги). Проведено обсуждение и предложен механизм наблюдае-

мого явления.

Ключевые слова: электровзрывное легирование, электровзрывное напыление, зона термического влияния, проникание по границам зерен.

FEATURES OF THE FORMATION OF THE COPPER STRUCTURE AT THE INTERFACE OF MODIFIED SURFACE LAYERS WITH THE METAL BASE DURING ELECTROEXPLOSION TREATMENT

**Budovskikh E.A., Romanov D.A., Filyakov A.D.,
Bashchenko L.P., Ionina A.V.**

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, budovskikh@mail.ru*

Abstract. *Methods of light and scanning electron microscopy revealed that during electroexplosion treatment of copper in the zone of thermal influence, cracking occurs along the grain boundaries with filling cracks with the material of the exploded conductor (carbon fibers and metal foil).*

Keywords: *electroexplosion alloying, electroexplosion spraying, zone of thermal influence, penetration along grain boundaries.*

В последние десятилетия активно развиваются новые методы обработки материалов с использованием импульсных плазменных источников [1–6]. Характерные для них малые времена процессов, высокие скорости нагрева и охлаждения, высокие температуры и давления отражаются на структуре и свойствах обрабатываемых и синтезируемых материалов. В ряде случаев они являются уникальными.

Одними из таких методов обработки поверхности материалов (прежде всего металлических) с помощью импульсных плазменных струй являются электровзрывное легирование и электровзрывное напыление [4–6]. В обоих случаях для формирования импульсной плазменной струи как инструмента воздействия на поверхность используется коаксиально-торцевая схема токоподводящих электродов плазменного ускорителя, с помощью которых от батареи импульсных конденсаторов через проводник (обычно в виде металлической фольги или другого электропроводного материала, например, углеграфитовых волокон) пропускается ток высокой плотности. Эффективную длительность импульса воздействия сформированной струи на облучаемую поверхность можно принять равной одному периоду разрядного тока (в данном случае 100 мкс).

Продукты разрушения проводника локализуются в конической разрядной камере и через сопло направляются на обрабатываемую поверхность. Электро- и термодинамические особенности формируемой сверхзвуковой струи определяются емкостью конденсаторной батареи и индуктивностью электрической цепи установки, а также параметрами разрядной камеры, например, диаметром сопла ускорителя и расстоянием от среза сопла до облучаемой поверхности.

При электровзрывном легировании параметры обработки подбираются таким образом, чтобы поверхность оплавлялась, а плазменные и конденсированные продукты взрыва смешивались с расплавом. При электровзрывном напылении продукты взрыва осаждаются на поверхности без ее оплавления. Ниже зоны легирования или напыленного покрытия на поперечных шлифах образцов можно выделить зону термического влияния, в которой под действием термомеханических процессов происходят структурно-фазовые превращения.

Основное внимание при анализе результатов электровзрывного легирования и электровзрывного напыления уделяется изучению зоны легирования и напыленных покрытий соответственно. Вместе с тем термосиловое воздействие импульсной плазменной струи на обрабатываемую поверхность характеризуется рядом особенностей структуры зоны термического влияния, которые в настоящее время изучены недостаточно. При этом очевидно, что они могут существенно сказаться на эксплуатационных свойствах поверхности материала после обработки.

Целью настоящей работы является выявление и анализ особенностей структуры электротехнической меди в зоне термического влияния после электровзрывной обработки.

При импульсном науглероживании меди электровзрывом углеродных волокон в зоне термического влияния подложки выявлено растрескивание по границам зерен (рисунок 1). При этом, как видно из рисунка, пароплазменный компонент продуктов взрыва проникал по трещинам на глубину до 30 мкм.

В случае напыления на поверхность медных образцов покрытий электровзрывом металлических фольг также наблюдается растрескивание по границам зерен и проникание по трещинам в глубь конденсированной фазы продуктов взрыва (рисунок 2). Глубина проникновения достигает 100 мкм. С учетом того, что длительность импульса воздействия на поверхность при электровзрывном напылении была 100 мкс, скорость заполнения микротрещин расплавом покрытия можно оценить по порядку величины равной 1 м/с.

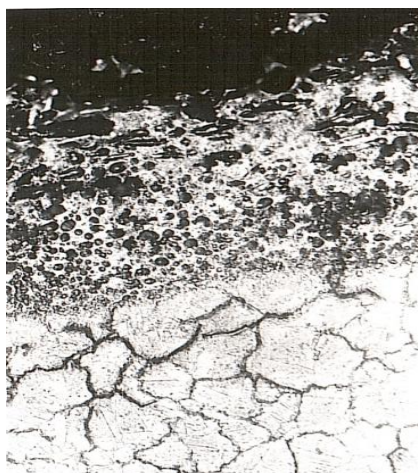


Рисунок 1 – Микрофотография косого шлифа образца меди после импульсного науглероживания. $\times 300$

Модельное физическое и математическое описание этой особенности формирования структуры в настоящее время не проведено. При этом можно отметить, что само растрескивание меди по границам зерен происходит из-за их ослабления примесями в условиях ударного воздействия сверхзвуковой плазменной струи на поверхность, сопровождающегося интенсивным нагревом и радиальным растеканием плазмы от центра зоны обработки к ее периферии при натекании струи на поверхность.

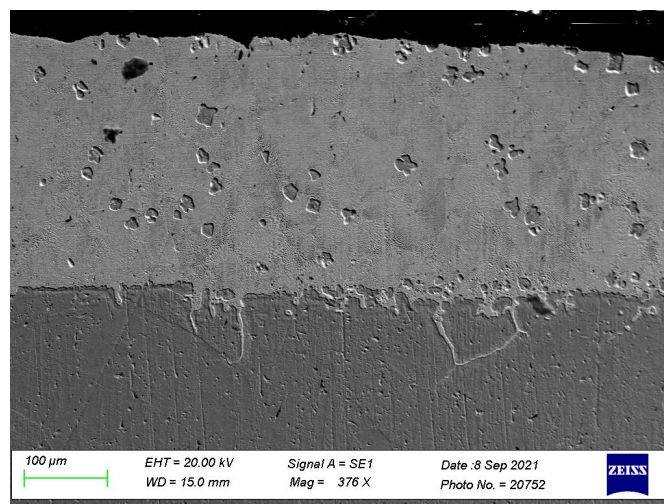


Рисунок 2 – Микрофотография прямого шлифа образца меди после импульсной электровзрывной металлизации

Растрескивание образцов меди в зоне термического влияния при электровзрывном напылении можно представить следующим образом. Известно, что медь имеет низкую растворимость кислорода, вследствие чего при кристаллизации слитка по границам зерен образуются хрупкие оксидные частицы Cu_2O . При импульсном нагреве в условиях ударного воздействия сверхзвуковой плазменной струи на поверхность медных образцов оксидные включения становились источником зародышевых микротрещин.

В пользу данного утверждения свидетельствует образование глобулярных включений в зоне легирования (верхняя часть структуры на рисунке 1. Кислород, находящийся в исходном образце преимущественно по границам зерен, после оплавления поверхности плазменной струей растворяется в расплаве и взаимодействует с внесенным в него углеродом. При этом образуются поры, содержащие углекислый газ и углерод в форме графита. Образование пор, аналогичное описанному, наблюдается при газовой сварке кислородсодержащей меди, когда кислород взаимодействует с углеродом с образованием углекислого газа. Кислород же, оставшийся в твердом растворе, снижает пластичность меди и ограничивает степень релаксации упругой энергии путем пластической деформации. Поэтому микротрещины, зарождающиеся в процессе нагрева параллельно поверхности, под действием сдвиговых напряжений становятся неустойчивыми. Доходя до тройных стыков зерен, они испытывают ветвление, а на стадии охлаждения под действием нормальных растягивающих напряжений – дополнительный рост (рисунок 3).

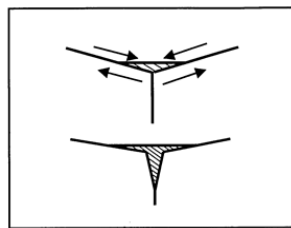


Рисунок 3 – Схема ветвления трещины на тройных стыках зерен в процессе охлаждения поверхности после импульсной электровзрывной обработки

Параллельно с механическими процессами образующиеся трещины под действием тыла гетерогенной (многофазной, содержащей помимо ионизированной газовой фазы конденсированные частицы электровзрывного разрушения проводника) струи заполняются материалом взрываемого проводника. В первом случае это пар углерода, который декорирует границы трещин по границам зерен (рисунок 1), а во втором – преимущественно материал жидких капель, образовавшихся при разрушении металлической фольги (рисунок 2). В обоих случаях следует отметить сравнительно большую глубину зоны растрескивания и проникновения материала проводника по границам зерен. Эта особенность электровзрывной обработки требует специального анализа. В связи с этим отметим, что аналогичные процессы сверхглубокого проникания по границам зерен и субзерен в условиях электроимпульсной обработки наблюдались ранее в работе [7]. Вместе с тем, скорость массопереноса расплава, заполняющего микротрещины, была порядка 1 мм/с.

Работа выполнена в рамках государственного задания 0809-2021-0013.

Библиографический список

1. Сивков А.А., Шаненков И.И., Ивашутенко А.С., Гуков М.И., Ли Л., Ли Г., Хань В. Плазмодинамический синтез дисперсных оксидов железа в многоимпульсном режиме работы коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 6 (738). С. 72–79.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год. 2001. – 528 с.
3. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. С. 515–544.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 301 с.
5. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Электровзрывное напыление износостойких и электроэрозсионностойких покрытий. – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2014. – 203 с.
6. Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С. Формирование структуры, фазового состава и свойств поверхности титано-

вых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке. – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2015. – 290 с.

7. Истомин-Кастровский В.В., Кошкин В.И., Руденко И.Б. Микроструктурные особенности процесса сверхглубокого проникания в металлических системах в условиях твердо-жидкофазного взаимодействия // Перспективные материалы. 2008. № 2. С. 87–90.

УДК 621.791.042.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА ПУТЕМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНО СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОШОК ТИТАНА

Киселев П.В., Комаров А.А., Михно А.Р., Дробышев В.К.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, pashakiselev359@gmail.com*

Аннотация: В работе представлено исследование по разработке новых составов порошковых проволок, используемых для наплавки изделий, работающих в условиях абразивного износа промышленной металлургии, в частности изучение влияния введения в порошковые проволоки углерод-фторсодержащих компонентов, а также введения в состав порошка титана на степень износа и твердости наплавленного слоя.

Ключевые слова: наплавка; порошковая проволока; порошок титана; микроструктура; твердость, износостойкость.

INCREASING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS USED UNDER INTENSIVE WEAR BY ARC SURFACE WELDING WITH A FLUX-CORRECT WIRE ADDITIONALLY CONTAINING TITANIUM POWDER

Kiselev P.V., Komarov A.A., Mikhno A.R., Drobyshev V.K.

*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia, pashakiselev359@gmail.com*

Abstract. The paper presents a study on the development of new compositions of flux-cored wires used for surfacing products operating under abrasive wear conditions of industrial metallurgy, in particular, the study of the effect of introducing carbon-fluorine-containing components into flux-cored wires, as well as introducing titanium powder into the composition of titanium powder on the degree of wear and hardness of the deposited layer.

Keywords: surfacing; flux-cored wire; titanium powder; microstructure; hardness, wear resistance.

Введение

От надежности прокатных валков, износостойкости их рабочей поверхности, межремонтного срока службы зависят технико-экономические показатели работы прокатных цехов и в первую очередь производительность прокатных станов, качество готового проката. Рабочая поверхность валка подвергается циклическому механическому и тепловому воздействию. По мере эксплуатации на рабочую поверхность валков налипают металл, она неравномерно изнашивается и образуются трещины разгара. Для ремонта стальных валков применяют восстановительно-упрочняющую наплавку сплошной и порошковой проволокой, при этом один комплект валков восстанавливается в среднем от 5 до 10 раз [1-5].

Важным вопросом при разработке нового наплавочного материала является выбор системы легирования сплава [6-9]. При выборе системы легирования необходимо учитывать условия работы детали, цену наплавочного материала, результаты различных опытов над материалами в лабораторных и натурных условиях, а также характер и твердость различных фаз, их количество и т.д. Благодаря подобранному химическому составу порошковой проволоки и полученному при наплавке покрытию возможно получение наплавленного слоя, имеющего высокую твердость, абразивную и ударно-абразивную износостойкость.

Целью настоящей работы является исследование закономерности влияния введения в состав порошковых порошков титана, для восстановительной наплавки изделий, работающих в условиях абразивного износа в металлургии.

Наиболее востребованным для ремонтно-восстановительных работ является использование наплавки порошковой проволокой на изнашивающиеся поверхности деталей [10-13]. Для этих целей в России и за рубежом активно развивается изготовление специальных наплавочных порошковых проволок. Большое распространение для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo типа А и В по классификации МИС. В настоящее время широко используются для ремонтных работ изношенного металлургического оборудования порошковые проволоки марки ПП-Нп-35В9ХЗСФ, ПП-Нп-25Х5ФМС и другие.

Материалы и методика исследований. Изготовление новых составов порошковых проволок проводилось путем расчета и подготовки шихтовых материалов, их перемешивания, сушки в печи в течении 4-х часов и засыпки в бункер стана по производству порошковых проволок. В качестве шихтовых материалов использовались следующие порошковые материалы: углеродфторсодержащий материал – пыль газоочистки алюминиевого производства (в замен углерода аморфного) [14], порошок титана ПТС по ТУ 14-22-57-92, железный порошок ПЖВ-1 по ГОСТ 9849-86, никеля ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722-97, хрома ПХ-1С по ТУ 14-1-1474-75, марганца МР-0 по ГОСТ 6008-82, кремния КР-1 по ГОСТ 2169-69. В качестве оболочки порошковой проволоки использовалась лента из Ст3. Диаметр получаемой порошковой

проволоки составлял 5мм.

Наплавка исследуемых образцов выполнялась с использованием оборудования НПЦ «Сварочные процессы и технологии» на подложку из стали 09Г2С методом автоматической наплавки под слоем флюса на следую режимах: сила тока 500А, напряжение 28В, скорость наплавки 15 см/мин. В качестве флюса использовался ранее разработанный флюс, изготовленный из техногенного сырья производства Западно-Сибирского электрометаллургического завода, флюс марки НФП по ТУ 20.59.56.120-001-14796818-2020 [15].

Исследование химического состава исследуемых наплавленных слоев проводили с использованием оборудования центра коллективного пользования «Материаловедение» рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС -71.

Металлографические исследования наплавленных слоев проводилось с использование металлографического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от $\times 100$ до $\times 1000$ с использованием пакета прикладных программ для металлографических исследований Siam Photolab 700. Оценка уровня загрязненности неметаллическими включениями проводилась по ГОСТ 1778-70. Подготовка к исследованиям микроструктуры наплавленного слоя проводилось путем химического травления полированных образцов 4-х % раствором азотной кислоты. Величину зерна и характеристики структур определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 500$ и по ГОСТ 8233-56 при увеличении $\times 1000$ методом сравнения с эталонными шкалами.

Измерение твердости наплавленных слоев выполняли по методам Бринелля и Роквелла в соответствии с требованиями ГОСТ 9012-59 и ГОСТ 9013-59.

Трибологические испытания проводились на испытательной машине 2070 СМТ-1 по схеме диск – колодка по режиму: нагрузка 30 мА (78,4Н), частота 20 об/мин. в течении 4-х часов.

Результаты исследований и их обсуждение. Результат исследования химического состава наплавленных образцов порошковыми проволоками представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав наплавленного слоя

№ образца	Массовая доля элементов, %												
	C	Cu	Mn	P	Ni	Si	Nb	V	Cr	Mo	Al	Ti	S
1Т	0,18	0,05	1,10	0,013	0,05	0,38	0,001	0,006	2,40	0,06	0,028	0,005	0,094
2Т	0,15	0,06	1,01	0,012	0,04	0,36	0,002	0,004	2,25	0,04	0,021	0,005	0,089
3Т	0,35	0,06	0,96	0,015	0,04	0,29	0,002	0,004	2,65	0,05	0,020	0,017	0,101
4Т	0,38	0,06	1,40	0,014	0,05	0,65	0,003	0,005	2,45	0,06	0,011	0,053	0,085
5Т	0,41	0,79	1,50	2,23	0,05	0,06	0,075	0,002	0,015	0,04	0,017	0,003	0,077

Коэффициент извлечения титана составил 6,2-8,6%. Результаты проведения испытаний наплавленного слоя на твердость и износ представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты проведения испытаний на твердость и износ

№ образца	Твердость НВ (Среднее значение)	Твердость HRC (Среднее значение)	Интенсивность изнашивания, г/об
1Т	348,32	35,61	$7,8 \cdot 10^{-5}$
2Т	310,16	37,16	$10,2 \cdot 10^{-5}$
3Т	391,4	42,46	$2,6 \cdot 10^{-5}$
4Т	531,7	52,73	$3,4 \cdot 10^{-5}$
5Т	555,94	53,11	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Исследование образцов наплавленного слоя на загрязненность неметаллическими включениями (таблица 3) показало, что в образцах преимущественно наблюдаются оксиды точечные балл 1а, 2а, представляющие собой включения в виде отдельных частиц, а также во всех исследуемых образцах присутствуют силикаты недеформирующиеся в виде отдельных включений балла 1а, 2а.

Таблица 3 - Неметаллические включения наплавленных образцов

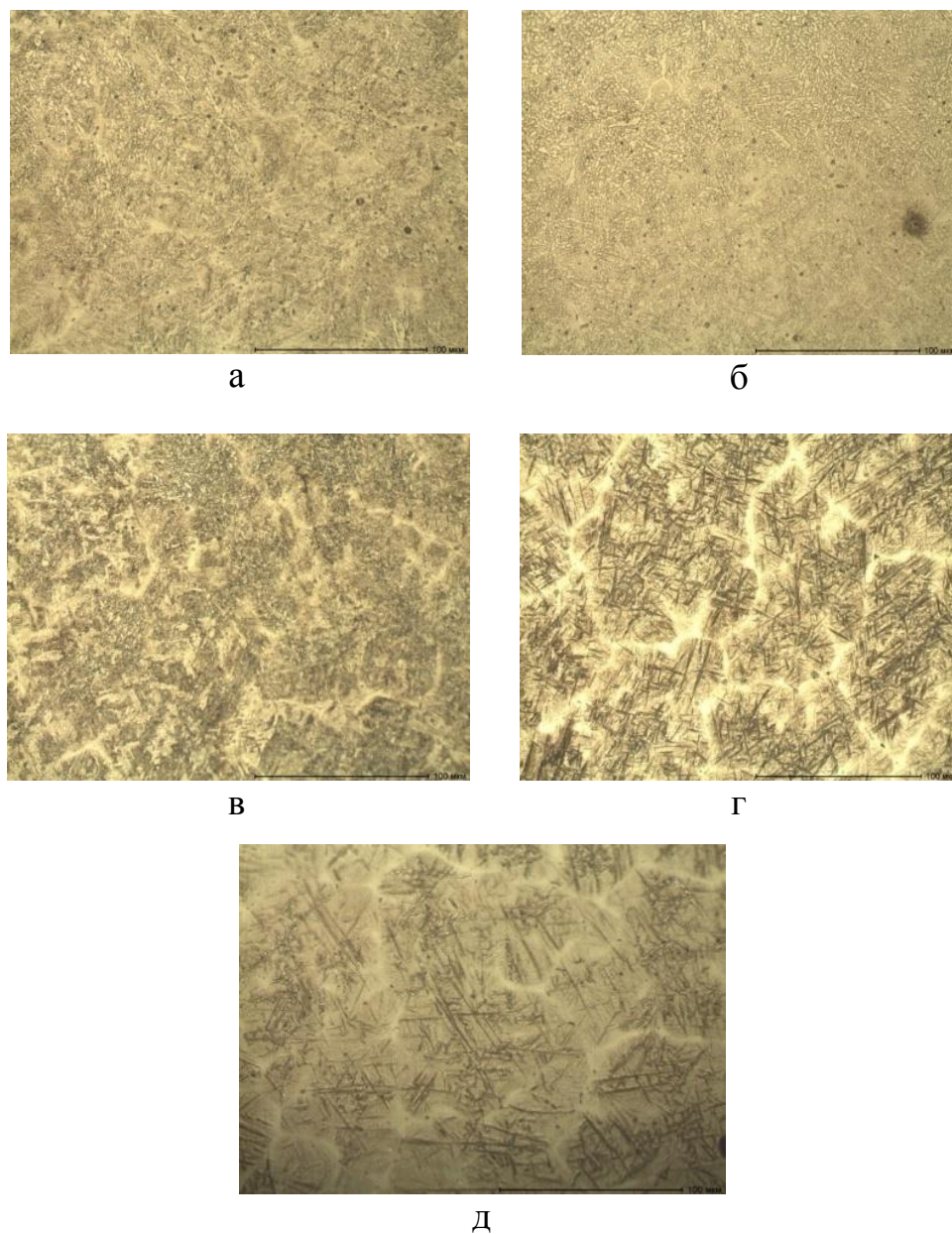
№ образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл	
	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
1Т	1а	1а
2Т	1а, 2а	1а
3Т	1а, 2а	1а, 2а
4Т	1а, 2а	1а, 2а
5Т	1а, 2а	1а

Установлено, что повышение содержания титана в составе порошковой проволоки при одинаковом содержании остальных химических элементов в составе наплавленного слоя незначительно влияет на степень загрязненности неметаллическими включениями. Для всех исследуемых образцов отмечена незначительная загрязненность неметаллическими включениями, не оказывающая негативное влияние на свойства наплавленного слоя и допустима для использования исследуемой порошковой проволоки.

Микроструктура наплавленного металла (рисунок 1) имеет в основном дендритное строение и представляет собой мелкоигльчатый и среднеигльчатый мартенсит (балл 3-7) с размером игл (3 – 7) мкм, сформировавшийся внутри границ бывшего зерна аустенита, небольшое количество аустенита остаточного в виде отдельных участков и тонкие прослойки δ -феррита.

По полученным данным химического состава (таблица 1) и физико-

механических свойств наплавленного металла (таблица 2), были построены регрессионные зависимости (рисунки 2 и 3) влияния химических элементов на степень износа и твердость наплавленного слоя исследуемыми порошковыми проволоками.



а – образец 1Т, б – образец 2Т, в – образец 3Т,
г – образец 4Т, д – образец 5Т

Рисунок 1 - Микроструктура наплавленного металла в зависимости от содержания титана в порошковой проволоке, $\times 500$

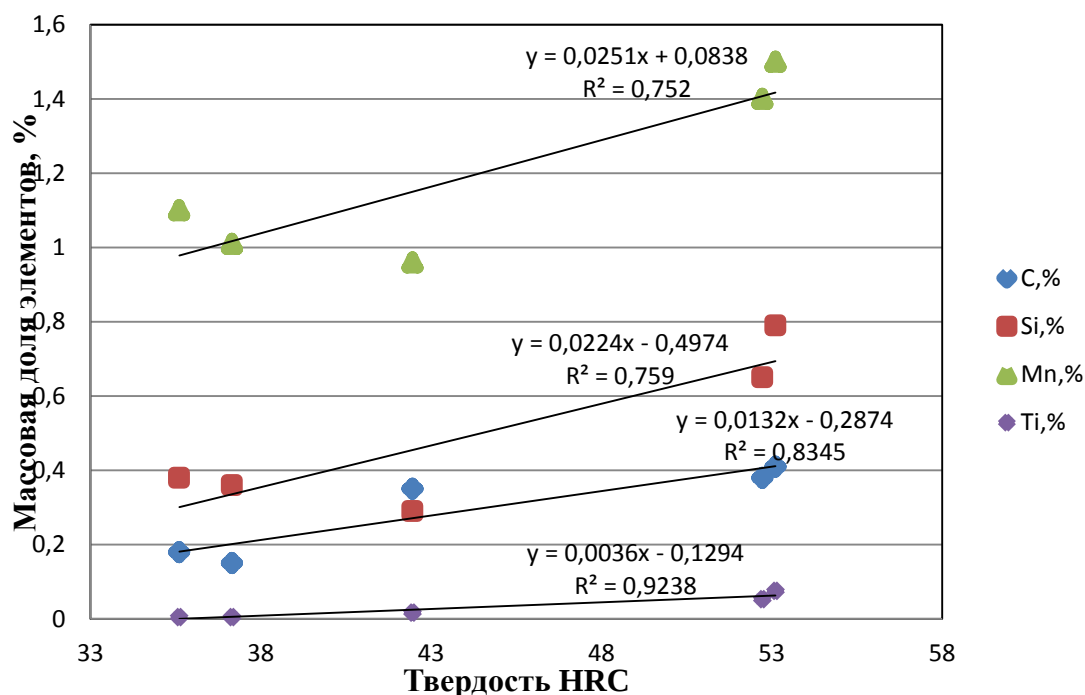


Рисунок 2 – Влияния химических элементов на твердость HRC

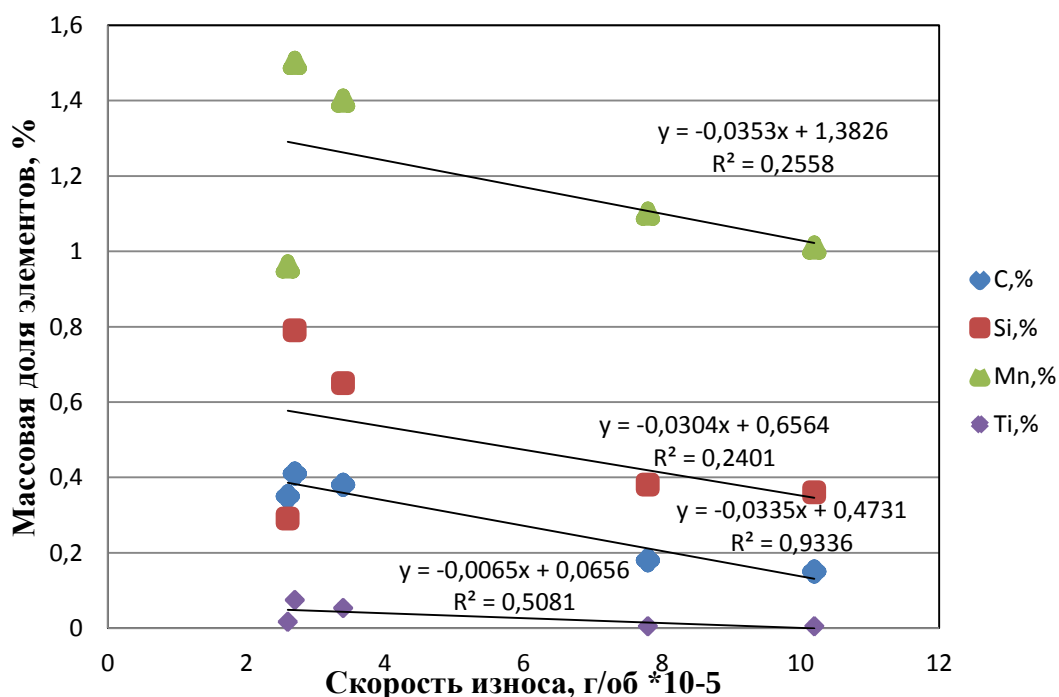


Рисунок 3– Зависимость влияния химических элементов на скорость износа наплавленного металла

Регрессионные модели, описывающие влияние концентрации массовой доли химических элементов, входящих в наплавленный слой металла на степень износа и твердость наплавленного слоя:

Скорость износа (г/об·10⁻⁵): $0,000257 + 0,003031 \cdot C + 0,006191 \cdot Si - 0,00265 \cdot Mn - 0,03179 \cdot Ti$ (ошибка аппроксимации составляет 0,00012%);

HRC = $47,4078 + 1344,28 \cdot C + 2358,56 \cdot Si - 989,44 \cdot Mn - 12327,4 \cdot Ti$ (ошибка аппроксимации составляет 0,00011%).

Выводы:

1. Полученные результаты исследования влияния введения в состав порошковых проволок порошка титана указывают на небольшое изменение микроструктуры наплавленного слоя, снижается размер игл мартенсита и величина зерна.

2. Увеличение содержания в наплавленном слое титана, марганца, кремния, и углерода способствует увеличению твердости и снижению степени износа исследуемых образцов.

3. Полученные результаты лабораторных исследований указывают на возможность применения разработанных порошковых проволок для ремонтно-восстановительной наплавки деталей металлургического оборудования.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Библиографический список

1. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. - Киев: Екотехнологія, 2004. - 160 с.

2. D.B. Slinko, R.Yu.Solovev, A.B.Kaveshnik. Experience in the use of plasmapowder surfacing in the reduction of the semi-axes stages subway escalators. Trudy GOSNITI – Moscow . 2015 Vol. 121. p. 243 – 249.

3. Дураков В.Г., Гнюсов С.Ф., Дампилов Б.В., Дехонова С.З. Влияние технологических параметров электронно-лучевой наплавки на структуру медно-хромовых композитов // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 80–86.

4. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF / A. I. Gusev, N. V. Kibko, N. A. Kozyrev, M. V. Popova, I. V. Osetkovsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1–7 (012033).

5. Особенности фазового состава и строение слоев на основе диборида TiB₂, сформированных в поверхностных слоях углеродистых сталей при воздействии интенсивных электронных пучков в вакууме / З.М. Халтаров, А.С. Милонов, Н.Н. Смирнягина, В.М. Халтанова // вестник бурятского государственного университета. – 2011. – С. 203-209.

6. Малушин Н.Н., Осетковский В.Л., Осетковский И.В. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 10. С. 6–10

7. Громов В.Е., Капралов Е.В., Райков С.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками // Успехи физики металлов. – 2014. – Т.15. – С. 211–232.

8. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Райков С.В., Иванов Ю.Ф. Формирование наноструктурно-фазовых состояний и свойств износостойкой наплавки на стали // Наноинженерия. – 2015. – №4(46). – С. 14–23.

9. Влияние введения вольфрама и хрома на свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co / А. И.

Гусев, Н. А. Козырев, Н. В. Кибко, Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении (Литейное и сварочное производство). – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 56–60.

10. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А. и др Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками // Изв. РАН. Сер. физ. – 2014. – Т.78, №10. – С. 1266–1272.

11. Капралов Е.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Наноструктурные состояния и свойства наплавки, сформированной на стали порошковой проволокой // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т.58, №4. – С. 39–45.

12. Влияние введения в шихту для производства порошковой проволоки системы C-Si-Mn-Cr-V-Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля / Н. А. Козырев, Д. А. Титов, С. Н. Старовацкая, О. Е. Козырева, В. М. Шурупов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 4. – С. 34–37.

13. Выбор энерго-технологических режимов сварки под флюсом, изготовленным из шлака производства силикомарганца для деталей горношахтного оборудования / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, Р. А. Михно // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2020. – № 6. – С. 175–180.

14. Improvement of Abrasion Resistance of Production Equipment Wear Parts by Hardfacing with Flux-Cored Wires Containing Boron Carbide/Metal Powder Reaction Mixtures / Oleksandr Ivanov, Pavlo Prysyazhnyuk, Dmytro Lutsak, Oleh Matviienkiv // Public License - 2020. - С. 178-183

15. The Role of Stress–Strain State of Gas Turbine Engine Metal Parts in Predicting Their Safe Life / A. Duriagina, V. V. Kulyk, O. S. Filimonov ,A. M. Trostianchyn and N. B. Sokulska // - 2021. - С. 22-34

УДК 661.811

ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ БЕСКИСЛОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМАХ B_4C-MeB_2 ($Me = Ti, Cr, Zr$)

**Гудыма Т.С.¹, Крутский Ю.Л.¹, Крутская Т.М.², Дик Д.В.¹,
Шестаков А.А.¹, Апарнев А.И.¹, Логинов А.В.¹**

¹*Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия, gudymatan@mail.ru, krutskii@yandex.ru,
dickdmil@yandex.ru, tema_shes_25_99@mail.ru, apaliv@mail.ru,
loginov@corp.nstu.ru*

²*Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет, г. Новосибирск, Россия, t.krutskaya@mail.ru*

Аннотация. *Керамика на основе карбида бора вследствие тугоплавкости, высокой твердости, износостойкости, низкой плотности, химической инертности является перспективной для ряда применений. Однако по-*

лучение плотной керамики с качественными эксплуатационными характеристиками из этого соединения представляет собой сложную задачу. Использование композиций карбида бора с диборидами ряда переходных металлов принципиально позволяет улучшить качество керамики.

Ключевые слова: карбид бора, керамика, дибориды переходных металлов, твердость, трещиностойкость

ON THE PRODUCTION OF CERAMICS BASED ON REFRACTORY OXYGEN-FREE COMPOUNDS IN B_4C - MeB_2 SYSTEMS ($Me = Ti, Cr, Zr$)

Gudyma T.S.¹, Krutskii Yu.L.¹, Krutskaya T.M.²,
Shestakov A.A.¹, Aparnev A.I.¹, Loginov A.V.¹

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
gudymatan@mail.ru, krutskii@yandex.ru, dickdmit@yandex.ru,
tema_shes_25_99@mail.ru, apaliv@mail.ru, loginov@corp.nstu.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russia, t.krutskaya@mail.ru*

Abstracts. Ceramics based on boron carbide is promising for a number of applications due to its refractoriness, high hardness, wear resistance and chemical inertness is promising for a number of applications. However, obtaining dense ceramics with high-quality performance characteristics from this compound is a difficult task. The use of compositions of boron carbide with diborides of a number of transition metals makes it possible in principle to improve the quality of ceramics.

Keywords: boron carbide, ceramics, transition metal diborides, hardness, crack resistance.

Борсодержащие соединения – бориды некоторых переходных d-элементов и карбид бора B_4C – обладают помимо тугоплавкости и высокой твердости повышенной электропроводностью (TiB_2 , CrB_2 , ZrB_2) и улучшенными полупроводниковыми характеристиками (B_4C). Эти соединения лежат в основе получения большой группы спеченных материалов для широкого применения в технике – абразивов, конструкционной, функциональной, инструментальной керамики для машиностроения, атомной энергетики, электроники и других отраслей. Большой интерес представляют композиционные гетерофазные материалы на основе этих борсодержащих соединений [1]. В керамике MeB_2 - B_4C можно при ее спекании исключить аномальный рост зерен карбида бора и сформировать мелкозернистую структуру с высоким уровнем механических свойств. Такая керамика, даже при изготовлении относительно крупногабаритных изделий, имеет значительную прочность при изгибе, а ее твердость при высоких температурах (≥ 1000 °C) может превышать твердость алмаза. Бориды имеют более высокий линейный коэффициент термического расширения, чем карбид бора, и поэтому в композите зерна боридов и матрица карбида бора находятся в состоянии всестороннего растяжения и сжатия соответственно. Установлено, что материалы, содер-

жащие до 30 об. % боридов, должны иметь повышенную трещиностойкость и прочность. Сведения по получению керамических материалов в системах $\text{MeB}_2\text{-B}_4\text{C}$ ($\text{Me} = \text{Ti, Cr, Zr}$) немногочисленны.

Композит $\text{B}_4\text{C-TiB}_2$. Состав эвтектики, мол. %: 88 B_4C -12 TiB_2 ; температура плавления 2310 ± 20 °C [1]. Такой композит сочетает высокую твердость карбида бора и высокую трещиностойкость диборида титана. Кроме того, он является перспективным для разработки термоэлектрических материалов. В работе [2] проанализированы различные методы получения данной керамики: электроискровое плазменное спекание (spark plasma sintering), горячее прессование (hot pressing), спекание без приложения давления или безнапорное спекание (pressureless sintering). Исходными материалами служили: $\text{B}_4\text{C} + \text{TiB}_2$; $\text{B} + \text{C} + \text{Ti}$; $\text{B}_4\text{C} + \text{TiO}_2 + \text{C}$. При электроискровом плазменном спекании температура процесса составляла 1700-2000 °C, давление 60-100 МПа. Полученная керамика имела твердость 22-34 ГПа и трещиностойкость $2,5\text{-}5,0 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. При горячем прессовании температура процесса была выше (2050-2200 °C), давление 30-37 МПа. Полученная керамика имела твердость 24,5-29,5 ГПа и трещиностойкость $3,9\text{-}4,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. При безнапорном спекании предварительное прессование осуществлялось при высоком давлении (~ 200 МПа). Спекание осуществлялось при температурах 2100-2150 °C. Относительная плотность полученных образцов была сравнительно невысокой (90-96 %). Невысокими были также значения твердости (17-23 ГПа) и трещиностойкости (не более $4,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Авторы работы [2] считают, что наличие TiB_2 предотвращает рост зерен B_4C , снижает температуру спекания, улучшает механические свойства образующегося композита. В работе [3] установлено, что при карбидоборном восстановлении диоксида титана оптимальная температура получения композиционного порошка $\text{TiB}_2\text{-B}_4\text{C}$ находится в диапазоне 1620...2280 °C.

Композит $\text{B}_4\text{C-CrB}_2$. Состав эвтектики, мол. %: 30 B_4C -70 CrB_2 ; температура плавления 2150 ± 30 °C [1]. В публикации [4] сообщалось о получении керамики $\text{B}_4\text{C-CrB}_2$ из смеси порошков карбида бора (средний размер частиц 0,43 мкм) и диборида хрома (средний размер частиц 3,5 мкм). Порошки смешивались в планетарной шаровой мельнице в метаноле в течение 30 минут. Содержание диборида хрома в смеси варьировалось от 5 до 25 мол. %. Полученная смесь выдерживалась при 115 °C в течение 24 часов. Горячее прессование осуществлялось в печи сопротивления с углеродным нагревателем в течение 1 часа при температуре 2050 °C и давлении 5 МПа в среде аргона. Для сопоставления при аналогичных условиях были изготовлены образцы из одного только карбида бора. Фазовая идентификация выполнялась на дифрактометре с $\text{CuK}\alpha$ излучением. Прочность на изгиб определялась по четырехточечному методу. Определялась также трещиностойкость образцов, их относительная плотность, изучалась микроструктура. По данным рентгенофазового анализа образцы содержат фазы B_4C и CrB_2 ; обнаружены следы SiC – от намола мелющих тел. Значения прочности на изгиб и трещиностойкости с увеличением содержания диборида хрома возрастают. Для образца из одного только карбида бора они равны: 160 МПа и 1,8

МПа·м^{1/2}. Возможная причина – очень низкое давление горячего прессования (всего 5 МПа). При содержании диборида хрома 25 мол. % они равны 684 МПа и 3,2 МПа·м^{1/2}. Увеличение прочности на изгиб вызвано, по мнению авторов, уплотнением, ведущим к снижению числа и размеров пор. Это в свою очередь уменьшает вероятность возникновения и роста трещин. Причиной уплотнения является образование жидкой фазы при спекании. Температура процесса горячего прессования (2050 °С) ниже температуры плавления эвтектики (~ 2150 °С). Авторы считают, что причина появления жидкой фазы в данном случае – наличие примесей в реагентах или отклонение от стехиометрии карбида бора. Для монофазных образцов из карбида бора с аналогичной относительной плотностью трещиностойкость составляла 2,5–2,8 МПа·м^{1/2}. Также в работе показано, что электрическая проводимость образцов с увеличением содержания них диборида хрома возрастает. Это явно связано с тем, что диборид хрома в отличие от карбида бора относится к металлоподобным тугоплавким соединениям. В работе [5] композиционные порошки В₄С–CrВ₂ были получены карбидоборным восстановлением оксида хрома в среде аргона при температуре 1700 °С.

Композит В₄С–ZrВ₂. В работе [6] реагентами служили карбид бора (D₉₀ = 6 мкм) и диборид циркония (D₉₀ = 4 мкм). Содержание диборида циркония в смеси в одном случае составляло 3,7 масс. %, в другом 6,2 масс. %. Некоторые образцы изготавливались из одного только карбида бора. Порошковые смеси были смешаны в этиловом спирте, после чего суспензия подвергалась сушке в течение 16 часов при температуре 90–110 °С. Горячее прессование осуществлялось при температуре 2100–2140 °С и давлении 40 МПа. Для удаления термических напряжений и гомогенизации образцы были подвергнуты отжигу в вакууме (34 Па) при температуре 1800 °С. По сравнению с образцами из одного только карбида бора в образце с добавлением 3,7 масс. % ZrВ₂ на 10 % (с 5,0 до 4,5 мкм) снижен средний размер частиц этого соединения и на 8 % (с 2,56 до 2,76 МПа·м^{1/2}) увеличена величина трещиностойкости. В [7] композиционные порошки В₄С–ZrВ₂ были получены карбидоборным методом с использованием нановолокнистого углерода с развитой удельной поверхностью (~ 150 м²/г) [8] и высокодисперсного карбида бора с незначительным содержанием примесей [9]. Синтез проводился в среде аргона в диапазоне температур 1200...1900 °С. Определение полноты протекания реакции проводили по данным рентгенофазового анализа. Анализ дифрактограмм показывает, что образование фазы ZrВ₂ начинается уже при температуре 1200 °С, а заканчивается при 1650 °С (на дифрактограммах исчезают рефлексы фазы ZrО₂). Порошки, синтезированные при температуре 1650 °С, были консолидированы методом горячего прессования. Кроме того, были проведены эксперименты по изготовлению композиционной керамики В₄С–ZrВ₂ методом *in situ*. Во всех случаях было достигнуто практически полное уплотнение керамики.

Анализ литературных данных [1, 2, 4, 6] позволил сделать следующие выводы. Керамика на основе тугоплавких бескислородных соединений в системах MeВ₂–В₄С (Me = Ti, Cr, Zr) является перспективным материалом.

Сравнительно небольшие (до 20 масс. %) добавки диборидов титана, хрома и циркония к карбиду бора увеличивает эксплуатационные характеристики керамики.

Авторами показано [3, 5, 7], что использование в качестве реагентов нановолокнистого углерода и высокодисперсного карбида бора позволяет получить качественную керамику из карбида бора с рядом диборидов переходных металлов.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием Минобрнауки (код FSUN-2020-0008).

Библиографический список

1. Орданьян С.С. Физико-химический базис создания новой керамики с участием борсодержащих тугоплавких соединений и практика его реализации / С.С. Орданьян, В.И. Румянцев, Д.Д. Несмелов, Д.В. Кораблев // Новые огнеупоры. – 2012. – № 3. – С. 153–156.

2. Heydari M.S. Comparing the effect of different sintering methods for ceramics on the physical and mechanical properties of B_4C - TiB_2 nanocomposites / M.S. Heydari, H.R. Baharvandi // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – V. 61. – P. 224–232.

3. Шестаков В.А. Определение оптимального температурного диапазона процессов получения порошковых композиционных материалов B_4C - TiB_2 и B_4C - ZrB_2 / А.В. Шестаков, Ю.Л. Крутский, Н.Ф. Уваров, Т.С. Гудыма // Химические технологии функциональных материалов : Материалы 6-ой Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции. 15–16 июня 2020 г. – Алматы : Казах университети, 2020. – С. 154–156.

4. Yamada S. Mechanical and electrical properties of B_4C - CrB_2 ceramics fabricated by liquid phase sintering / S. Yamada, K. Hirao, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // Ceramics International. – 2003. – V. 29. – P. 299–304.

5. Дик Д.В. Исследование процессов синтеза порошковых композиционных материалов B_4C - CrB_2 с использованием нановолокнистого углерода / Д.В. Дик, Т.С. Гудыма, Ю.Л. Крутский // Химические технологии функциональных материалов : Материалы 8-ой Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции. 28–29 апреля 2022 г. – Алматы : Казах университети, 2022. – С. 282–284.

6. Mestvirishvili Z. Thermal and mechanical properties of B_4C - ZrB_2 ceramic composite / Z. Mestvirishvili, I. Bairamashvili, V. Kvatchadze, N. Rekhviashvili // Journal of Material Science and Engineering B 5. – 2015. – V. 9-10. – P. 385–393.

7. Гудыма Т.С. Синтез и консолидация композиционных материалов B_4C - ZrB_2 / Т.С. Гудыма, Ю.Л. Крутский, В.П. Подзорова, Н.Ю. Черкасова // Химические технологии функциональных материалов : Материалы 8-ой Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции. 28–29 апреля 2022 г. – Алматы : Казах университети, 2022. – С. 132–133.

8. Kuvshinov G.G. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition / G.G. Kuvshinov, Yu.L. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A.

Rudina // Carbon. – 1999. – V. 37. – P. 1239–1246.

9. Крутский Ю.Л. Синтез высокодисперсного карбида бора из нановолокнистого углерода / Ю.Л. Крутский, А.Г. Баннов, В.В. Соколов, К.Д. Дюкова, В.В. Шинкарев, А.В. Ухина, Е.А. Максимовский, А.Ю. Пичугин, Е.А. Соловьев, Т.М. Крутская, Г.Г. Кувшинов // Российские Нанотехнологии. – 2013. – Т. 8. – № 3-4. – С. 22–27.

УДК 661.862

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Непочатов Ю.К.¹, Плетнев П.М.², Гудыма Т.С.³

¹ХК ПАО «НЭВЗ-Союз», г. Новосибирск, Россия, nuk3d@mail.ru

²Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия, pletnevm@stu.ru

³Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия, gudymatan@mail.ru

Аннотация. Металлизированная алюмонитридная керамика во всем мире широко используется в качестве теплоотводов для активных элементов силовых полупроводниковых приборов (СПП). В данной работе рассмотрена возможность металлизации отечественной алюмонитридной керамики металлизационными пастами. Сравниваются прочность металлизационных покрытий (МП), полученных из металлизационных паст собственного изготовления и зарубежного производства. Приведены режимы вжигания этих металлизационных паст.

Ключевые слова: алюмонитридная керамика, металлизационная паста, силовые полупроводниковые приборы, адгезия, вжигание.

IMPROVING TECHNOLOGY METALLIZATION OF CERAMICS FROM ALUMINUM NITRIDE

Nepochatov Yu.K.¹, Pletnev P.M.², Gudyma T.S.³

¹HK PJSC "NEVZ-Soyuz", Novosibirsk, Russia, nuk3d@mail.ru

²Siberian State University of Railway Engineering,
Novosibirsk, Russia, pletnevm@stu.ru

³Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia, gudymatan@mail.ru

Abstracts. Metallized aluminum nitride ceramics are widely used all over the world as heat sinks for active elements of power semiconductor devices (PSD). In this work, the possibility of metallization of domestic aluminum nitride ceramics with metallization pastes is considered. The article compares the strength of metallization coatings (MP) obtained from metallization pastes of domestic production

and foreign production. The modes of firing these metallization pastes are given.

Keywords: aluminium nitride ceramics, metallization paste, power semiconductor devices, adhesion, firing.

Темпы развития силовых полупроводниковых приборов (СПП) растут с каждым годом, что обусловлено постоянной работой специалистов в направлении разработки новых конструкционных радиоматериалов и технологий их создания. Сегодняшний тренд развития электроники направлен на миниатюризацию полупроводниковых устройств и приборов, однако это возможно при решении ряда определенных задач, таких, как эффективный отвод тепла от активных радиоэлементов, разработка новых алгоритмов работы микросхем, поиск альтернативных технологий, позволяющих снизить выделение тепла при работе приборов.

Металлизационные покрытия на деталях из алюмонитридной керамики для высокомоощных полупроводниковых приборов должны быть достаточно плотными, термостойкими, высокотепло- и электропроводящими, поскольку МП выполняет функции проводника электрического тока и в тоже время теплоотвода.

Целью работы является выбор составов металлизационных паст для трафаретной печати и исследование технологических путей получения металлизационных покрытий диэлектриков из нитрида алюминия.

Все ныне существующие технологии металлизации AlN керамики позволяют создавать металлизационные покрытия, которые можно разделить на низкотемпературные ($T_{\text{раб}} \leq 800^\circ\text{C}$) и высокотемпературные ($T_{\text{раб}} \geq 800^\circ\text{C}$).

Высокотемпературные МП на AlN керамике

Наиболее востребованными МП на AlN керамике являются покрытия, которые не ухудшают своих адгезионных свойств при нагреве до $900\text{--}1000^\circ\text{C}$, поскольку наиболее популярными припоями для пайки конструкционных элементов вакуумноплотных систем являются припои на основе серебра и меди (пример: ПСр72, Ср99,99 и др.). Полное отсутствие стеклофазы в алюмонитридной керамике не позволяет использовать для ее металлизации стандартные, хорошо отработанные процессы металлизации оксидных керамик пастами на основе тугоплавких металлов (Mo, W). Металлизационные пасты на основе Mo и W часто смешивают с Ti и вжигают при температуре $1850\text{--}1880^\circ\text{C}$ в атмосфере азота, после чего покрывают никелем (3-5 мкм) и золотом (1-1,5 мкм). Однако такая высокая температура вжигания данной смеси связана с большими затратами и может использоваться только в тех случаях, когда это действительно оправдано.

Исследование возможности металлизации керамики из нитрида алюминия

Сведения о металлизации керамики как теоретического, так и практического характера достаточно подробно изложены в работе [1]. В России промышленным производством изделий из алюмонитридной керамики занимается предприятие АО «НЭВЗ-Керамикс» [1-2]. Алюмонитридные изделия, изготавливаемые на этом предприятии, в зависимости от способа изго-

товления (прессование, центробежное литье, литье на движущуюся основу [3-4], что определяется сложностью формы изделия, обладают теплопроводностью 160–185 Вт/(м·К) и имеют высокие изоляционные и прочностные характеристики на уровне мировых брендов (таблица 1) [5].

Таблица 1 - Характеристики алюмонитридной керамики мировых производителей

Наименование характеристик	MARUWA (Япония)	LEATEC (Тайвань)	ClecGroup (Китай)	CeramTec (Германия)	АО «НЭВЗ-Керамикс» (Россия)
Содержание AlN, %	98	98	98	98	98
Кажущаяся плотность, кг/м ³	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Предел прочности на изгиб (20°C), МПа	250	450	320	360	420
Теплопроводность (20°C), Вт/(м·К)	200	170	160	180	180
Коэффициент теплового расширения (25–1000°C)	4,0	5,0	4,7	4,7	4,5
Диэлектрическая проницаемость, (1МГц, 25°C)	9,0	8,7	9,0	9,0	9,0
Диэлектрические потери, (1МГц, 25°C)	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003
Объемное удельное сопротивление, (20°C), Ом·см	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹⁴

На изделиях в виде дисков (Ø17,7x2 мм), изготовленных из отечественной алюмонитридной керамики методом осесимметричного прессования [3], и подложек (20×20×1 мм), изготовленных на линии КЕКО Equipment методом литья на движущуюся основу [4, 6], было опробовано формирование металлизационных покрытий методом трафаретной печати составами металлизационных паст для алюмооксидной керамики (Al₂O₃: ВК-96, ВК-100).

Составы паст:

А. Мо-Mn-Si+Ta₂O₅+ZrO₂+TiH₂+биндер («НЭВЗ-Керамикс»);

Б. Мо-Mn-Si)+биндер («НЭВЗ-Керамикс»);

С. CeronicsInc: 3.1 #80/15/5; 3.2 #80/10/10; 3.3 #90/10; 3.4 #CE-11 (производство США).

Органическое связующее (биндер) отечественных металлизационных паст состояло из таких компонентов как: этилцеллюлоза-100, α-терпинеол, дибутилфталат и олеиновая кислота. Биндер добавлялся в смесь порошков до получения оптимальной вязкости для трафаретного нанесения на алюмонитридную керамику (AlN). Наиболее оптимальная вязкость металлизацион-

ной. пасты получилась при добавлении 26% биндера на 100 г смеси и составила – 710 сп. При такой вязкости топологический рисунок, полученный с помощью сеткографического трафарета с плотностью сетки 325 меш, имеет достаточно четкие границы, при этом сохраняется толщина металлизационного покрытия, задаваемая сеткой трафарета (20–25 мкм), и минимизируется вероятность появления дефектов печати таких, как налипание, затекание и неоднородность плотности металлизационного слоя.

Одним из важных моментов в формировании металлизационного покрытия на керамики является подготовка поверхности. Керамические детали после спекания подвергались механической шлифовке для выравнивания и создания шероховатости поверхности $Ra=0,15$ мкм. После шлифовки поверхности дисков и подложек тщательно промывались в кипящем трихлорэтилене, после чего подвергались ультразвуковой обработке в деионизированной воде и сушились в ацетоне.

Наиболее распространенным и доступным оборудованием для вжигания металлизационных паст являются азотно-водородные проходные толкательные печи электрического типа. Муфели расположены последовательно и формируют непрерывный канал с 3-5 температурными зонами. Эксперимент проводился при трех температурных режимах:

1. $T=1340$ °C/15 мин толкание, среда: H_2 , влажность +25°;
2. $T=1340$ °C/15 мин толкание, среда: H_2 , влажность -40°;
3. $T=1400$ °C/15 мин толкание, среда: H_2 , влажность +25°;

Время нахождения деталей в зоне с максимальной температурой 30 минут. После термической обработки деталей с нанесенными металлизационными пастами, качество сцепления полученных МП сначала оценивалось методом царапания. Результаты анализа прочности полученных МП покрытий представлены в таблице 2 и 3.

Таблица 2 - Оценка качества вожженных паст методом царапания

Режим вжигания	Состав А (НЭВЗ-Керамикс)	Состав Б (НЭВЗ-Керамикс)	Состав С CeronicsInc (США)			
			С.1 80/15/15	С.2 80/10/10	С.3 90/10	С.4 СЕ-11
$T=1340$ °C/15 мин толкание, среда: H_2 , влажность +25°	- пузырение	+	- нет прочности	+	- шелушение	+
$T=1340$ °C/15 мин толкание, среда: H_2 , влажность -40°	- нет прочности	+	- нет прочности	+	- отслоение	- нет прочности

Продолжение таблицы 2

Режим вжигания	Состав А (НЭВЗ- Керамикс)	Состав Б (НЭВЗ- Керамикс)	Состав С CeronicsInc (США)			
			С.1 80/15/15	С.2 80/10/10	С.3 90/10	С.4 СЕ-11
T=1400 °C/15 мин толкание, среда: Н ₂ , влажность +25°	- шелушение	+	+	+	- отслоение	+

Из таблицы видно, что паста собственного изготовления состава «Б» показывает хорошую прочность при всех трех режимах вжигания. Из зарубежных составов «С» аналогичной является состав «С.2». Также хорошую прочность МП, но исключительно во влажной среде показали пасты состава «С.1» и «С.4», однако у состава «С.1» прочность появляется только при температуре 1400 °С.

У деталей, на которых МП показало хорошую стойкость к царапанию, измерялась адгезия методом прямого отрыва припаянного вывода. Подготовка к измерению адгезии проводилась в два этапа.

- Сначала на металлизированную поверхность гальваническим методом наносился слой никеля толщиной 3–4 мкм, после чего никель припекался в сухом водороде при температуре 850 °С в течение 30 мин.

- Потом изделия помещались в специальную оправку, в которой к никелированной поверхности прижимался никелевый вывод, площадь припаяемого торца которого составляла 1 мм², между выводом и никелированной поверхностью помещалась прокладка припоя ПСр72 толщиной 200 мкм. Пайка проводилась при температуре 870 °С в вакууме $7 \cdot 10^{-5}$ торр.

Измерения адгезии припаянного никелевого вывода к МП проводили с помощью разрывной машины Instron 3366L4610 с точностью измерения 1%. Результаты измерения адгезии представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты измерения адгезии МП

Состав	Величина адгезии, кгс/мм ²	Режимы вжигания
Состав Б	2,0	T=1340 °C/15 мин толкание, среда: Н ₂ , влажность +25°
Состав С.2	2,5	
Состав С.4	2,1	
Состав Б	2,5	T=1340 °C/15 мин толкание, среда: Н ₂ , влажность -40°
Состав С.2	2,5	
Состав Б	2,4	T=1400 °C/15 мин толкание, среда: Н ₂ , влажность +25°
Состав С1	1,5	
Состав С.2	2,2	
Состав С.4	2,5	

При измерении адгезии максимальная нагрузка, которую выдерживал никелевый вывод 2,5 кгс/мм². Из таблицы 2 видно, что из зарубежных составов максимальную адгезию показывают составы «С.4» при температуре вжигания

1400 °С в сухом водороде и «С.2» как в сухом, так и во влажном водороде, но при более низкой температуре (1340 °С). Важно отметить, что во влажной среде поверхность алюмонитридной керамики окисляется и на ее поверхности формируется слой из оксидов: Al_2O_3 , $\text{Al}_5\text{Y}_3\text{O}_{12}$ и AlYO_3 [6]. Это приводит к снижению теплопроводности керамики, что является негативным фактором. Поэтому предпочтительно использовать режимы вжигания, в которых время нахождения образцов во влажной среде минимально.

Выводы

Исходя из результатов измерения адгезии МП к AlN керамике, можно сказать, что некоторые составы металлизационных паст, применяемые для металлизации алюмооксидной керамики (Al_2O_3), можно использовать для металлизации алюмонитридной керамики. Наиболее оптимальными составами являются составы «Б» и «С.2», вжигание которых осуществлялось при $T=1340$ °С в сухом водороде. Для более глубокого исследования прочностных характеристик МП на AlN керамике, полученных на основе составов «Б» и «С.2», требуется дальнейшее проведение экспериментальных работ.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием Министерства Образования и Науки (шифр темы FSUN-2020-0008).

Библиографический список

1. Керамика и ее спай с металлом в технике / В.А. Преснов, М.Л. Любимов, В.В. Строганова и др. М.: Атомиздат, 1969. 232 стр.
2. Непочатов Ю.К., Земницкая А.А., Муль П.А. Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники. Современная электроника. 2011. № 9. С. 14–16.
3. Непочатов Ю.К., Плетнев П.М., Денисова А.А. Патент 2560456 Россия, МПК51 С 04 В 35/581, С 04 В 35/64. Способ обжига керамических деталей /. № 2013121253/03; Заявлено 07.05.2013; опубл. 20.08.2015// Изобретения. 2015. № 23.
4. Непочатов Ю.К., Красный И.Б., Абраамян А.А., Бандин А.В., Денисова А.А. Разработка теплопроводящих керамических дисков для СВЧ транзисторов и силовых полупроводниковых модулей. Современная электроника. 2016. № 3. С. 32–36.
5. Земницкая А.А., Пестрецова Н.Е., Ларин К.В., Борискин С.А., Дитц А.А. Технология получения керамических подложек из нитрида алюминия методом литья. Сборник научных трудов IX международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» Томск, ТПУ, 2012. С. 33–36.
6. Никитушкин И.В., Анненков Ю.М. Теплопроводная нанокерамика из нитрида алюминия и сопутствующие материалы, полученные методами высокоинтенсивных технологий. Материалы Российской молодежной научной конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи». Секция 1. Энергоэффективные технологии в электромеханике. Томск, ТПУ, 2016. С. 82–85.
7. Непочатов Ю.К., Денисова А.А., Плетнев П.М., Красный И.Б. Особенности обжига алюмонитридной керамики. Вестник СГУПС. 2016 № 1(36) С. 27–31.

ПЕРСПЕКТИВЫ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ МЕТОДОМ ЭШН

Быстров В.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, bistrov39@yandex.ru*

Аннотация. Для упрочнения деталей, работающих при высокотемпературном износе, используют композиционные материалы на основе тугоплавких твёрдых сплавов, например, спечённый твёрдый сплав типа ТН 20 (Ti,Mo)C-Ni-Mo, имеющий кольцевую структуру. Никель-молибденовая оболочка обеспечивает минимальную растворимость ТН 20 при ЭШН, что приводит к повышению износостойкости и росту срока службы упрочнённых деталей.

Ключевые слова: композиционный материал; электрошлаковая наплавка; износостойкость.

PROSPECTS FOR HARDENING OF PARTS OF METALLURGICAL EQUIPMENT WITH A COMPOSITE ALLOY BY THE ESHN METHOD

Bystrov V.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia*

Abstract. To strengthen parts operating under high-temperature wear, composite materials based on refractory hard alloys, for example, are used. sintered hard alloy type TN 20 (Ti,Mo)C-Ni-Mo, having a ring structure. Nickel-molybdenum shell provides a minimum solubility of TN 20 at ESN, which leads to an increase in wear resistance and an increase in the service life of hardened parts.

Keywords: composite material; electroslag cladding; wearability.

В настоящее время производительная работа всего металлургического цикла зависит от устойчивой работы деталей и узлов, лимитирующих производительность основных агрегатов. Быстроизнашивающиеся детали металлургического оборудования, работающие в условиях высокотемпературного абразивного износа, к числу которых относятся детали агломерационных машин; детали засыпного устройства доменных печей; валки прокатных станов горячего металла и другие, определяют срок службы основных агрегатов. Диапазон рабочих температур перечисленных деталей весьма широк, например, детали дробильного агломерационного оборудования могут нагреваться до 800 °С [1-3].

Стабилизация гранулометрического состава агломерата, повышение его физических свойств обеспечивают полноту протекания металлургических процессов, ровный, стабильный ход доменных печей за счёт улучшения газопроницаемости, способствуют увеличению выплавки чугуна на $9 \div 11$ %, снижению удельного расхода кокса на $6 \div 9$ %, что приводит к улучшению качества чугуна и снижению расходов по переделу. Содержание мелочи в шихте снижает производительность доменной печи на $0,6 \div 0,8$ % и повышает расход кокса на $0,4 \div 0,7$ %, следовательно, не должно превышать $1 \div 2$ %. В начальный период работы дробильного органа агломашины обычно удаётся достигнуть таких показателей, но по мере износа бил роторных дробилок агломерата (рисунок 1) стабильность гранулометрического состава агломерата ухудшается, при этом увеличивается выход мелочи до 45 %, что требует соответствующих затрат на переработку агломерата [4].

Конструкция била таврового сечения серповидной формы предусматривает концентрацию ударных нагрузок на определённой части аглоспека, таким образом, чтобы верхней частью била отделить часть аглоспека и тавровым сечением била разделить этот кусок на 4 части [1-3]. Следовательно, в результате ударного импульса и конструкции бил, получают гранулы агломерата сечением 20×40 мм. По мере износа рабочая часть била становится равновыпуклой и разделения аглоспека уже не происходит, что приводит к нарушению гранулометрического состава агломерата. При изменении коэффициента закруглённости $K_3 = 1 - 7,9 \times r$ носка била где показатель $r = r_6 / D_p$ ($r_6 = 60$ мм – радиус закругления носка била; $D_p = 1300$ мм – диаметр ротора) происходит снижение производительности агломашины. При начальном положении $K_3 = 0,64$ износ била на 50 мм приведёт к уменьшению K_3 до 0,60. Экспериментально установлено, что уменьшение коэффициента закруглённости на 0,01 вызывает снижение эффективности дробления агломашины на 10 %, таким образом, при износе била на 50 мм (за 68 суток) эффективность дробления снизится на 40 %, качество дробления будет падать, вследствие износа таврового сечения и уменьшения ударного импульса, при этом увеличивается выход фракции более 80 мм на 35 % и фракции менее 5 мм (мелочь) на 15 % [3-4].

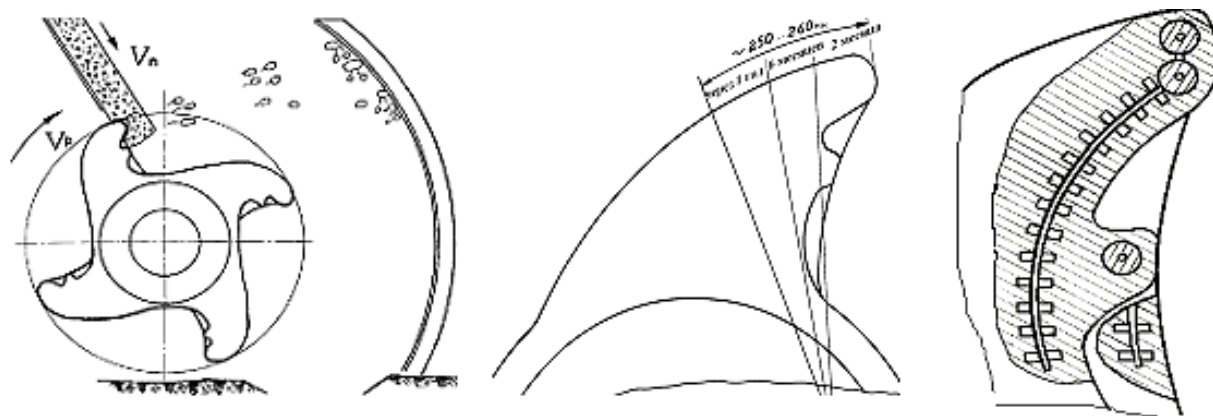


Рисунок 1 - Схема работы, износа и упрочнения била ротора дробилки агломерата

Установлено что время соударения аглоспека с биллом, армированным твёрдым сплавом ТН 20 (рисунок 1), в два раза меньше, чем стали 70ХЛ. Расчёты показали, что интенсивность изнашивания $I_h^{70ХЛ} = 6,83$, для твёрдого сплава – $I_h^{ТН\ 20} = 0,0059$, что в 1000 раз меньше. Число циклов до полного износа серповидной части била $N_{Ц}^{70ХЛ} = 407 \times 10^3$, а для упрочнённого била твёрдым сплавом $N_{Ц}^{ТН\ 20} = 227 \times 10^6$, что в 557 раз выше. При скорости движения ленты агломашины $V_{a.m}$ в среднем 260 м/ч, числе соударений била ротора на одну плиту аглоспека $N_{С}^{ТН\ 20} = 3,15$ ударов, и при величине допустимого износа била 0,26 м, длительность кампании $T_{к}^{70ХЛ}$ равно 68 суток, а упрочнённого ротора $T_{к.p}^{ТН\ 20} = 1465$ суток (3,7 года) [3-4].

Известно, что срок службы деталей ЗУДП на металлургических комбинатах России колеблется в пределах 16-24 мес., длительность замены доходит до 72 ч., следовательно, доменная печь ежегодно теряет производительность и растут затраты на замену ЗУДП. Износ конуса показан на рисунке 2, упрочнение конуса методом ЭШН на рисунке 3 [1-3].

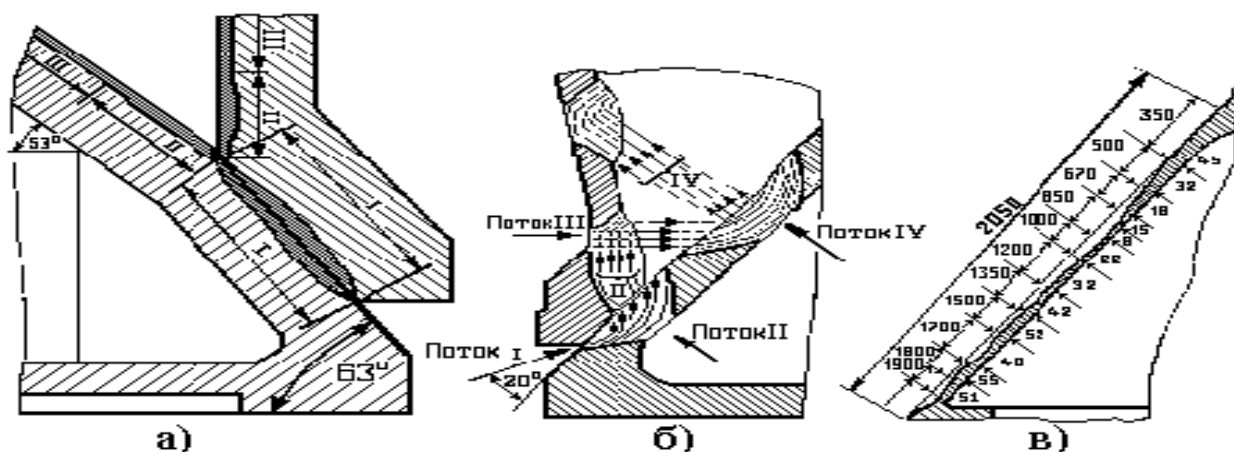
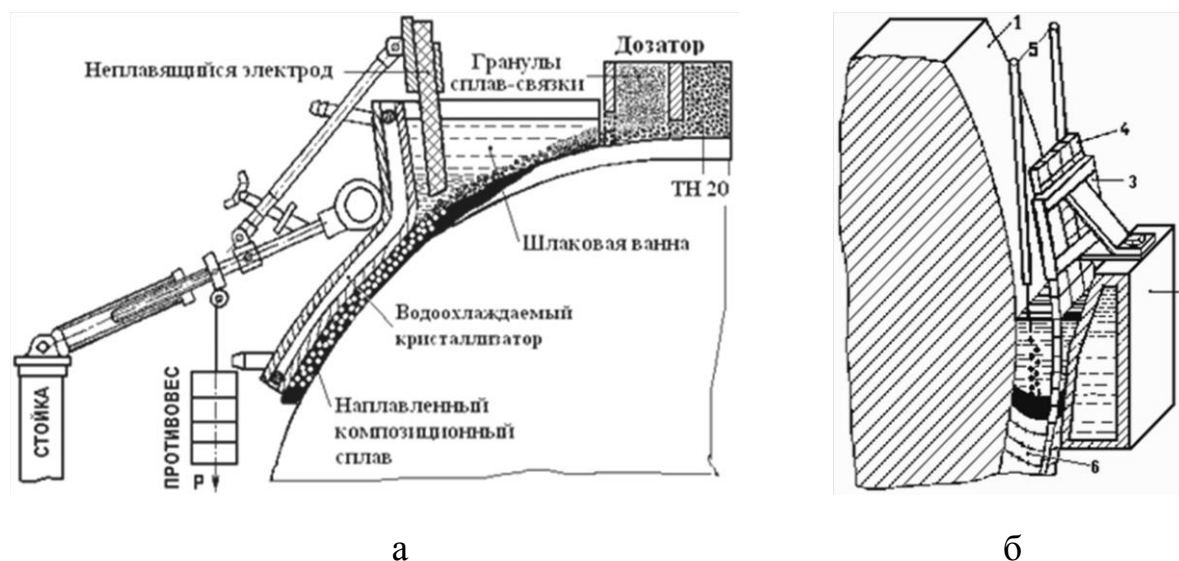


Рисунок 2 – Схема а) наплавки; б) газоабразивного износа контактного пояса; в) абразивного износа боковой поверхности ЗУДП

Наиболее интенсивному газоабразивному износу подвержен контактный пояс сопряжения конус-чаша, что является наиболее распространённой причиной выхода из строя ЗУДП. В случае неплотного запираания между большим конусом и чашей образуется щель и при наличии перепада давления в колошниковом и межконусном пространствах, запылённый колошниковый газ устремляется в эту щель и совершает в этом месте продувы. Возникающие из-за разности давления запылённого колошникового газа газовые потоки, устремляясь в эти щели, прогрессивно увеличивают эти неплотности и очень быстро превращают их в продувы (рисунок 2,б) [1-3].

Устройство для наплавки деталей ЗУДП приведено на рисунке 3,а. Устройство состоит из приспособления для крепления скользящего кристаллизатора, плотное прилегание которого к наплавляемой поверхности обеспечивается системой противовесов. Крепление неплавящегося графитового электрода обеспечивает синхронное перемещение по наплавляемой детали совместно с подвижным кристаллизатором. Формирование шлаковой ванны обеспечивается двумя боковыми и двумя торцовыми кристаллизатора. Уста-

новка для наплавки тел вращения включает манипулятор, источник питания, шкаф управления и систему водоохлаждения.



1- наплавляемая деталь; 2- кристаллизатор; 3 - устройство для формирования ЭШН; 4- спечённые пластины ТН 20; 5- электроды-порошковая проволока; 6- наплавленный слой

Рисунок 3 – Схемы ЭШН деталей ЗУДП композиционным материалом на основе ТН 20: а) Наплавка тел вращения: малых конусов и других деталей; б) наплавка контактного пояса конуса

Для удержания шлаковой ванны используется устройство, обеспечивающее плотное прилегание подвижного кристаллизатора к наплавляемой поверхности детали. Устройство для наплавки тел вращения приведено на рисунке 3,а. Устройство состоит из приспособления для крепления скользящего кристаллизатора, плотное прилегание которого к наплавляемой поверхности обеспечивается системой противовесов. Крепление неплавящегося графитового электрода обеспечивает синхронное перемещение по наплавляемой детали совместно с подвижным кристаллизатором.

На рисунке 3 б показана схема ЭШН конуса доменной печи с подачей спечённых каркасов из твёрдосплавных пластин отдельными секциями. При наплавке наплавляемый конус 1 устанавливается в манипулятор, например, У 125 М, обеспечивающий вращение детали с заданной скоростью наплавки. С помощью специального устройства поджигают водоохлаждаемый кристаллизатор 2. Спечённую секцию каркаса 4 подают в щелевой направляющий магазин 3 и закрепляют его в необходимом положении. Наводят шлаковую ванну и включают подачу электродов 5. Металлическая ванна, образующаяся в результате плавления электродов, после кристаллизации надёжно сплавляет спечённую секцию каркаса в наплавленном металле 6, который увлекает спечённую секцию из щелевого магазина со скоростью наплавки $V_{\text{напл}} = 1,4 \div 1,6$ м/ч. В освободившийся щелевой магазин устанавливают следующую секцию спечённого каркаса и таким образом осуществляют непрерывную наплавку твёрдосплавными

пластинами всей наплавляемой поверхности. При ЭШН непрерывных поверхностей тел вращения, например засыпных устройств доменных печей, установка сплошного каркаса невозможна, ибо он будет закрывать зону наплавки. Для осуществления наплавки с использованием предварительно спечённого каркаса из твёрдосплавных пластин последний будет собираться из отдельных секций, и подаваться в зону наплавки секциями с помощью щелевого направляющего магазина, который необходим для удержания и фиксации секции в заданном месте (рисунок 3,б).

Длину отдельной секции спечённого каркаса из твёрдосплавных пластин выбирают таким образом, чтобы один конец секции был уже закристаллизован в наплавленном металле не менее 20 мм, а верхний конец находился в щелевом направляющем магазине, также не менее 20 мм. При глубине шлаковой и металлической ванн, соответственно 45 и 25 мм, и расстоянии от поверхности шлаковой ванны до нижнего среза щелевого направляющего магазина 30 мм общая длина секции спечённого каркаса из твёрдосплавных пластин составит $\ell_{\text{ФАКТ}} = 400$ мм. Ширина спечённого каркаса должна соответствовать ширине контактного пояса конуса. После кристаллизации образуется износостойкий композиционный сплав, армированный твёрдосплавными пластинами, причём поверхность твёрдого сплава достигает 90÷95 % зоны интенсивного износа детали, что обеспечивает максимальную износостойкость при высокотемпературном газоабразивном износе. Для предотвращения перекоса отдельных секций спечённого каркаса и устранения зазора между секциями спечённых твёрдосплавных пластин в закристаллизовавшемся наплавленном металле минимальная длина секций должна удовлетворять условию (1) [2-3]:

$$\ell_{\min} = 2\ell_1 + h_{\text{м.в}} + h_{\text{шл.в}} + \ell_2, \quad (1)$$

где ℓ_1 – длина части секции спечённого каркаса, закреплённой в щелевом магазине или в закристаллизовавшемся металле, м;

$h_{\text{м.в}}$ – глубина металлической ванны, м;

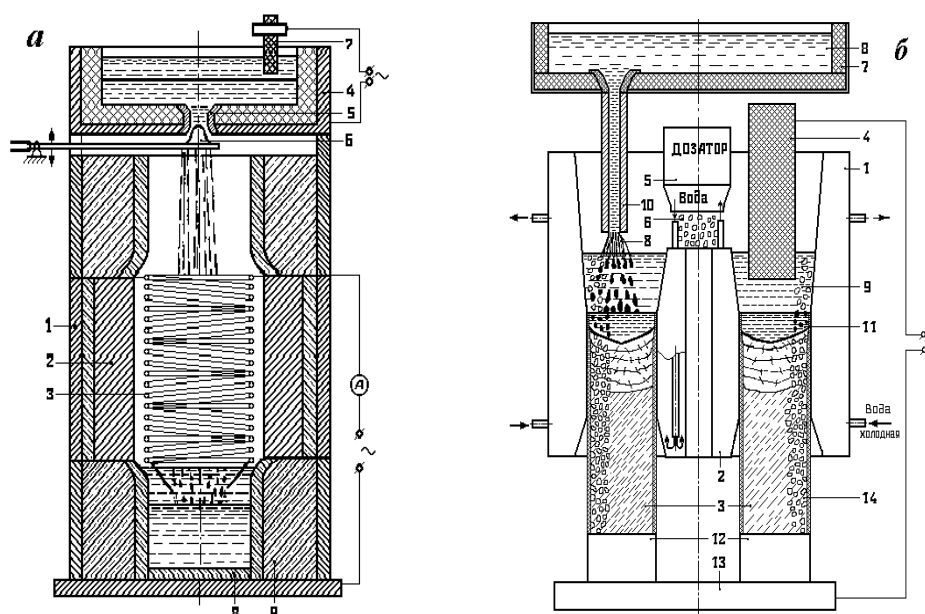
$h_{\text{шл.в}}$ – глубина шлаковой ванны, м;

ℓ_2 – расстояние от поверхности шлаковой ванны до нижнего среза щелевого направляющего магазина, м.

Если длина секции спечённого каркаса будет меньше $\ell_{\min}$, то нижний конец секции не будет зафиксирован в закристаллизовавшемся металле, а когда верхний конец секции каркаса выйдет из щелевого магазина, то ничем не удерживаемая секция каркаса не будет зафиксирована в заданном месте и произойдёт разрыв сплошности каркаса. В этом месте возникнет избирательный износ наплавленного металла, который приведёт к продувам конуса и деталь преждевременно выйдет из строя. Максимальная длина спечённого каркаса устанавливается в зависимости от диаметра наплавляемой детали и расположения направляющих мундштуков электродной проволоки или порошковой ленты таким образом, чтобы секция спечённого каркаса свободно входила в направляющие щелевого магазина, не задевая направляющих мундштуков [1-3].

На Совещании специалистов по наплавке стран-членов СНГ в ИЭС им. Е.О. Патона тема по исследованию и разработке высокопроизводительных процессов упрочнения валков горячей прокатки признана наиболее перспективной и представляющей взаимный интерес. Наиболее эффективным является применение бандажированных валков даже при однократном использовании оси, так как стойкость материала бандаж в $3\div 4$ раза выше, чем цельнокованых или литых, а применение твёрдых сплавов повышает износостойкость валков в $8\div 10$ раз, особенно для валков холодной прокатки [1-3].

Статистические данные, полученные как в России, так и за рубежом, достаточно красноречивы: 6 % всей стоимости прокатного стана составляет стоимость прокатных валков; $20\div 25$ % времени работы стана уходит на перевалки валков; в общих расходах по переделу затраты на валки по стану горячей прокатки составляют примерно $15\div 17$ %. Схема получения бандажированных валков методом ЭШН жидким металлом с использованием ТН 20 показана на рисунке 4,а.



а – изготовление бандажированных валков методом ЭШН ЖМ;
б – получение бандаж, армированного твёрдым сплавом ТН 20

Рисунок 4 - Схема изготовления бандажированных валков ЭШН ЖМ

Введение струи жидкого металла в шлаковый расплав, нагретый до высоких температур плавлением электрода-соленоида, является весьма эффективным средством интенсификации металлургических процессов, следствием которого является высокое качество металла оси прокатного валка. Дробление капель переплавляемого металла приводит к интенсификации процесса десульфурации. При переплаве недораскисленной стали содержание серы снижается с 0,011-0,013 % до 0,002-0,003 % т.е. в 4-5 раз [5].

Практика показала, что, для повышения работоспособности анализируемых деталей потребовались новые износостойкие наплавочные композицион-

ные материалы, успешно работающие в условиях высокотемпературного абразивного износа. Исследованиями установлено, что этим условиям удовлетворяет спечённый твёрдый сплав ТН 20 на основе TiC.

Выбор твёрдых частиц КМ осуществляли на основе анализа их свойств, во-первых – предельная растворимость карбидов в расплавах; во-вторых – механические, теплофизические и энергетические характеристики карбидов при воздействии высоких температур; в-третьих – разупрочнение карбидов металлов при повышенных температурах. Исследованиями установлено, что оптимальным сочетанием свойств в убывающей степени обладают твёрдые карбиды TiC, NbC и WC, поскольку имеют высокую предельную энергию разрушения 2470, 2655, и 1720 Дж/м³, высокую температуру плавления 3530, 3886 и 3058 К соответственно, при достаточно высоких механических свойствах [5-7, 10], наилучшими свойствами для КМ обладает TiC, составляющий основу ТН 20. Благодаря использованию TiC спечённый твёрдый сплав ТН 20 приобретает высокую твёрдость 86...92 HRA; микротвёрдость $H_{\mu} = 19,5...22,0$ ГПа; величину модуля упругости 445 ГПа; высокий предел прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 6,0$ ГПа, с достаточной прочностью на изгиб $\sigma_{изг} = 1,2 ...2,5$ ГПа и на растяжение $\sigma_{в} = 0,5\sigma_{изг}$, самое благоприятное свойство среди известных карбидов – высокая ударная вязкость 0,8...1,2 МДж/м² [6-7, 11]. Способность спечённых твёрдых сплавов ТН 20 сохранять указанные свойства при повышенных температурах является чрезвычайно важной характеристикой при высокотемпературном абразивном износе металлургического оборудования.

ТН 20 после спекания приобретает «кольцевую структуру» (рисунок 5), ядро – TiC, средняя зона – твёрдый раствор (Ti,Mo)C с небольшим количеством никеля и внешняя оболочка – никель-молибденовый твёрдый раствор [6-7]. Такая структура, благодаря внешней никельмолибденовой оболочке, улучшила смачиваемость металлами группы железа, повысила термостойкость и жаропрочность КМ.

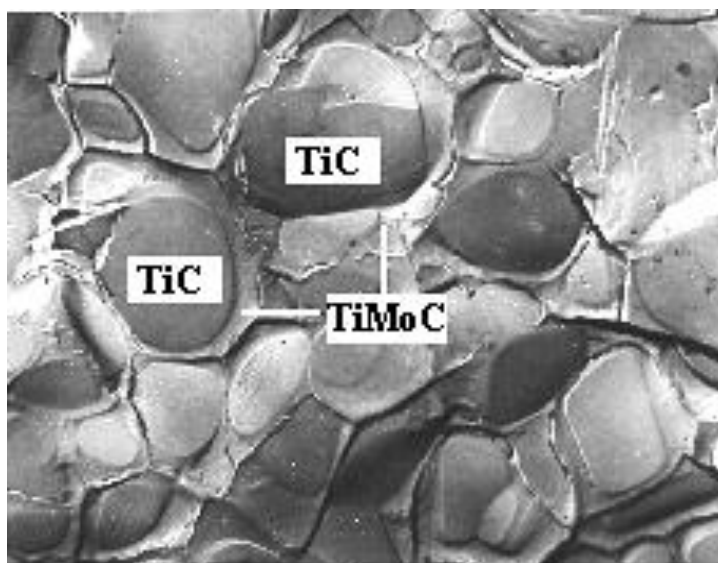


Рисунок 5 - (X 15200). «Кольцевая структура» спечённого твёрдого сплава ТН 20

Для выполнения условий выбора твёрдых частиц, особенно - разупрочнение карбидов металлов при повышенных температурах, необходимо применение низкотемпературных способов наплавки, например, ЭШН, при котором введение твёрдых частиц в зону более низких температур шлаковой ванны, причём дозированными порциями, которые вызывают ускорение кристаллизации расплава. Введение в шлаковую ванну буры или порошка борной кислоты на поверхности твёрдых частиц ТН 20 при превышении предела растворимости бора в TiC появляется фаза Ti_2B с образованием новой межфазной границы, представляющей собой карбоборид титана. На рис. 6 приведена микроструктура КМ ТН 20 + колмоной (сплав-связка колмоной содержит 3,2% В). Интенсивность роста борида на границе раздела определяется скоростью диффузии бора в его решётке, что снижает растворимость ТН 20 и образование сложнолегированных структур на поверхности раздела ТН 20 – матрица [8].

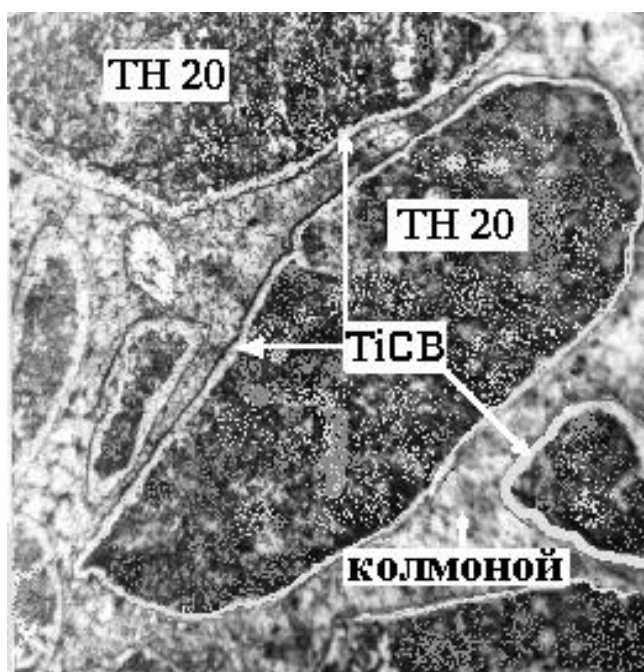


Рисунок 6 - х 120. Процесс осаждения бора на поверхности частиц ТН 20

Условия разупрочнения и предельная растворимость ТН 20 в матрице, в зависимости от образования поверхности раздела, приведены в работах [7], где даётся следующее определение: «Поверхность раздела представляет собой область с существенно изменённым химическим составом, в которой осуществляется связь между составляющими композиционной структуры и обеспечивается передача нагрузки между ними».

Установлено, что повышение объёмной доли твёрдых частиц в КМ способствует росту высокотемпературной прочности КМ за счёт снятия внутренних напряжений и выделения в матрице упрочняющих дисперсных фаз на поверхности раздела из пересыщенного твёрдого раствора при кристаллизации КМ. Это, безусловно, сказалось на повышении износостойкости при высокотемпературном абразивном износе. Кроме того, с повышением объёмной доли твёрдых частиц в наплавленном сплаве проявился «теневого эф-

фект», описанный в работах [7-8, 10] и наблюдаемый при испытаниях на высокотемпературный абразивный износ. Отмечено, что наиболее устойчивой сопротивляемостью изнашиванию при повышении температуры обладает КМ на основе спечённого твёрдого сплава ТН 20. С повышением температуры испытания от 200 до 600°C износ этого сплава практически не возрастает [9-11].

Конечной стадией управления эффективностью упрочнения сменных деталей металлургического оборудования является регулирование энергоёмкости E_{KM} , которая определяется суммарной величиной энергии, поглощаемой КМ при взаимодействии с абразивными частицами в процессе изнашивания (2):

$$E_{KM} = E_B + E_{Tp} + E_{PK} + E_{ПД} + E_{МП} + E_{ВН}; \quad (2)$$

где E_B – энергия вдавливания, характеризуется микротвердостью твёрдых частиц и абразива;

E_{Tp} – энергия зарождения и развития трещины, характеризуется свойством матрицы;

E_{PK} – энергия разрушения карбидов;

$E_{ПД}$ – энергия плотности дислокаций оценивается свойствами поверхности раздела;

$E_{МП}$ – энергия мартенситных превращений на поверхности раздела;

$E_{ВН}$ – остаточные внутренние напряжения в переходной зоне.

Подробный расчёт составляющих E_{KM} приведён в работах [3, 7, 9]. Величина износа должна быть тем меньше, чем больше энергии может поглотить КМ не разрушаясь, и чем меньше величина энергии разрушения абразивного тела E_A . В случае когда КМ может поглотить энергии больше того количества, которое абразивное тело передаёт сплаву, т.е. когда $E_A < E_{KM}$ износ за данный цикл происходить не будет. Главная роль в увеличении энергии, затрачиваемой на разрушение, принадлежит твёрдым частицам, с ростом их количества возрастает твёрдость КМ, соответственно повышаются затраты энергии на вдавливание абразива E_B , кроме того, повышается равномерность распределения дислокаций в изнашиваемом объёме. При этом будут возрастать энергии $E_{ПД}$ и E_B .

Выводы: Применение бандажированных валков, армированных твёрдыми частицами ТН 20, повышение качества осевого металла за счёт десульфурции, снижение внутренних напряжений и повышение качества сопряжённой поверхности привело к увеличению срока службы валков в 3 - 4 раза и снижению расхода валков на 1 т проката на 10510 руб./т. Расход электроэнергии на 1 кг наплавленного металла снизился в 20~ 40 раз.

Библиографический список

1. Быстров В.А. Основы электрошлаковых технологий упрочнения композиционными сплавами деталей, работающих при высокотемпературном износе. Дис. ... д-ра техн. наук. 05.03.06 – 18.12.2003, 09.04.2004 г. Барнаул АГТУ, 2003. 337 с.
2. Bystrov V.A., Verevkin V.I., Selyanin I.F. Electroslag hardening of metal-

lurgical components by means of composites / Steel in translation Изд-во: Allerton Press, // V.: 35. N.: 6, 2005, p. 35-39. Inc. ISSN: 0967-0912

3. Быстров В.А. Управление процессом упрочнения твёрдым сплавом сменных деталей металлургического оборудования/ В.А. Быстров, Т.Н. Борисова, Грекова Н.Ю., Франк Е.Я. // Фундаментальные исследования – 2018. – № 3. – С. 7-12.

4. Bystrov V.A., High temperature abrasive wear of a rotary sinter crusher / Steel in translation Изд-во: Allerton Press, // V.: 43. N.: 12, 2013, p. 788-792. Inc. ISSN: 0967-0912

5. Bystrov V.A., Verevkin V.I., Selyanin I.F., Anokhina N.K. Manufacturing composite rollers by electroslog casting / Steel in translation. Allerton Press, N.: 12, 2015, Inc. ISSN: 0967-0912

6. Быстров В.А. Теоретическое обоснование выбора твёрдых частиц композиционных материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 8. С. 53-57.

7. Bystrov V.A., Borisova T.N. The role of particulate composite materials, operating at high temperature wear. // In the World of Scientific Discoveries / / Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. 3558 South Jefferson Ave, St. Louis, Missouri 63118, USA /Volume 2, Number 2, 2014 ISSN 2331-2173 – P. 17–23.

8. Bystrov V.A., Borisova T.N. Borating of solid particles composite materials. // In the World of Scientific Discoveries / / Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. 3558 South Jefferson Ave, St. Louis, Missouri 63118, USA /Volume 2, Number 2, 2015 ISSN 2331-2173 – P. 17–23.

9. Быстров В.А. Эффективность упрочнения сменных деталей металлургических агрегатов твёрдым сплавом // Известия вузов. Черная металлургия –№ 12 (61) –2018 С.939-947

10. Быстров В.А. Математическое моделирование температурного поля шлаковой ванны ЭШН композиционных сплавов / Современные наукоемкие технологии - №8 2020 – С. 15-24.

11. Туманов А.В. Исследование кинетики смачивания TiC и TiNC расплавами интерметаллидов никеля /А.В. Туманов, Б.С. Митин// Физическая химия. 2012, – 54 № 6. – С. 1434-1437.

УДК: 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВА AL7075 ПОСЛЕ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Дробышев В.К., Михно А.Р., Панченко И.А., Лабунский Д.Н.

***Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, i.r.i.ss@yandex.ru***

Аннотация. Данная работа является начальным этапом в исследовании посвященному решению актуальной и научно-значимой проблемы повышения свойств металлических изделий, получаемых методом проволоочно-

дугового аддитивного производства. На данном этапе была проведена наплавка исследуемого образца с целью подбора оптимальных сварочных режимов для сварки алюминия полуавтоматом, проведен микрорентгено-спектральный анализ и анализ микротвердости.

Ключевые слова. сплав 7075, сварка алюминия, накопление карт, спектров, микротвердость.

INVESTIGATION OF ALLOY AL7075 AFTER ARC WELDING

Panchenko I.A., Mikhno A.R., Drobyshev V.K.

**Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, i.r.i.ss@yandex.ru**

Abstract. This work is the initial stage in a study dedicated to solving an urgent and scientifically significant problem of improving the properties of metal products obtained by the method of wire-arc additive manufacturing. At this stage, the optimal welding modes for semi-automatic aluminum welding were selected, X-ray microanalysis and microhardness analysis were carried out.

Keywords. alloy 7075, aluminum welding, accumulation of maps, spectra, microhardness.

Введение

Алюминий является одним из самых востребованных в промышленности металлом и при этом одним из самых трудно свариваемых [1-2]. Причины сложности сварки алюминия кроются в его физико-химических свойствах. Рассмотрим каждый из факторов отдельно:

1. Большая теплопроводность. Высокая теплопроводность означает, что для того, чтобы нагреть металл, потребуется значительно больше энергии дуги, т.к. тепло очень быстро передается от более нагретых зон к менее нагретым зонам и чем больше габариты свариваемой детали, тем критичнее сказывается это свойство, что приводит к необходимости в ряде случаев использовать предварительный подогрев при сварке.

2. Низкая температура плавления. Данная особенность в сочетании с высокой теплопроводностью приводит к тому, что алюминий очень легко перегреть и прожечь, а также привести к вытеканию сварочной ванны.

3. Наличие оксидной пленки. Оксидная пленка, образующаяся на поверхности алюминия, обладает значительно более высокой температурой плавления, чем сам алюминий, а также маленькой пластичностью, что в сочетании с большим коэффициентом температурного расширения алюминия может приводить к трещинам.

Металловедение космических материалов развивается преимущественно в направлении усовершенствования высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg [3-9]. В данной работе рассматривается наплавка алюминиевого сплава 7075 с последующим исследованием его свойств.

Материал и методика исследования

Для подготовки алюминия для наплавки были проведены меры по удалению оксидной пленки [10]. Это очень важная часть подготовки, т.к. оксидная пленка алюминия с течением времени способна накапливать в себе большое количество влаги и если не удалить ее перед сваркой, то вероятность образования пор возрастает в несколько раз, а это самым негативным образом влияет на механические свойства сварного шва. Для сварки алюминия вместо углекислоты для газовой защиты был использован инертный газ, такой как аргон (Ar) и для уменьшения коэффициента трения был использован тефлоновый канал для подачи проволоки. Использование капельного переноса без короткого замыкания, было обеспечено параметрами тока струйного переноса 130-140А соответственно при диаметре проволоки 1,2 мм.

Накопление карт, спектров профилей ЭДС осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе КУКУ-ЕМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом, при заданных параметрах ускоряющего напряжения 20 кВ, тока эмиссии 150 мкА и точки насыщения тока накала, составляющего 2,4 А, рабочее расстояние между образцом и объективной линзой составило 15 мм.

Исследование микротвердости было проведено с помощью микротвердомера HVS-1000. Нагрузка была постоянной для всех режимов обработки и составила 0,1Н. Время приложения и удержания нагрузки составляло 10 с, снятия испытательной нагрузки – 5 с.

Результаты и их обсуждение.

Многослойное изображение ЭДС исследуемого образца с использованием источника изображения от полупроводникового BSE-детектора представлено на рисунке 1. Результаты рентгеновских спектров представлены в таблице 1.

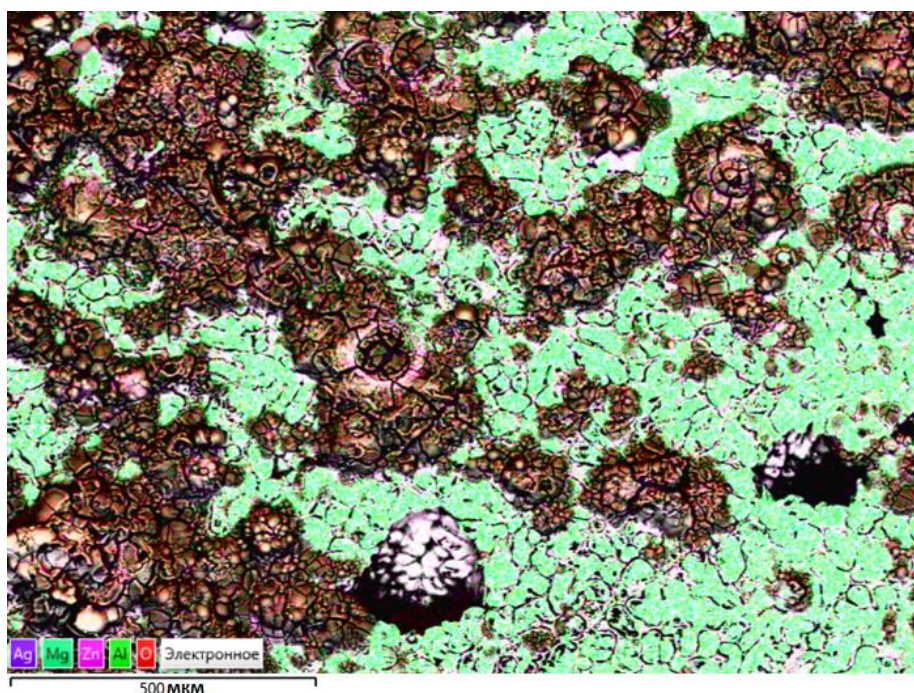


Рисунок 1 – Многослойное изображение ЭДС

Таблица 1 – Суммарный спектр карты

Элемент	Вес %
C	9,54
O	6,60
Mg	1,11
Al	76,25
Si	0,87
Mn	0,30
Cu	1,77
Zn	3,55
Всего	100,00

Анализ микротвердости, осуществленный методом Виккерса при нагрузке на индентор 0,1Н проводился по 10-ти и более измерениям. В результате выполненных исследований установлено, что среднее значение микротвердости исследуемого образца измеренное линейно через каждые 0,5 мм, составляет $72,5 \pm 10,5$ HV, что свидетельствует в целом об ее однородном распределении.

Выводы

На данном этапе работы был осуществлён подбор оптимальных параметров тока струйного переноса, который варьировался от 130А до 250А. Проведенные исследования позволили определить, что микротвердость алюминиевого сплава составляет $72,5 \pm 10,5$ HV. Результат рентгеновских спектров показал, что в сплаве содержатся следующие элементы: С – 9,54 %, О – 6,60 %, Mg – 1,11 %, Al – 76,25 %, Si – 0,87 %, Mn – 0,30 %, Cu – 1,77 %, Zn – 3.55 %.

Исследование выполнено с использованием оборудования лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений ФГБОУ ВО СибГИУ за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-79-10245.

Библиографический список

- 1 Елагин, В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии [Текст]/ В.И. Елагин / Металловед. и терм. обр-ка металлов: науч.-техн. и произв. журн.,- №9.- 2007. С. 3-11.
- 2 Фридляндер, И.Н. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе [Текст]/ И.Н. Фридляндер и др. Металлов-е и терм. обработка мет-ов: науч.- техн. и произв. журнал, №7, 2005.- С.17-21/.
3. Фриляндер, И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике [Текст]/ И.Н. Фридляндер. Вестник РАН; - т.74,-№12,-2004, 1076-1081 с.;
4. Осинцев, О.Е. Высокопрочные быстрокристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu [Текст]/ О.Е. Осинцев, В.Ю. Конкевич/ Технол. легк. сплавов: науч.-техн. и произв. журн. 2010, N 1, с. 157-163. 51

5. Пат. 2379366 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/16, С 22 F 1/057. Сплавы серии 2000 с улучшенными характеристиками стойкости к повреждениям для авиационно-космического применения [Текст]/ Лин Джен К. (США); заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (США); заявл. 14.07.2005; опубл. 20.01.2010.

6. Пат. 2009106650 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/16, С 22 F 1/057. Алюмо-медно-магниевые сплавы, имеющие вспомогательные добавки лития [Текст]/ Риоджа Роберто Дж. (США); заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (США); заявл. 25.04.2006; опубл. 10.09.2010. 73

7. Пат. 2008141814 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/057. Изделие из алюминиевого сплава с высокой стойкостью к повреждениям, в частности для применения в авиационно-космической промышленности [Текст]/ Харгартер Хинрих Йоханнес (NL). Заявитель и патентообладатель КОРУС АЛЮМИНИУМ ВАЛЬЦПРОДУКТЕ ГМБХ (DE); заявл. 21.10.2008; опубл. 27.04.2010

8. Пат. 2007133521 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Al-Zn-Cu-Mg сплавы на основе алюминия и способы их получения и применение [Текст]/ Данджерфилд Вик (US); заявитель и патентообладатель АЛКАН РОЛЛД ПРОДАКТС-РЕЙВЕНСВУД ЭлЭлСи (US), АЛКАН РЕНАЛЮ (FR); заявл. 10.02.2006; опубл. 20.03.2009.

9. Захаров, В.В. Пути развития и совершенствования высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu [Текст]/ В.В. Захаров, В.И. Елагин, Т.Д. Ростова, М.В. Самарина/ Науч.-техн. журн. «Технология легких сплавов».-№4, 2008, с. 7-13.

10. Елагин, В.И. Пути улучшения комплекса свойств полуфабрикатов из высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu типа В96Ц-3 [Текст]/ В.И. Елагин, М.В. Самарина, В.В. Захаров. Металловедение и терм. обр-ка: науч.- техн. и произв. журн.;-№11,- 2009. С. 3-6. 76 52

УДК 669.1.08.29:621.785

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Мо–Au

Филяков А.Д., Романов Д.А., Соснин К.В., Московский С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, filyakov.1999@mail.ru*

***Аннотация.** В данной работе было произведено электровзрывное напыление с последующей обработкой электронным пучком и азотированием электроэрозионно-стойкого покрытия системы Мо–Au на медные электрические контакты. При помощи методов световой микроскопии проведено исследование структуры полученного покрытия. Была определена его толщина. Обнаружены поры и светлые включения. На границе между покрытием и медной подложкой выявлены поверхностно периодические*

структуры.

Ключевые слова: электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, азотирование структура, электрический контакт/

STRUCTURE OF THE ELECTRO-EXPLOSIVE Mo–Au COATING

Filyakov A.D., Romanov D.A., Sosnin K.V., Moskovskii S.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, filyakov.1999@mail.ru*

Abstract. In this work, the electroerosion resistant Mo–Nb coating were sprayed on copper electrical contact by electroexplosive method and following electron beam treatment and nitriding. The study of the structure of the resulting coating was carried out by light microscopy methods. The thickness was determined. Pores and light inclusions have been detected. Surface periodic structures have been identified at the border between the coating and the copper substrate.

Keywords: electro-explosive spraying, electron beam treatment, nitriding, structure, electrical contact.

Одним из ключевых компонентов электрических цепей являются электрические контакты. Для обеспечения их надежности необходимо использовать металлы и сплавы [1], обладающие высокой электрической проводимостью, необходимой для минимизации тепловыделения, высокой теплопроводностью и температурой плавления, хорошей стойкостью к окислению, предотвращающей деградацию контактных поверхностей, а также низкой стоимостью. Высокая температура плавления необходима, чтобы избежать случайного перегрева из-за расплавления точек контакта, тогда как высокая теплопроводность позволяет эффективно рассеивать тепло [2].

Хотя драгоценные металлы: золото и серебро – соответствуют большинству описанных выше требований, высокая стоимость ограничивает их применение в электротехнике. С другой стороны, твердотянутая медь, активно применяемая в электрических контактах из-за ее превосходной электрической проводимости, теплопроводности и умеренно низкой цены, обладает рядом серьезных недостатков: низкой твердостью, подверженностью электрической эрозии и атмосферной коррозии, приводящей к сокращению срока службы, появлению перебоев в работе системы и проблемам безопасности.

Сочетание свойств, необходимых для безотказного функционирования электрических контактов, можно достичь при помощи композиционных материалов, содержащих матрицу из металла или сплава, армированного керамическими, металлическими или органическими соединениями, улучшающими такие свойства, как удельная прочность, жесткость, модуль упругости, износостойкость коррозионную стойкость, теплопроводность и т. д. [19]. Как правило, в основе таких материалов лежит матрица, основным свойством которой является высокая электропроводность и тугоплавкий компонент, играющий роль наполнителя с высокой износо- и электроэрозионной стойкостью [10].

Создание объемных композитов – трудоемкий процесс, включающий несколько этапов, включая смешивание порошка, прессование, спекание, экструзию, горячую прокатку и окончательную штамповку. Основной проблемой объемных композиционных материалов является хрупкость. К тому же электрическая эрозия в первую очередь разрушает поверхностный слой контакта.

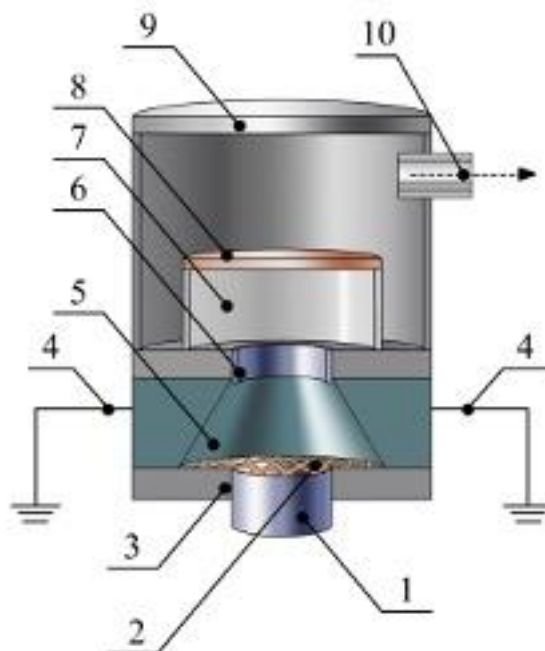
В связи с этим, в большинстве случаев экономически более целесообразно создавать покрытия на поверхности, чем полностью изготавливать деталь из композита с металлической матрицей.

В настоящее время, перспективной является разработка композитных покрытий, в основе которых лежит золотая матрица с твердыми включениями.

Альтернативой существующим методам нанесения покрытий может стать электровзрывной метод. Процесс создания покрытия в данном случае заключается в электрическом взрыве проводника и последующем оплавлением сформированной плазменной струей поверхности контакта, позволяющей сформировать на ней композиционное электроэрозионно-стойкое покрытие. В дальнейшем возможно осуществление импульсно-периодической обработки поверхности электровзрывного покрытия и азотирования.

Целью данной работы является исследование структуры электроэрозионно-стойкого покрытия системы Мо–Au, нанесенного при помощи электровзрывного напыления с последующей обработкой электронным пучком и азотированием.

Электровзрывное напыление покрытий проводили на электровзрывной установке ЭВУ 60/10М (рисунок 1).



- 1 – внутренний цилиндрический электрод, 2 – взрываемый проводник,
3 – изолятор, 4 – емкостный накопитель энергии, 5 – разрядная камера,
6 – внешний цилиндрический электрод, 7 – держатель образцов, 8 – образец,
9 – вакуумная камера, 10 – система откачки воздуха

Рисунок 1 – Схема электровзрывной установки ЭВУ 60/10 М

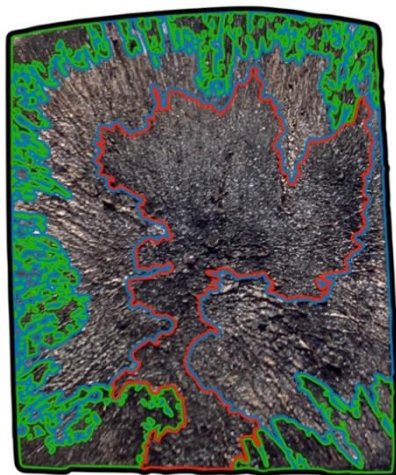
Покрyтия наносили на образцы электротехнической меди (химический состав, масс. %: Cu 99,99; Fe 0,001; Ni 0,001; S 0,001; P 0,001; As 0,001; Pb 0,001; Zn 0,001; Ag 0,001; O 0,0005; Sb 0,0005; Bi 0,0005; Sn 0,0005). Медные образцы имели форму параллелепипеда с размерами 25x25x5 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности. Электровзрывное напыление проводили с использованием золотой фольги (химический состав, масс. %: Au 99,9; Pb 0,003; Fe 0,035; Sb 0,002; Bi 0,002; Cu 0,058) массой 400 мг. На поверхности фольги размещали молибденовый порошок (дисперсность частиц 1–5 мкм) массой 200 мг. Процесс осуществляли при следующих параметрах: время воздействия плазмы на поверхность образца ~ 100 мкс; поглощаемая плотность мощности на оси струи ~ 5,5 ГВт/м²; давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности ~ 12,5 Мпа; остаточное давление газа в рабочей камере ~ 100 Па; температура плазмы на срезе серебряного сопла ~ 10⁴ К.

Облучение импульсным электронным пучком и азотирование выполняли на установке «КОМПЛЕКС». Параметры низкоэнергетического сильноточного электронного пучка; поверхностная плотность энергии – 20 Дж/см²; длительность импульсов – 200 мкс; количество импульсов – 5. Параметры азотирования; время – 5 часов; температура – 520 °С.

Подготовка шлифов перед металлографическими исследованиями включала резку образцов под прямым углом к поверхности покрытия. Распиливание осуществляли на дисковом отрезном станке по металлу отечественного производства марки СОМ-400Р с абразивным кругом. После чего производилась шлифовка и полировка. Эти операции проводили на шлифовально-полировальном станке отечественного производства марки ПОЛИЛАБ П12Лб. При шлифовке дисперсность частиц абразива уменьшалась следующим образом. Крупнозернистые 800–1000, 630–800, 500–630, 400–500, 315–400, 250–315, 200–250, 160–200, 125–160, 100–125, 80–100 и 63–80 мкм. Мелкозернистые 50–63, 40–50, 28–40, 2028, 14–20, 10–14, 7–10, 5–7 и 3–5 мкм. На каждом этапе образцы промывали в проточной воде и спирте. Финишная обработка шлифов заключалась в полировке алмазной суспензией до значений 0,05 мкм. Травление шлифов осуществляли раствором на основе плавиковой кислоты, азотной кислоты и дистиллированной воды, взятых в равном соотношении по объемным долям. Время травления составляло 15 минут.

Исследование структуры полученного покрытия проводились с применением светового микроскопа Olympus GX-71.

Визуальный осмотр образца после электровзрывного нанесения покрытия системы Мо–Au показал, что на его поверхности образуется слой серосеребристого цвета с ярко выраженным рельефом. В полученном покрытии можно выделить область серо-синего оттенка, растянувшуюся от центра к одной из граней образца. Площадь, занимаемая ей, равна 31,29 % покрытия.

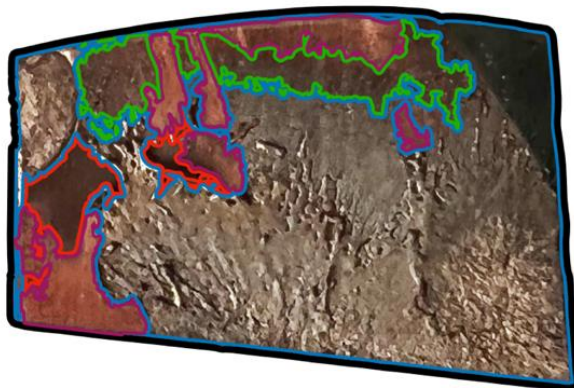


Виды рельефа, формирующие биоинертное покрытие:

- – область серо-синего оттенка, ■ – зона светло-серых оттенков со следами течения расплава по поверхности,
- – регионы темно-серых оттенков

Рисунок 2 – Поверхность образцов подвергнутых электровзрывному напылению покрытий системы Мо–Аи

Вокруг нее расположилась зона светло-серых оттенков, на которой видны следы течения расплава по поверхности. Рассматриваемый участок занимает наибольшую часть поверхности равную 44,96 %. Оставшиеся 23,75 % покрытия занимают регионы темно-серых оттенков, расположенные на периферии образца.



Виды рельефа, формирующие биоинертное покрытие:

- – слой серо-золотистого цвета с ярко выраженным рельефом,
- – переходные области, ■ – области медного цвета,
- – участки с почерневшей потускневшей медью

Рисунок 3 – Поверхность образца, подвергнутого электровзрывному напылению покрытий системы Мо–Аи с последующей электронно-пучковой обработкой и азотированием

После импульсной электронно-пучковой обработки и обработки электровзрывного покрытия системы Мо–Аи на поверхности медного образца сформировался плотный слой серо-золотистого цвета с ярко выраженным рельефом. Он занимает 71,73 % поверхности. С одной из сторон к нему при-

мыкают переходные области, на которых через тонкий слой покрытия можно разглядеть медную основу. Суммарно они занимают 10,80 % поверхности. По периметру образца к ним примыкают области медного цвета. Представленная ими суммарная доля поверхности равна 6,86 %. Наименьшей площадью 4,08 % обладают участки, на которых виднеется потускневшая и почерневшая медь.

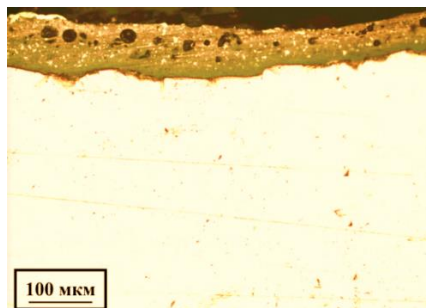


Рисунок 4 – Характерное изображение структуры поперечного сечения композиционного покрытия системы Мо–Au. Световая микроскопия

Методом световой микроскопии проведены исследования структуры поперечного шлифа системы «покрытие/подложка», сформированной электровзрывным методом с последующей электронно-пучковой обработкой и азотированием. Максимальная толщина покрытия системы Мо–Au достигает 108 мкм, а минимальная – 38,4 мкм, при среднем показателе 76,8 мкм.

Структура исследуемого покрытия неоднородна. В слое со средней толщиной 29 мкм, прилегающем к поверхности покрытия, расположены множественные поры, средний диаметр которых равен 8 мкм. Кроме них также присутствуют крупные отверстия с диаметром более 20 мкм.

В объеме покрытия встречаются множественные светлые включения различной формы, размер которых варьируется от нескольких мкм до десятков мкм. Стоит отметить, что более крупные включения расположены ближе к поверхности покрытия. В слое покрытия толщиной 8 мкм, прилегающем к границе раздела «покрытие/подложка», подобные включения не наблюдаются.

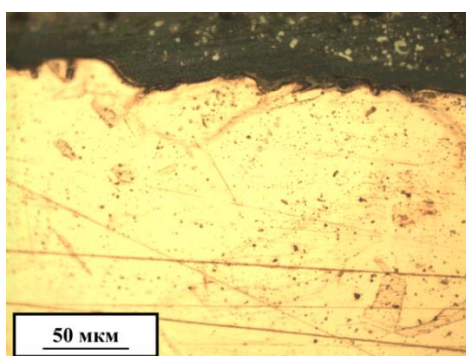


Рисунок 5 – Характерное изображение поверхностно периодических структур на границе между покрытием Мо–Au и медной подложкой.

Световая микроскопия

На границе между покрытием и медной подложкой видны поверхностно периодические структуры (рисунок 5), имеющие волнообразный харак-

тер. Подобный рельеф формируется в результате неустойчивости Релея-Тейлора на границе, отделяющей расплавленный материал подложки и жидкий металл электрически взорванной фольги.

Заключение

В настоящей работе было произведено электровзрывное напыление покрытий системы Мо–Au на медную подложку с последующей электронно-пучковой обработкой и азотированием. При помощи метода световой микроскопии была определена толщина созданного защитного слоя и его структура. Обнаружены поры и светлые включения. На границе между покрытием и медной подложкой образуются поверхностно периодические структуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания 0809-2021-0013.

Библиографический список

1. Grandin M., Wiklund U. Friction, wear and tribofilm formation on electrical contact materials in reciprocating sliding against silver–graphite // Wear. 2013. Vol. 302. № 1-2. P. 1481–1491.
2. Findik F., Uzun H. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials // Materials & Design. – 2003. – Vol. 24. – №. 7. – P. 489 – 492.

УДК 621.771.65

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРОКАТА ИЗ ОТБРАКОВКИ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ

Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В.

***Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, umanskii@bk.ru***

Аннотация. *Исследованиями процессов прокатки сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей, проведенными с использованием программного комплекса «DEFORM-2D», определено, что увеличение частных обжатий, частоты кантовок и температуры прокатки приводит к формированию более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла, а, следовательно, снижает вероятность образования дефектов. Применительно к технологии прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали установлено, что повышение температуры начала их прокатки снижает трещинообразование в процессе деформации. Определен оптимальный температурный режим прокатки мелющих шаров из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф, использование которого позволяет повысить их ударную стойкость при минимальном снижении производительности шаропрокатного стана.*

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние металла, мелющие шары, рельсовая сталь, прокатка, ударная стойкость, дефекты*

STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF METAL IN THE PRODUCTION OF VARIOUS TYPES OF ROLLED PRODUCTS FROM THE REJECTION OF RAIL STEEL BILLETS

Umanskii A.A., Simachev A.S., Dumova L.V.

***Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, umanskii@bk.ru***

Abstract. *Studies of rolling processes of high-grade billets from the rejection of rail steels, carried out using the DEFORM-2D software package, determined that an increase in partial compressions, the frequency of edging and the rolling temperature leads to the formation of a more favorable scheme of the stress-strain state of the metal, and, consequently, reduces the likelihood of defects. With regard to the technology of rolling grinding balls from the rejection of rail steel, it was found that an increase in the temperature of the beginning of their rolling reduces cracking during deformation. The optimal temperature regime of rolling grinding balls from the rejection of K76F grade rail steel has been determined, the use of which makes it possible to increase their impact resistance with a minimal decrease in the productivity of the ball rolling mill.*

Key words: *stress-strain state of metal, grinding balls, rail steel, rolling, impact resistance, defects*

В последние годы рядом предприятий, в том числе ОАО «Гурьевский металлургический завод» («ОАО «ГМЗ»), АО «ЕВРАЗ ЗСМК», освоено массовое производство мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей. Данный факт обусловлен значительным уровнем указанной отбраковки, возникающей вследствие ужесточения требования внутренней нормативной документации на предприятиях производящих рельсовую продукцию, как к качеству готовых рельсов, так и к качеству полупродукта (заготовок). Фактически значительная доля отбракованных заготовок не имеет выраженных дефектов и не соответствует требованиям производителей только по химическому составу, что и предопределяет возможность их переработки в мелющие шары.

Вместе с тем, поскольку химический состав рельсовых сталей отличается от специализированных шаровых сталей (повышенным содержанием углерода и марганца, легированием ванадием), то производство шаров из рельсовых сталей сопровождается рядом объективных трудностей. В частности имеет место недостаточная ударная стойкость таких шаров, связанная с наличием внутренних дефектов, в свою очередь обусловленных пониженной пластичностью стали. Одним из необходимых условий для разработки эффективных режимов прокатки мелющих шаров из рельсовых сталей является получение обоснованных данных о напряженно-деформированном состоя-

ния (НДС) металла в процессе прокатки таких шаров, поскольку именно схема НДС металла определяет вероятность образования и развития дефектов при прокатке. При этом, поскольку технологическая схема производства мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей включает в себя, помимо самой прокатки шаров, также и производство промежуточных заготовок, то необходимо исследовать НДС металла для условий, как станов поперечно-винтовой прокатки, так и сортовых прокатных станов.

В рамках представленной работы проведены исследования НДС металла при прокатке сортовых заготовок и мелющих шаров диаметром 60 мм из отбраковки заготовок рельсовой стали марки К76Ф в ОАО «ГМЗ». Режим прокатки сортовых заготовок в условиях указанного предприятия представлен в таблице 1.

Исследования проводили с использованием специализированного программного комплекса «DEFORM-2D», принцип работы которого основан на методе конечных элементов [1-3]. В качестве параметра, характеризующего НДС металла в данном программном комплексе выступает критерий Кокрофта-Лэтэма [4], который по своей сути является аналогом известного показателя «степень использования запаса пластичности», введенного В.Л. Колмогоровым [5]:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – накопленная пластическая деформация;

$d\bar{\varepsilon}$ – приращение накопленной деформации;

σ^* – максимальное главное растягивающее напряжение;

$\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений.

Таблица 1 – Режим прокатки заготовок диаметром 60 мм на ОАО «ГМЗ»

Наименование клетей	Номер прохода	Форма калибра	Сечение раската, мм		Обжатие, мм
			высота	ширина	
заготовка			150	150	
Обжимная клеть 700	1	ящичный	136	154	14
	2	ящичный	114	160	22
	кантовка на 90°				
	3	ящичный	117	134	43
	4	ящичный	95	138	22
	кантовка на 90°				
	5	ящичный	98	104	40
Клеть 1 (стан 500)	1	ящичный	70	116,6	34
	2	ящичный	54	124	16
	кантовка на 90°				
	3	ребровой овал	85	77	44

Продолжение таблицы 1

Наименование клетей	Номер прохода	Форма калибра	Сечение раската, мм		Обжатие, мм
			высота	ширина	
кантовка на 90°					
Клеть 2 (стан 500)	1	овал	61	98	16
	кантовка на 90°				
	2	ребровой овал	70	66	28
кантовка на 90°					
Клеть 3 (стан 500)	1	овал	54	84	12
кантовка на 90°					
Клеть 4 (стан 500)	1	круг	59,8	59,8	24,2

Необходимо отметить, что с целью повышения точности результатов моделирования использовали экспериментальные зависимости сопротивления пластической деформации рассматриваемой рельсовой стали от термомеханических параметров прокатки и закономерности изменения сопротивления пластической деформации по сечению исходных заготовок, ранее полученные авторами [6-7].

По результатам проведенных исследований установлено, что при прокатке сортовых заготовок из отбраковки рельсовых сталей распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската носит неравномерный характер. Так, максимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма имеют место в приповерхностных зонах раската, расположенных вблизи вертикальных осей калибров (рисунок 1). При этом выявлено нелинейное повышение максимальных по сечению значений критерия Кокрофта-Лэтэма по мере прокатки.

Следует отметить, что поскольку величина критерия Кокрофта-Лэтэма напрямую определяет вероятность образования и интенсивность развития дефектов при прокатке, то для дальнейшего анализа использована максимальная величина данного параметра по сечению раската.

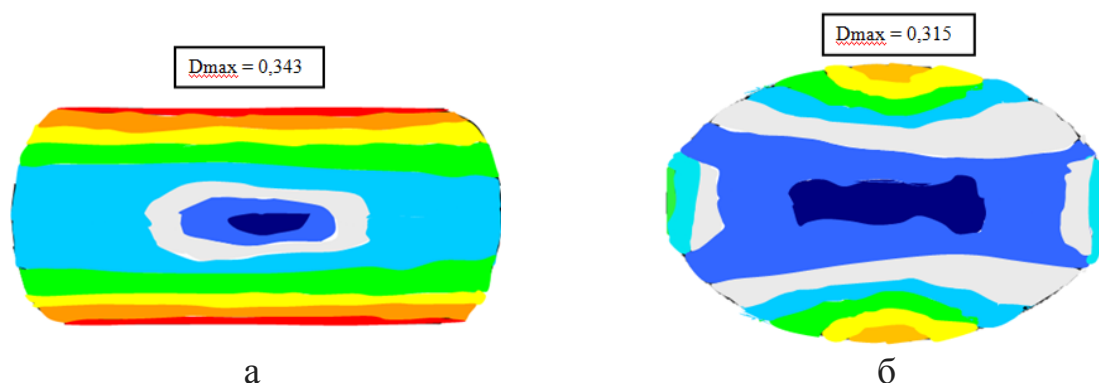


Рисунок 1 – Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раскатов при производстве сортовых заготовок диаметром 60 мм из отбраковки рельсовой стали марки К76Ф: а – второй проход в клетях «1» стана «500» (таблица 1); б – проход в клетях «3» стана «500» (таблица 1)

На основании обработки данных с использованием регрессионного и дисперсионного анализов установлено, что повышение коэффициента вытяжки, дополнительные кантовки раската и увеличение температуры прокатки обуславливают снижение максимальных значений Кокрофта-Лэтэма по сечению раската.

Влияние коэффициента вытяжки на критерий Кокрофта-Лэтэма связано с более интенсивным разогревом поверхностных слоев металла при увеличении обжатий, что способствует снижению неравномерности распределения температуры по сечению раската. Влияние кантовок раската на критерий Кокрофта-Лэтэма также связано с уменьшением неравномерности распределения температурных полей по сечению раската, поскольку при кантовках имеет место обновление слоев металла, непосредственно контактирующих с прокатными валками. Влияние температуры прокатки на критерий Кокрофта-Лэтэма связано с повышением пластичности рельсовой стали при увеличении температуры ее прокатки.

Полученные результаты обобщены в виде уравнений регрессии:

- при отсутствии предварительной кантовки раската:

$$D_{\max} = 3,986 \cdot 1,012^n \cdot e^{-0,0015 \cdot t} (-0,0523 \cdot \lambda + 0,5183) \quad (2)$$

- с предварительной кантовкой раската:

$$D_{\max} = 7,521 \cdot 1,012^n \cdot e^{-0,0017 \cdot t} (-0,0283 \cdot \lambda + 0,2942), \quad (3)$$

где $D_{\max}$ – максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската;

λ – коэффициент вытяжки;

n – номер прохода от начала прокатки (с учетом всех проходов);

t – температура прокатки, °С.

Полученные данные свидетельствуют, что эффективными направлениями повышения качества сортовых заготовок, прокатываемых из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей, являются:

- интенсификация режима прокатки (повышение частных коэффициентов вытяжек при общем снижении количества пропусков);

- повышение частоты кантовок раската в процессе прокатки;

- повышение температуры деформации.

Согласно полученных результатов моделирования прокатки мелющих шаров максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма имеет место в зоне под ребордой (рисунок 2). Данный факт обусловлен тем, что в процессе поперечно-винтовой прокатки при разделении шаров в указанной зоне критерий Кокрофта-Лэтэма повышается до разрыва перемычки, достигая значения равного 1. С учетом указанной особенности более правильно при проведении анализа учитывать максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма вне зоны воздействия реборд.

По полученным данным (рисунок 3) повышение температуры прокатки шаров приводит к снижению максимального значения критерия Кокрофта-Лэтэма в осевой зоне шаров, что не противоречит результатам ря-

да исследований о влиянии температуры деформации на образование и развитие дефектов в центральной зоне шаров при поперечно-винтовой прокатке [8-9].

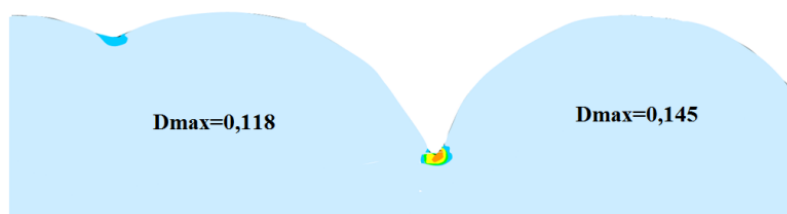


Рисунок 2 – Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению шаров при их прокатке из отбраковки рельсовой стали К76Ф

Дополнительные исследования влияния температуры прокатки мелющих шаров на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний, проведенные с использованием регрессионного анализа, подтвердили результаты моделирования – повышение температуры прокатки шаров в фактическом интервале ее изменения (900-980 °С) приводят к снижению указанной отбраковки:

$$B_{\text{КОПР}} = 17,9 - 0,015 \cdot [t], \quad (4)$$

где $B_{\text{КОПР}}$ – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний, %;
 t – температура начала прокатки шаров, °С.

Результаты ранее проведенных исследований свидетельствуют, что максимальная пластичность рельсовой стали марки К76Ф, а следовательно и минимальная вероятность образования дефектов при прокатке имеет место при температурах деформации 1100-1150 °С [10]. Однако следует учитывать, что повышение температуры прокатки до указанных значений (1100-1150 °С) приведет к значительному снижению производительности шаропрокатного стана, поскольку увеличится длительность остывания шаров на конвейере до достижения необходимой температуры закалки (780-860 °С) (рисунок 4).

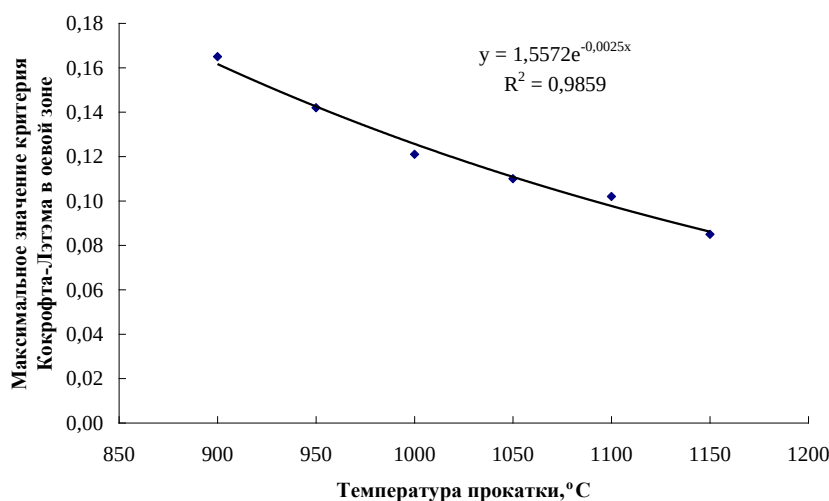


Рисунок 3 – Влияние температуры прокатки мелющих шаров из стали К76Ф на максимальное значение критерия Кокрофта-Лэтэма в их осевой зоне

С учетом вышесказанного для условий ОАО «ГМЗ» оптимальным является режим деформации с температурой начала прокатки, равной 1030°C, что подтверждено результатами исследований (таблица 2). Использование данного температурного режима прокатки позволяет с одной стороны снизить количество трещин в мелющих шарах и, следовательно, повысить их ударную стойкость, и, с другой стороны, избежать значительной потери производительности шаропрокатного стана.

Таблица 2 – Влияние температуры прокатки шаров из рельсовой стали К76Ф на их ударную стойкость

Температура начала прокатки, °С	Доля шаров выдержавших 75 ударов, %	Доля шаров, не выдержавших испытания, % (количество ударов до разрушения)	Доля шаров с внутренними трещинами после прокатки (до закалки), %
980	86	14 (12-29)	12
1030	100	0	0

Заключение

На основании моделирования процессов прокатки сортовых заготовок и мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали марки К76Ф в условиях АО «ГМЗ», проведенного с использованием программного комплекса DEFORM-2D, определены следующие закономерности:

- увеличение частных обжатий, частоты кантовок и температуры прокатки приводит к формированию более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния металла, а, следовательно, снижает вероятность образования дефектов при прокатке сортовых заготовок;

- повышение температуры начала прокатки мелющих шаров снижает интенсивность развития трещин в процессе деформации, что подтверждено дополнительными статистическими исследованиями влияния температуры прокатки на результаты копровых испытаний шаров производственных условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-29-20170, за счет гранта Кемеровской области - Кузбасса.

Библиографический список

1. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса «DEFORM» / А. А. Харламов, А. П. Латаев, В. В. Галкин, П. В. Уланов. // САПР и графика. – 2005. – №5. – С. 2-4.
2. Оден, Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден. – М.: Мир, 2006. – 464 с.
3. Kobayashi, S. Metal forming and the Finite-Element Method / S. Kobayashi, S-I. Oh, T. Altan. – Oxford: Oxford University Press, 1989. – 333 p.
- 4 Cockcroft M. G., Latham D. J. Ductility and Workability of metals // J. Inst. Metals. 1968. Vol. 96. P. 33-39.

5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. - Екатеринбург: Издательство УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
6. Уманский, А. А. Исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей / А. А. Уманский, А. В. Головатенко, М. В. Темлянцев, В. В. Дорофеев. // Черные металлы. 2019. № 6. С. 24-28.
7. Уманский, А. А. Исследование влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф на сопротивление пластической деформации / А. А. Уманский, М. В. Темлянцев, А. С. Симачев, Л. В. Думова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2020. № 2. С. 32-37.
8. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the Deform 3D software package // Russian Metallurgy (Metally). 2011. No. 3. P. 188 - 193.
9. Филиппова, М. В. Усилия и напряжения при прокатке шара / М. В. Филиппова, В. Н. Перетятько, С. В. Сметанин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 8. С. 587-588.
10. Уманский, А. А. Разработка технологии производства мелющих тел с повышенными эксплуатационными свойствами из отбраковки рельсовых сталей / А. А. Уманский, А. С. Симачев, Л. В. Думова // Черные металлы. 2021. Т. 2021. № 5. С. 57-62.

СЕКЦИЯ 4: РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА, ОХРАНА ТРУДА

УДК 669

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО КОНЦЕНТРАТА, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ УГЛЕОТХОДОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б., Кунц О.А.

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, Россия, akhrorbek001@mail.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты физико-химических исследований (РФА, СЭМ, EDX) железосодержащего концентрата, выделенного из углеотходов обогатительной фабрики методом магнитной сепарации. Установлено, что концентрат характеризуется высоким содержанием разливных железосодержащих соединений FeO , Fe_2O_3 , Fe_2O_4 , MgFe_2O_4 . Формирование диффузионного гало обоснованно наличием полуморфизированного двух- трехкальцевого силиката $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Также на рентгенограмме присутствуют слабые дифракционные максимумы, соответствующие углероду (графит-С). Морфология частиц, выделенного железосодержащего концентрата, представлена остроугольными объектами. На поверхности частиц, присутствует множество прикрепленных частиц, размером $1\div 2$ мкм. Интенсивность спектра Fe составляет до 70 мас. %.

Ключевые слова: металлургические отходы, утилизация, сырье, концентрат, магнитное разделение, углеотход. физико-химические исследования.

PHYSICO-CHEMICAL STUDIES OF THE IRON-CONTAINING CONCENTRATE OF THE ISOLATED FROM CARBON WASTE FACTORY

Shekhovtsov V.V., Skripnikova N.K., Ulmasov A.B., Kunz O.A.

*Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Tomsk, Russia, akhrorbek001@mail.ru*

Abstract. The paper presents the results of physical and chemical studies (XRF, SEM, EDX) of the iron-containing concentrate isolated from the coal waste of the processing plant by the method of magnetic separation. It has been established that the concentrate is characterized by a high content of draft iron-

containing compounds FeO , Fe_2O_3 , Fe_2O_4 , MgFe_2O_4 . The formation of a diffusion halo is substantiated by the presence of a semi-amorphized two- or three-calcium silicate $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. There are also weak diffraction maxima corresponding to carbon (graphite-C) on the X-ray diffraction pattern. The morphology of the particles of the isolated iron-containing concentrate is represented by acute-angled objects. On the surface of the particles, there are many attached particles, $1\div 2\ \mu\text{m}$ in size. The intensity of the spectrum of Fe is up to 70 wt. %.

Keywords: metallurgical waste, recycling, raw materials, concentrate, magnetic separation, coal waste.

Основная тенденция сегодняшнего дня это – высокое качество продукции в условиях растущей конкуренции как на внутреннем, так и на международном рынке. Стоит выделить спрос экономических изменений на новые, альтернативные способы переработки материалов. Одной из актуальных областей является обращение с отходами металлургического производства. Вклад металлургических комплексов в общее количество твердых отходов, ежегодно образующихся в мире, является определяющим и составляет около 25 млрд. тонн, в том числе в России более 7 млрд. тонн или 38-40 % [1] от общего количества [2-5]. Проблема использования техногенных отходов для России имеет особое значение, поскольку отечественная промышленность функционирует в экстремальных, не имеющих аналогов, социально-экономических и технологических условиях [6-8].

Основным видом металлургического сырья является концентрат, состоящий из природных минералов, в котором содержание металла достаточно высоко. Магнитное разделение является, эффективным способом отделения ценных компонентов железной руды от диамагнитных включений, поскольку извлекаемые соединения железа обладают высокой магнитной восприимчивостью (как правило, $20\text{--}90\cdot 10^{-7}\ \text{м}^3/\text{кг}$). На сегодняшний день для выделения железосодержащего компонента в горнодобывающей промышленности используется технология предварительного обогащения полезных ископаемых [9-10]. Технология включает использование дробильно-обогащительного оборудования (магнитная сепарация размолотых материалов). Тем не менее, некоторые предприятия используют флотационный метод выделения железосодержащего концентрата. Однако этот способ является длительным и более технически сложным, поскольку требует тщательной сушки железных концентратов и локального хранения их в резервуаре. Таким образом, целью данной работы является установить возможность выделения, железосодержащего концентрата, из углеотходов обогащательной фабрики.

Эксперименты проводились на разработанной лабораторной установке для магнитной сепарации техногенных отходов. На рисунке 1 представлен общий вид (фотография) и принципиальная схема установки магнитного сепаратора.

Установка магнитной сепарации, техногенных отходов, включает в себя резервуар (1) объемом 4 л, выполненного из нержавеющей стали марки 12X18H10T. На внешние стенки установлен соленоид (2), позволяющий реа-

лизовать магнитное поле, с целью притяжения железосодержащих частиц, на внутренние стенки резервуара. Установка оборудована двумя емкостями (3, 4), предназначенных для сбора железосодержащего концентрата и немагнитной части техногенных отходов. Система подачи сырья представлена порошковым дозатором (5) тарельчатого типа, производительность которого составляет 2-10 кг/ч. Установка оснащена системой подачи воздуха, для осуществления процесса подачи сырья (ротаметр РМ-02-0.63 ГУЗ). Позицией (9) обозначена заслонка для переключения направления потока порошковой смеси в емкости, для сбора необходимого концентрата. Позицией (10) отмечен дополнительный клапан продувки резервуара. В основу работы магнитного сепаратора положено накопление железосодержащего концентрата на внутренних стенках камеры, за счет создаваемого магнитного поля. Стоит отметить, что установка позволяет реализовать циклическую обработку с целью повышения качества получаемого железосодержащего концентрата.



Рисунок 1 - Установка магнитной сепарации железосодержащего концентрата из техногенных отходов: а) общий вид установки; б) схема. Обозначения смотреть по тексту

На рисунке 2 представлены результаты рентгенофазового анализа, выделенного железосодержащего концентрата из углеотходов обогатительной фабрики.

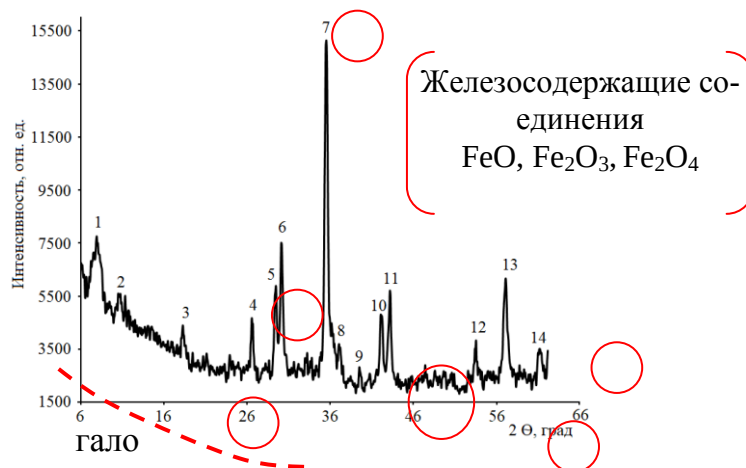


Рисунок 2 - Рентгенограмма железосодержащего концентрата, выделенного из углеотходов обогатительной фабрики

Фазовый состав, выделенного концентрата на основе углеотходов обогатительной фабрики УОШ, характеризуется высоким содержанием разливных железосодержащих соединений такими как: оксид железа (II) – FeO ($d=0,214$ нм), оксид железа (III) – Fe_2O_3 ($d=0,484$ нм; $d=0,334$ нм), магнезиоферрит – MgFe_2O_4 ($d=0,252$ нм; $d=0,241$ нм). Формирование диффузионного гало обоснованно наличием полуаморфизированного двух-трехкальцевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), которые имеют следующие межплоскостные расстояния ($d=0,214$ нм; $d=0,208$ нм). Также на рентгенограмме присутствуют слабые дифракционные максимумы, соответствующие углероду (графит) – C ($d=1,101$ нм; $d=0,827$ нм; $d=0,171$ нм).

На следующем этапе рассматривалась морфология и элементный состав выделенного железосодержащего концентрата, выделенного из углеотходов обогатительной фабрики. На рисунке 3 представлены электронные снимки железосодержащего концентрата, выделенного из углеотходов обогатительной фабрики УОШ.

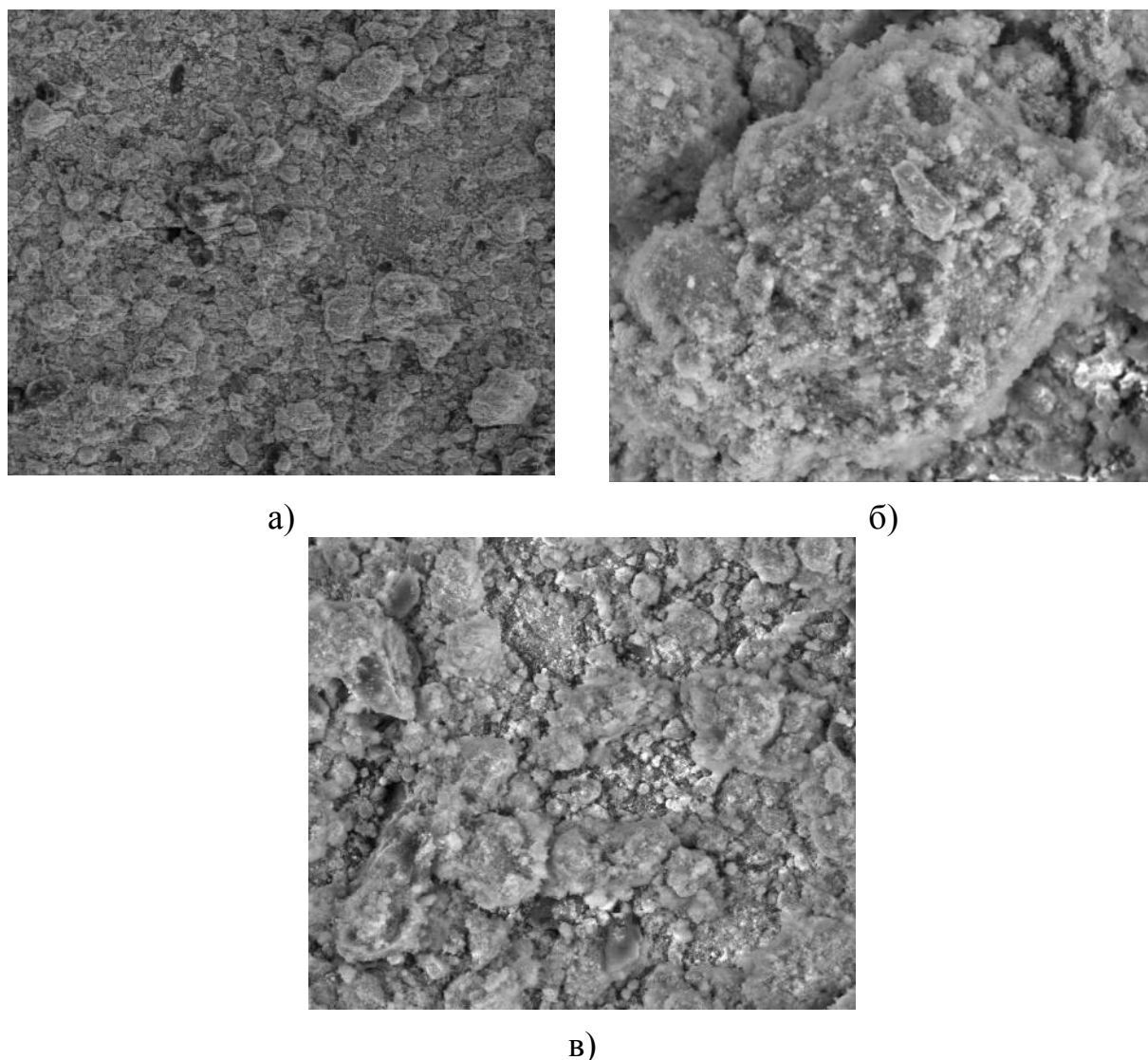
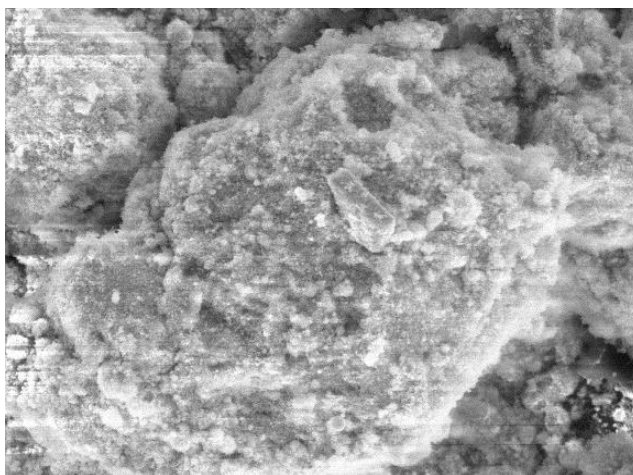
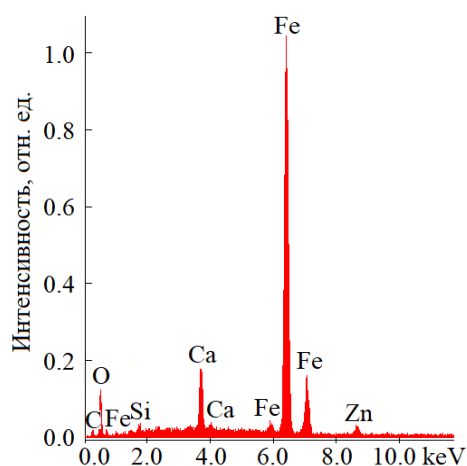


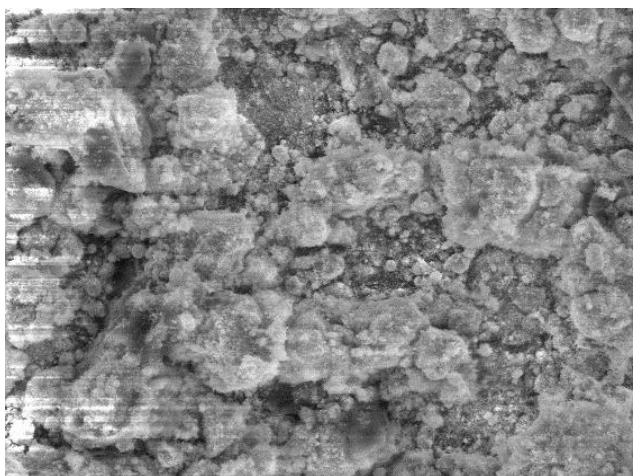
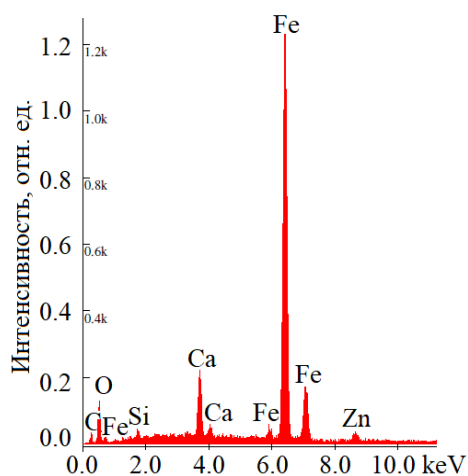
Рисунок 3. Электронные снимки железосодержащего концентрата выделенного из углеотходов обогатительной фабрики:

а) увеличение 150 раз; б) $\times 1100$; в) $\times 800$

Анализируя морфологию выделенного железосодержащего концентрата из углеотходов обогатительной фабрики видно, что форма частиц имеет вид остроугольного очертания. На поверхности частиц, присутствует множество прикрепленных (приплавленных) частиц, размером 1÷2 мкм. На рисунках 4 представлены *энергодисперсионные* спектры, отображающие элементный состав на поверхности частиц различного размера.



а)



б)

Рисунок 4 - Детальный анализ морфологии и элементного состава железосодержащих частиц: а) размер частиц 120-150 мкм; б) размер частиц 10-50 мкм

В таблице 1 представлено натуральное сравнение массового и атомного содержания элементов в выделенном железосодержащем концентрате.

Анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод о содержании железа в выделенном концентрате. Интенсивность спектра (железо) составляет до 70 мас. %, что говорит о наилучших показателях из всех выделенных концентратов. Однако следует отметить присутствие в концентрате в виде соединений кремния (1 мас. %), кальция (5 мас. %) и цинка (3 мас. %).

Таблица 1 - Сравнение интенсивности спектров

Список элементов	мас. %	атм. %
	Спектр 1 / Спектр 2	Спектр 1 / Спектр 2
C	5,89 / 9,71	17,81 / 27,28
O	11,88 / 10,89	26,96 / 22,98
Si	1,14 / 1,27	1,47 / 1,53
Ca	5,16 / 5,27	4,67 / 4,44
Fe	70,60 / 68,27	45,91 / 41,26
Zn	3,38 / 3,16	1,88 / 1,63
Итого	100 / 100	100 / 100

Таким образом, в работе представлены результаты физико-химических исследований (РФА, СЭМ, EDX) железосодержащего концентрата выделенного из углеотходов обогатительной фабрики методом магнитной сепарации. Установлено, что концентрат характеризуется высоким содержанием разливных железосодержащих соединений FeO , Fe_2O_3 , Fe_2O_4 , MgFe_2O_4 . Формирование диффузионного гало обоснованно наличием полуаморфизированного двух- трехкальцевого силиката $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Также на рентгенограмме присутствуют слабые дифракционные максимумы, соответствующие углероду (графит-С). Морфология частиц, выделенного железосодержащего концентрата, представлена остроугольными объектами. На поверхности частиц, присутствует множество прикрепленных (приплавленных) частиц, размером $1 \div 2$ мкм. Интенсивность спектра Fe составляет до 70 мас. %.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001

Библиографический список

1. Мазуркин П.М., Солдатова В.А. Инновационные закономерности в образовании и переработке твердых бытовых отходов / Современные проблемы науки и образования. 2008. № 6. С. 51-58.
2. Большаков В.И. Нестеров А.С., Коваленко А.Г., Кузнецов А.М., Зубенко А.В. Эффективная работа аглодоменного производства ПАО ЕМЗ при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей / Сталь. 2014. № 11. С. 7-9.
3. Brožová S., Pustějovská P., Jursová S., Ingaldi M. Economic and technological aspects of the use of secondary metal-bearing raw materials for metallurgical production / METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 110980.
4. Mouedhen I., Coudert L., Blais J.-F., Mercier G. Prediction of physical separation of metals from soils contaminated with municipal solid waste ashes and metallurgical residues / Waste Management. 2019, Vol. 93, pp. 138-152.
5. Dana-Adriana Iluțiu-Varvara, Carmen Maria Mârza, Florin Vasile Domnița Ioana - Monica Sas –Boca, Marius Tintelecan. An Assessment of the Metallic Iron Content from Metallurgical Wastes - Essential Factor for Sustainable Development in the Steelmaking Industry / Procedia Engineering. 2017, Vol. 181, pp.

357-362.

6. Santhana Krishnan et al. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview / Environmental Technology & Innovation. 2021, Vol. 22, pp. 101525.

7. Oliinyk T.A., Mulyavko V. I., Sklyar L.V., Yehurnov A.I., Oliinyk M.O. Perspectives of use of technogenic raw materials of the metallurgical enterprises as weighting compounds of mineral suspensions / XVIII International Coal Preparation Congress. 2016, pp 391-396.

8. Casper van der Eijk, Halvor Dalaker Recovery of Copper, Iron, and Alumina from Metallurgical Waste by Use of Hydrogen / REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles. 2022, Vol. 1, pp 729-737.

9. Krasnodębska-Ostręga B., Paldyna J., Kowalska J., Jedynak Ł., Gólimowski J. Fractionation study in bioleached metallurgy wastes using six-step sequential extraction / Journal of Hazardous Materials. 2009, Vol. 167, No. 1–3, pp. 128-135.

10. Rudskoi A.I. Compaction of heterophase mechanical mixtures in production processes of utilizing industrial wastes (final tailings) at enterprises of ferrous metallurgy / Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013, Vol. 54, No. 6, pp. 518-521.

УДК 331.45

ПРОВЕРКА ЗНАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ОХРАНЫ ТРУДА И КРИТЕРИИ ГОТОВНОСТИ РАБОТНИКА К БЕЗОПАСНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Чернов К.В.

*Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина,
г. Иваново, Россия, sistemnolog@rambler.ru*

***Аннотация.** Предлагается проверку знания требований охраны труда проводить с использованием критериев, разработанных с применением одного из приёмов психологического метода, называемого когнификацией безопасности техногенной деятельности.*

***Ключевые слова:** охрана труда, психология, знание, когнификация, критерии готовности.*

VERIFICATION OF KNOWLEDGE OF LABOR PROTECTION REQUIREMENTS AND CRITERIA FOR EMPLOYEE READINESS FOR SAFE ACTIVITIES

Chernov K.V.

*Ivanovo state power university named after V.I. Lenin,
Ivanovo, Russia*

Abstract. *It is proposed to test the knowledge of labor protection requirements using criteria developed using one of the methods of a sciological method called cognification of the safety of technogenic activities.*

Keywords: *labor protection, sciology, knowledge, cognition, readiness criteria.*

Постановление «О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда» [1] содержит наряду с другими следующие сведения: «Обучение требованиям охраны труда в зависимости от категории работников проводится: а) по программе обучения по общим вопросам охраны труда и функционирования системы управления охраной труда ...; б) по программе обучения безопасным методам и приемам выполнения работ при воздействии вредных и (или) опасных производственных факторов, источников опасности, идентифицированных в рамках специальной оценки условий труда и оценки профессиональных рисков, ...; в) по программе обучения безопасным методам и приемам выполнения работ повышенной опасности, к которым предъявляются дополнительные требования в соответствии с нормативными правовыми актами, содержащими государственные нормативные требования охраны труда». «Плановое и внеплановое обучение по охране труда завершается соответствующей проверкой знания требований охраны труда работников». «В состав комиссий по проверке знания требований охраны труда у работодателя, ..., могут включаться руководители и специалисты структурных подразделений, руководители и специалисты служб охраны труда, лица, проводящие обучение по охране труда».

Проверка знания требований охраны труда проводится в целях установления готовности работника к безопасной деятельности. При установлении готовности предлагается использовать критерии, разработанные с применением одного из приёмов сциологического метода, называемого когнификацией безопасности техногенной деятельности [2].

Приём сциологического метода, именуемый когнификацией, основывается в научной области, называемой сциологией. Сциология при переводе данного слова как учения о знании представляет собой комплекс знаний о сциенции, включающей антропную, в том числе знание. Слово «scientia (сциенция)» образуется от глагола «scio», переводимое с латинского языка словами: знать, понимать, быть сведущим, уметь [3]. Ценность понятия «сциенция» заключается в его большой ёмкости. Оно охватывает близкие для русского языка, но разные понятия: знание, понимание, сведения, умение. Ёмкость данного понятия значительно возрастает при распространении его на все уровни сопринадлежного строения антропного организма, начиная с внутриклеточных уровней.

Антропогенная система в сциологии есть осознаваемое при кодорефлексии отображение части Универсума, обособленной в соответствии целью и разделяемой на антропные, неантропные, артетические и абиотические компоненты, которые посредством отношений объединяются в целое, взаимодействующее с внешней средой. «Универсум – всё, что вокруг нас, и мы сами как единое целое ...» [4]. Кодовая рефлексия, или кодорефлексия,

при категориальном выражении есть способность живого посредством субстанции имитировать, или воспроизводить, существующее, представленное составляющими Универсума, формообразованиями, их внешним окружением и взаимовлиянием, включая самоимитацию и воплощение имитируемого при преобразованиях Универсума.

Биотические неантропные и антропные компоненты антропогенной системы исходного и последующих уровней сопринадлежности вплоть до предшествующего переходному, в сравнении с абиотическими компонентами содержит более сложное вещество и энергию, соответствующую сложности этого вещества. Более сложное вещество и энергия имеют дополнительные свойства, обуславливающие кодорефлексию, которая при системном подходе предстаёт транскодингом. Транскодинг, или транскодированное представление компонентов, отношений и внешней среды антропогенной системы внутри биотического компонента системы исходного и последующих уровней сопринадлежности вплоть до предпереходного, осуществляется посредством знаков, создаваемых веществом и энергией этого компонента. Совокупности вещественно-энергетических знаков транскодинга биотических компонентов являются сциенцией. Знаками сциенции являются знаки, обладающие потенциалами самодействия, которые обуславливают аутоактантность, т.е. самодействие, биотических компонентов. Посредством сциенции биотические неантропные и антропные компоненты антропогенной системы осуществляют транскодинг, вследствие чего обеспечивается их самоорганизованность. Сциенция есть отображающее живую субстанцию Универсума осознаваемое при кодорефлексии слагаемое биотического компонента, которое придаёт ему организованность посредством транскодинга и проявляется аутоактантными совокупностями вещественно-энергетических знаков, обладающих потенциалами, при их восприятии, преобразовании, создании, передаче, хранении, воспроизведении, применении в поведении и деятельности. Неизменяющаяся часть сциенции биотического компонента является энграммой, а изменяющаяся – куррентной.

Человек как антропный компонент антропогенной системы предстаёт биотической системой, компонентом которой является сциентная система, осуществляющая регуляцию организма, его поведения и деятельности. Сциентная система разделяется на следующие компоненты: нейрокринная система; нейроиммунная система; нейровегетативная система; нейросимперифорическая система, функция которой состоит в аутоактантности, выражаемой поведением и деятельностью; нейрогностическая система, функция которой заключается в аутоактантности, выражаемой прежде всего интеллектуальной деятельностью.

Ансамбли нейронов нейросимперифорической и нейрогностической составляющих сциентной системы, образованные посредством синапсов, создают коннектомную стереоформацию. Разные стереоформации ансамблей предстают интегральными вещественно-энергетическими знаками, которые обуславливают их сциентную функцию, синергирующую сциентные функции локализованных в пространстве и контактирующих между собой нейро-

цитов. Сциенция нейрона соответствует сциенции клеток других типов, представленной многими совокупностями способных к участию в транскодировании вещественно-энергетических знаков. Коннектомная стереоформация имеет сопринадлежную конструкцию, в которой микроансамбли образуют ансамбли, входящие в макроансамбли нейронов и т.д.

Ансамбли нейронов нейросимперифорической системы со своей сциенцией предстают коннектными группами поведения, называемыми также бихевиоральными группами. Стереоформация бихевиоральной группы является рацемусной, создаваемой хронально фиксированной совокупностью коннектированных между собой нейронов, которые размещаются в пространстве относительно друг друга определённым образом, образуя скопления, подобные гроздям. Каждая рацемусно-бихевиоральная группа (РБГ) имеет создаваемые при определённых обстоятельствах с определённой длительностью контакты с нейронами других РБГ, с нейронами остальных составляющих сциентной системы, а также контакты с клетками органов, в частности органов опоры и движения. Устойчиво сформированная РБГ со своими нейронами и коннекциями между ними, имеющая определённую стереоформацию, предстаёт бихевиоральным темплатом. Сциенция темплата стереотипно отображает какое-либо действие организма, реализуемое в поведении или деятельности. Стереоформация темплата может иметь сопринадлежную конструкцию, в которой микротемплаты образуют темплаты, входящие в макротемплаты и т.д. Сциенция РБГ представляет собой практическое знание, а в устойчиво сформированном варианте темплата – умение.

Ансамбли нейронов нейрогностической системы со своей сциенцией предстают коннектными группами познания, называемыми также гностическими группами (ГГ). ГГ нейрогностической системы по своей стереоформации подразделяются на рацемусные и секвентные. Рацемусная стереоформация ГГ повторяет стереоформацию РБГ. Секвентная стереоформация ГГ создаётся хронально фиксированной совокупностью коннектированных между собой нейронов, которые последовательно, один за другим, размещаются в пространстве. Нейроны рацемусной гностической группы (РГГ) соединены между собой посредством химических синапсов, а нейроны секвентной гностической группы (СГГ) – посредством электрических. Разная стереоформация РГГ и СГГ в сочетании с разным типом синапсного соединения обуславливают гностическую асимметрию. Гностическая асимметрия проявляется разными механизмами, точнее имплеонизмами, транскодирования.

Каждая РГГ имеет создаваемые при определённых обстоятельствах с определённой длительностью контакты с нейронами других РГГ, нейронами СГГ, с нейронами РБГ нейросимперифорической составляющей, с нейронами остальных составляющих сциентной системы, а также контакты с клетками органов, в частности органов зрительной системы. Каждая СГГ имеет создаваемые при определённых обстоятельствах с определённой длительностью контакты с нейронами других СГГ, нейронами РГГ, нейронами РБГ нейросимперифорической составляющей, с нейронами остальных составляющих сциентной системы, а также контакты с клетками органов, в частности

органов слуховой системы.

Сформированная РГГ со своими нейронами и коннексиями между ними, имеющая рацемусную стереоформацию, предстаёт гностическим паттерном. Сциенция паттерна стереотипно отображает, т.е. имажирует, воспринимаемое, в том числе воспринимаемое через зрительную систему. Стереоформация паттерна может иметь сопринадлежную конструкцию, в которой микропаттерны образуют паттерны, входящие в макропаттерны и т.д.

Сформированная СГГ со своими нейронами и коннексиями между ними, имеющая секвентную стереоформацию, предстаёт троксией. Стереоформация троксии имеет сопринадлежную конструкцию, в которой микротроксии образуют троксии, входящие в макротроксии и т.д. Сциенция микротроксии стереотипно воспроизводит посредством мыслимых, приспособленных к озвучиванию лингвических знаков, т.е. вокализует, элементы воспринимаемого, в том числе воспринимаемого через слуховую систему. Сциенция троксии стереотипно воспроизводит посредством мыслимых, приспособленных к озвучиванию совокупностей лингвических знаков, т.е. вокализует, компоненты воспринимаемого. Сциенция макротроксии стереотипно воспроизводит посредством мыслимых, приспособленных к озвучиванию макросовокупностей лингвических знаков, т.е. вокализует, воспринимаемое. Сциенция ГГ предстаёт прикладным и теоретическим знанием, а сциенция паттернов и троксий – знанием стереотипным.

Аутоактантность компонентов нейросимперифорической и нейрогностической составляющих сциентной системы сопровождается многократным транскодированием сциенции в нейроно-синапсной сети при переходе от одних состояний, фаз, к другим. Субстратами сциенции являются: на первой и заключающей фазах транскодирования – афферентные нейроны и нейроны афферентных систем, и эфферентные нейроны; на второй фазе транскодирования – промежуточные нейроны нейровегетативной составляющей сциентной системы; на третьей фазе – нейроны РБГ нейросимперифорической составляющей; на четвёртой – нейроны РГГ нейрогностической составляющей сциентной системы; на пятой фазе транскодирования – нейроны СГГ нейрогностической составляющей.

Начальная сциенция предстаёт вещественно-энергетическими знаками интеро- или экстерорецепции. Знаки, например фотоны электромагнитной энергии, поступают на аксолеммные рецепторы окончаний афферентного нейрона и активируют их. Знаки начальной сциенции, в частности фотоны, транскодируются посредством рецепторов в вещественно-энергетические знаки, представляющие электрическими зарядами ионов, которые переносятся внутрь аксона афферентного нейрона. Перемещение заряженных частиц через ионный канал рецептора создаёт электромагнитное поле. Поле, возникшее на участке мембраны с рецептором, активирует потенциал-зависимые каналы смежных участков мембраны, через которые перемещаются положительные и отрицательные ионы. При активации на смежном участке возникает электрический потенциал действия (ЭПД), создание которого приводит к образованию электромагнитного поля, порождающего на очередном участ-

ке мембраны следующий ЭПД и т.д. Цикл повторяется по всей длине аксона, затем на мембране тела нейрона до синапса, транскодирующего сциентные знаки для следующего нейрона.

В гностических процессах участвуют нейроны четвёртой и пятой фаз транскодирования, т.е. нейроны РГГ и СГГ нейрогностической системы.

Аутоактантность РГГ в виде возобновляющихся паттернов и новых образов, сопровождаемых эмоциональными проявлениями, активирует: РБГ нейросимперифорической системы, аутоактантность которых вызывает мышечные действия, выражаемые мимическими движениями мышц лица, пантомимическими движениями мышц тела и, возможно, звуковыми проявлениями речевого аппарата; компоненты нейрокринной системы, аутоактантность которых сопровождается выработкой гормонов, соответствующих образу воспринимаемого и эмоциональным проявлениям; смежные РГГ, аутоактантность которых вызывает блокирование и деблокирование компонентов нейросимперифорической и нейрогностической систем; СГГ, аутоактантность которых сопровождается возникновением вокализуемых мыслей.

Эмоциональные проявления образов, моделируемых сциенцией РГГ, аутоактантность которых сопровождается выработкой гормонов, предстают ощущениями. Сложные ощущения именуются чувствами. Интеллектуальные проявления образов, моделируемых сциенцией РГГ, предстают имажными мыслями. Имажные мысли являются неосознаваемыми, но могут визуализироваться при активации зрительного аппарата.

Аутоактантность СГГ в виде гностических троксий и новых вокальных мыслей активирует: РБГ нейросимперифорической системы, аутоактантность которых вызывает мышечные действия, выражаемые звуковыми проявлениями речевого аппарата и, возможно, пантомимическими движениями мышц тела и мимическими движениями мышц лица; РГГ нейрогностической системы, аутоактантность которых предстаёт чувствами или имажными мыслями и вызывает актантность РБГ, сопровождаемую мышечными действиями при озвучивании; смежные СГГ, совместная аутоактантность с которыми создаёт феномен своего «я» и личностное сознание; РГГ, совместная аутоактантность с которыми сопровождается возникновением имажно-вокального или вокально-имажного мышления.

Интеллектуальные проявления воспринимаемого, которое моделируется сциенцией СГГ, предстают вокальными, т.е. осознаваемыми, мыслями. Осознаваемые мысли могут быть беззвучными или звучащими. При беззвучии функционируют не все компоненты речевого аппарата, в частности голосовые складки. Звучание создаётся работой всех компонентов, включая дыхательную, голосовую и артикуляционную составляющие.

Мышление – это совместная аутоактантность РГГ и СГГ нейрогностической системы, проявляющаяся имажными и вокальными мыслями. Имажные мысли становятся осознаваемыми при транскодировании стереоформационной сциенции РГГ в сциенцию СГГ. Мышление является имажно-вокальным, если совместная аутоактантность РГГ и СГГ нейрогностической

системы совершается с преобладанием аутоактантности РГГ. Мышление становится вокально-имажным, если совместная аутоактантность РГГ и СГГ нейрогностической системы совершается с преобладанием аутоактантности СГГ. Двойственность мышления служит подтверждением гностической асимметрии, при которой РГГ и СГГ имеют разную стереоформацию. Гностическая асимметрия проявляется разной осознаваемостью воспринимаемого, полагая, что имажное мышление в сравнении с вокальным не осознаётся.

ГГ одной стереоформации коннексируются с ГГ другой посредством комиссуральных нейронов, в которых одна разновидность гностической сциенции транскодируется в другую. Время, необходимое для преобразования, представляет собой продолжительность транскодирования. Комиссуральные нейроны, передающие вещественно-энергетические знаки от РГГ к СГГ, выполняют функцию рацемусно-секвентных преобразователей (РСП), которые имажную сциенцию транскодируют в вокальную. Комиссуральные нейроны, передающие вещественно-энергетические знаки от СГГ к РГГ, представляют собой секвентно-рацемусные преобразователи (СРП), которые вокальную сциенцию транскодируют в имажную.

Имажная сциенция в сравнении с вокальной при моделировании одного и того же воспринимаемого объекта является более сложной, более многомерной, поэтому продолжительность транскодирования в РСП значительно больше продолжительности транскодирования в СРП. Разница в продолжительности транскодирования в сочетании с неосознаваемостью имажного мышления и осознаваемостью вокального порождает феномен интуиции. Нейросимперифорическая и нейрогностическая сциенция, обуславливающая текущее поведение и мышление, является куррентной. Энграммная сциенция существует в форме темплатов, паттернов, троксий, и определяет феномен памяти. Антропная сциенция темплатов является запомненным практическим знанием, т.е. умением, а сциенция паттернов и троксий – запомненным прикладным и теоретическим знанием. Совместная аутоактантность РГГ и СГГ представляет собой собственно мышление. Одним из результатов мышления является понимание воспринимаемого. Понимание есть факт устойчивого транскодируемого соотношения между собой паттернов и троксий одних и тех же воспринимаемых объектов.

Аутоактантность антропного знания состоит в его способности к материализации. Научное знание человека находит воплощение в деятельности и производимой вследствие деятельности продукции. Техногенная деятельность заключается в создании и применении технетической продукции, удовлетворяющей потребности человека в замещении и усилении созидательных способностей. К продукции относятся технетические вещества, материалы, потребительская энергия, изделия, технические устройства и сооружения, услуги и информация. Термин «техническое устройство» охватывает собой следующие разновидности: установка, машина, аппарат, прибор, изделие, агрегат, механизм, приспособление, инструмент и т.п. Техническое сооружение представляет собой комплекс устройств. Техногенная деятельность на начальных стадиях жизненного цикла производимой продукции

совпадает с научной. Научная деятельность в техногенной области предусматривает: выработку теоретических знаний, восприятие теоретических знаний и преобразование их в прикладные, выработку или восприятие прикладных знаний и применение их для создания и совершенствования продукции. Техногенная деятельность состоит в следующем: применение научных знаний к созданию и совершенствованию продукции, применение научных знаний к выработке практических знаний для производства продукции, использование практических знаний на каждой стадии жизненного цикла производимой продукции. Техногенная деятельность по стадиям цикла разделяется на следующие виды: проектно-конструкторская, проектно-исследовательская, строительно-монтажная, пуско-наладочная, эксплуатационная, экспертно-декларационная, испытательная, ремонтная, утилизационная и иная деятельность.

Эксплуатационная деятельность заключается в применении практических знаний к применению технических устройств при производстве продукции. При эксплуатационной деятельности работник вещественно, энергетически и сциентно взаимодействует с техническим устройством. Вещественно-энергетическое взаимодействие может быть представлено воздействиями. Как следствие, взаимодействие разделяется на воздействие работника на устройство и вещественно-энергетическое воздействие технического устройства на работника, т.е. техногенное воздействие. Техногенное сциентное взаимодействие к воздействиям не сводится.

Техногенное воздействие с уровнем, при небольшом отклонении от которого в антропном организме вследствие деятельности возникают или могут возникнуть эффекты, создающие предпосылки для болезней или травм, является критическим. Техногенная опасность – это техногенное вещественно-энергетическое воздействие послекритического уровня, при котором эффекты, возникающие или способные возникнуть в организме работника вследствие деятельности, вызывают или могут вызывать болезни или травмы. Техногенные опасности разделяются на инициируемые техногенные воздействия послекритического уровня, создаваемые процессами в устройствах, а также реактивные воздействия послекритического уровня. Реактивные техногенные опасности возникают при ошибочных воздействиях работника на устройство или при невыполнении требуемых воздействий.

Когнификация переводится словами «делание познания» и означает раскрытие приобретаемых знаний. Когнификация деятельности представляет собой детекцию знаний, которые воплощаются в действиях при осуществлении конкретной деятельности. Когнификация безопасности техногенной деятельности заключается в раскрытии знаний, которые воплощаются в действиях, исключающих возникновение реактивных опасностей при осуществлении определенного вида деятельности, её разновидности.

Простейшим примером когнификации безопасности техногенной деятельности может быть выявление соотношения между нужными знаниями и их воплощением в действиях, способствующего достижению безошибочности этих действий и обязательности выполнения необходимых, в целях

обеспечения, в частности, термической безопасности. Техногенная термическая опасность – это техногенное термоконтактное воздействие послекритического уровня, при котором эффекты, способные возникнуть в организме работника, могут вызывать ожоговые травмы. Термоконтактное воздействие возникает вследствие техногенного происшествия, при котором работник ошибочно прикасается к компонентам технического устройства с повышенной температурой.

Компоненты технического устройства с повышенной температурой приспособлены к техногенному взаимодействию сциентного содержания при выполнении некоторых условий, в том числе следующего. На рабочих местах и оборудовании, имеющем нагретые поверхности, устанавливается предупреждающий знак «Осторожно. Горячая поверхность» [5], пригодный для зрительного восприятия. Зрительное восприятие знака безопасности, исключаящее ошибочное действие, выражается многофазным транскодированием зрительной сциенции. Транскодирование зрительной сциенции начинается с поступления квантов энергии видимого диапазона на фоторецепторные клетки сетчатки глаз. Совокупность рецептируемых фотонов создаётся светом, отражённым от поверхности предупреждающего знака. Показателями, характеризующими зрительную сциенцию в начале её транскодирования, называемую также техносциенцией, являются энергия фотонов и интенсивность переносимой ими электромагнитной энергии. Знаки техносциенции предстают совокупностью фотонов с определённой частотой и их пространственной локализацией. Сциенция фоторецепторов затем транскодируется многофазно вплоть до преобразования в сциенцию бихевиоральных темплатов, аутоактантность которых вызывает стереотипные действия организма работника, реализуемые в деятельности, или блокирование ошибочных действий.

Работник пригоден к деятельности, если степень развития его сциентной системы соответствует сложности технологических задач, решение которых должно быть приемлемо правильным и достаточно точным. Сциентная система работника готова к правильному и точному техногенному взаимодействию в процессе деятельности при выполнении комплекса условий, в том числе следующих: восприятие фотонов, отражённых от знака, должно сопровождаться транскодированием сциенции и приводить к созданию или активации РГГ, имажирующих зрительную сциенцию во внутренний образ предупреждающего знака, который порождает чувство беспокойства; активность РГГ, имажирующих зрительную сциенцию, должна представлять аутоактантными паттернами чувства беспокойства; аутоактантность паттерна чувства беспокойства должна приводить к активации темплатных РБГ, которые должны блокировать ошибочные действия и вызывать необходимые стереотипные; аутоактантность паттернов чувства беспокойства может сопровождаться транскодированием зрительной сциенции в РСП и приводить к активации СГГ, вокализирующих троксии в модусе думаемых или произносимых мыслей; когерентная взаимная аутоактантность РГГ и СГГ, обусловленная транскодированием сциенции в РСП и СРП и определяющая мышле-

ние, приводит к правильному пониманию воспринимаемого, на основе которого должны приниматься правильные решения.

Когнификация безопасной деятельности работника, эксплуатирующего оборудование с нагретыми поверхностями, заключается в следующем:

1) установление ограничений для необходимых действий после обнаружения посредством зрения предупреждающего знака «Осторожно. Горячая поверхность»;

2) определение возможных ошибочных действий, т.е. действий, которые нельзя выполнять после обнаружения предупреждающего знака;

3) выявление практических знаний, побуждающих выполнение ограниченных действий и препятствующих выполнению ошибочных;

4) нахождение прикладных и образных знаний, лежащих в основе побуждающих и препятствующих практических знаний;

5) указание теоретических образных и образных знаний, служащих базой для прикладных;

6) определение понимания теоретико-прикладных знаний, обусловленное когерентностью образной и образной сценности, которое определяет мышление, контролирующее выполнение ограниченных действий и невыполнение ошибочных;

7) выявление способности к возникновению мышления, которое порождает неординарные практические знания, а на их основе выполнение нестереотипных действий.

Пример когнификации позволяет сформулировать критерии, посредством которых можно судить о готовности работника к безопасной деятельности. Критерии готовности работника к безопасной деятельности имеют следующие наименования и назначение. Критерий освоенности – показатель, применяемый при испытании способности работника выполнять все необходимые действия. Критерий умелости – показатель, применяемый при испытании способности умелого, т.е. правильного, точного и быстрого, выполнения необходимых действий. Критерий овладения прикладными знаниями – показатель обладания прикладными знаниями и их понимания для проверки владения способностью графического и устного описания места выполнения и содержания необходимых действий и невыполнения ошибочных и их последствий. Критерий овладения теоретическими знаниями – показатель обладания теоретическими знаниями и их понимания для проверки владения способностью графического и соответствующего ему устного описания причинных обоснований выполнения необходимых действий и невыполнения ошибочных. Критерий креативности – показатель для проверки способности к выполнению нестереотипных действий при непредвиденных обстоятельствах.

Проверка готовности работника к безопасной деятельности может проводиться по следующему алгоритму. Испытание по критерию освоенности начинается с предоставления работнику полного перечня необходимых действий. Далее оно может проводиться в следующем порядке: работник выполняет последовательно все действия, эксперты оценивают правильность

выполнения каждого действия, значение показателя вычисляется как доля правильно выполненных действий от всех необходимых, испытание признаётся успешным при достигнутом значении критерия выше установленного.

Испытание по критерию умелости начинается с последовательного выбора одного из необходимых действий и далее может проводиться в следующем порядке: работник выполняет выбранное действие, эксперты констатируют правильность и фиксируют длительность выполнения действия, значение показателя вычисляется как доля времени правильного выполнения действия от нормативной длительности, испытание признаётся успешным при достигнутом значении критерия в пределах установленного диапазона.

Проверка по критерию овладения прикладными знаниями начинается с последовательного выбора одного из необходимых или ошибочных действий и далее может проводиться в следующем порядке: работник описывает графически, т.е. письменно с применением схем и рисунков, место выполнения и содержание выбранного действия и его последствия, проверяемый описывает устно с применением произносимых слов в строгом соответствии с графическим представлением место выполнения и содержание выбранного действия и его последствия, эксперты оценивают правильность графического и устного описания и их соответствие одного другому, значение показателя вычисляется с использованием балльной шкалы, результат проверки признаётся положительным при достигнутом значении критерия в пределах установленного диапазона.

Проверка работника по критерию овладения теоретическими знаниями начинается с последовательного выбора одного из необходимых или ошибочных действий и далее может проводиться в следующем порядке: проверяемый описывает письменно с применением схем и рисунков причинные обоснования выполнения или невыполнения выбранного действия, работник описывает устно с применением произносимых слов в строгом соответствии с графическим представлением причинные обоснования выполнения или невыполнения выбранного действия, эксперты оценивают правильность графического и устного описания и их соответствие одного другому, значение показателя вычисляется с использованием балльной шкалы, результат проверки признаётся положительным при достигнутом значении критерия в пределах установленного диапазона.

Проверка по критерию креативности начинается с задания обстоятельств деятельности работника, которые являются непредусмотренными, и далее может проводиться в следующем порядке: работник описывает возможные действия при непредусмотренных обстоятельствах и их последствия, эксперты оценивают правильность возможных действий, значение показателя вычисляется с использованием балльной шкалы, результат проверки признаётся положительным при достигнутом значении критерия в пределах установленного диапазона.

Содержание программ проверки знания требований охраны труда, составленных с использованием критериев готовности, будет, вероятно, более основанным.

Библиографический список

1. О порядке обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда // Пост. Пр-ва РФ №2464 от 24.12.21 г. [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/403324424/> (Дата обращения: 08.08.2022).
2. Чернов К.В. Кодовая рефлексия и сциентирование опасности // Материалы конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения)». – Иваново: ИГЭУ, 2011. – С. 294-297.
3. Classes.ru. Иностранные языки для всех. // Словари онлайн. [Электронный ресурс] URL: <http://www.classes.ru/all-latin/dictionary-latin-russian1-term-20239.htm> (Дата обращения: 08.08.2022).
4. Моисеев Н.Н. Универсум. Информация. Общество. – М: Устойчивый мир, 2001. – 200 с.
5. ГОСТ 12.4.026-2015. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний // Государственный стандарт [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/71544076/> (Дата обращения: 08.08.2022).

УДК 669.162

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОСТА МАССЫ ШИХТОВЫХ АГРЕГАТОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ

Павловец В.М., Домнин К.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, pawlowets.victor@yandex.ru*

Аннотация. Проведена оценка функционального назначения технологических добавок брикетуемой массы на различных этапах производственного маршрута окускования железосодержащего сырья. Представлена техника экспериментов и методика обработки экспериментальных данных. Обоснована необходимость формирования коагуляционных агрегатов в структуре самовосстанавливающихся брикетов. Приведены результаты исследования динамики прироста массы компонентов брикетуемой шихты в структуре коагуляционных агрегатов в технологии избирательного смешивания. Проанализированы зависимости прироста массы компонентов шихты от температуры жидкого восстановителя и технологической схемы смешивания компонентов брикетуемой массы. Проведена оценка развития макро- и микроструктуры коагуляционных агрегатов и показана их роль в прогнозировании скорости восстановления железосодержащего сырья.

Ключевые слова: коагуляционные агрегаты, прирост массы, компоненты шихты, восстановитель, порообразующие добавки, железосодержащие брикеты, технология избирательного смешивания

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF WEIGHT GAIN OF CHARGE AGGREGATES USED FOR THE PRODUCTION OF IRON-CONTAINING BRIQUETTES

Pavlovets V.M., Domnin K.I.

*Siberian state industrial University,
Novokuznetsk, Russia, pawlowets.victor@yandex.ru*

Abstract. *An assessment of the functional purpose of technological additives of the briquetted mass at various stages of the production route of agglomeration of iron-containing raw materials was carried out. The technique of experiments and the method of processing experimental data are presented. The necessity of formation of coagulation aggregates in the structure of self-healing briquettes is substantiated. The results of a study of the dynamics of weight gain of the components of the briquetted charge in the structure of coagulation aggregates in the technology of selective mixing are presented. The dependences of the weight gain of the charge components on the temperature of the liquid reducing agent and the technological scheme of mixing the components of the briquetted mass are analyzed. The development of the macro- and microstructure of coagulation aggregates was assessed and their role in predicting the rate of reduction of iron-containing raw materials was shown.*

Keywords: *coagulation aggregates, weight gain, charge components, reducing agent, pore-forming additives, iron-containing briquettes, selective mixing technology.*

В железосодержащую шихту для производства металлургических брикетов вводят некоторое количество технологических добавок, каждая из которых выполняет определенные задачи [1-2]. Обязательным атрибутом брикетируемой массы являются связующие добавки. Основной связующей добавкой, обеспечивающей необходимую транспортную и металлургическую прочность брикетов, является жидкое стекло, являющееся наиболее распространенным и доступным упрочняющим материалом, выпускаемым промышленностью в больших объемах [2-3]. Жидкое стекло после смешивания с железосодержащими частицами и другими добавками склеивает их между собой и создает стандартную прочность брикетируемой массы, необходимую для выдерживания динамических и статических нагрузок при транспортировке и восстановлении. Для получения самовосстанавливающихся металлизированных брикетов и протекания первичного периода восстановления в шихту брикетов вводят восстановители – углеводородные добавки, которые при слабоокислительном или восстановительном обжиге железосодержащего сырья генерируют восстановительные газы [3-4]. Частицы восстановителя должны плотно контактировать с железосодержащими частицами, обеспечивая максимальную скорость восстановления оксидов железа. К этому можно добавить, что в настоящее время широко ведутся исследования по использованию нетрадиционных восстановителей техноген-

ного происхождения в сфере подготовки сырья к металлургическому переделу

[1,5]. К числу нетрадиционных восстановителей относится отработанное минеральное масло (ОММ), являющееся перспективным техногенным отходом и обладающее рядом технологических преимуществ в производстве окускованного железосодержащего сырья [6-9].

Для подачи к поверхности железосодержащих частиц технологических газов на всех этапах производственного маршрута в структуре брикета необходимо создать разветвленную сеть поровых каналов между поверхностью и центром прессовки. Общие принципы создания поровой структуры окускованных материалов включают формирование крупных и малоизвилистых пор, проницаемых для технологических газов. Эта достаточно сложная задача актуальна в настоящее время. Принудительное формирование указанной структуры в определенной степени способны создавать порообразующие добавки (ПД), которые одновременно могут выполнять функцию нетрадиционных восстановителей. В качестве ПД в последнее время предложено использовать измельченные отходы растительного происхождения на основе стеблей обмолоченных сельскохозяйственных структур (пшеницы, ржи, ячменя и др.). Объемы этих отходов неограниченны, а модифицированная структура ПД позволяет формировать регламентированную пористость и дает возможность прогнозировать повышение скорости восстановления окускованных продуктов [10-11].

Технологическая схема получения металлургических брикетов, содержащих вышеуказанные добавки, включает механическую подготовку ПД, дозирование и смешивание компонентов с получением брикетируемой массы и ее брикетирование. Техника брикетирования железосодержащих материалов во многом близка технологии прессования тонкодисперсного керамического сырья в производстве огнеупоров для металлургической промышленности, где разработаны известные, относительно малочисленные, режимы для смешивания прессуемой массы [12]. Механическая подготовка ПД преимущественно направлена на измельчение растительных частиц и подробно рассмотрена в источниках [9, 11]. Наличие нескольких видов технологических добавок различного агрегатного состояния позволяет отказаться от традиционного процесса смешивания, при котором все добавки смешиваются одновременно, и организовать избирательное и последовательное смешивание компонентов с получением шихтовых коагуляционных агрегатов (КА) на основе ПД, из которых формируется прочная структура брикета.

Целью настоящей работы является исследование динамики прироста массы компонентов шихты для брикетирования железосодержащей массы в процессе избирательного смешивания с получением шихтовых коагуляционных агрегатов и подбор оптимальной дозировки компонентов и схемы подготовки шихтовой смеси для производства металлургических брикетов.

Методика экспериментов заключалась в следующем. Для брикетирования использовали железорудный концентрат (ЖК) Тейского месторождения ($Fe_{общ}=63,4\%$, $d_{\text{ч}}=0,068$ мм). В качестве упрочняющей связки применяли

50 % раствор жидкого стекла (ЖС), обеспечивающий необходимую схватываемость массы в процессе технологических операций [6, 7]. Восстановителем являлось отработанное моторное масло ДВС, которое подогревали до 25, 50 и 90 °С в лабораторной электропечи. В качестве порообразующих добавок использовали фрагментированные трубчатые стебли зерновых культур диам. 1-2 мм и длиной 8-10 мм. Масса одного фрагмента ПД составляла 0,016–0,018 г. Фрагментированные частицы ПД являлись основой для формирования шихтовых коагуляционных агрегатов. В начале экспериментов ПД взвешивали на электронных весах типа VIBRA HT (Shinko Denshi НТР-220СЕ), обеспечивающих точность до 0,0001 г. Затем их помещали в один из вышеуказанных компонентов и вручную перемешивали. На поверхности ПД формировался слой нового материала и ПД с этим слоем повторно взвешивали. После взвешивания ПД с первым материалом ее помещали в следующий материал и перемешивали, формируя на ПД второй слой и снова взвешивали. В конце экспериментов были сформированы КА, в центре которых располагались порообразующие добавки, на поверхности которых было сформировано три слоя материалов, располагавшихся в определенной последовательности. Трубчатая структура ПД предполагала внутри КА запертый воздух. Структура режимов и последовательность перемешивания компонентов брикетируемой массы приведены в таблице 1. После вылеживания и затвердевания КА визуально оценивали их макроструктуру и анализировали микроструктуру КА на металлографическом микроскопе Olympus GX-51 в ЦКП «Материаловедение» СибГИУ.

Таблица 1 – Структура режимов и последовательность смешивания компонентов брикетируемой массы

№ режима	Последовательность смешивания компонентов брикетируемой массы			
	1	2	3	4
1	ПД	ОММ	ЖС	ЖК
2	ПД	ЖС	ОММ	ЖК
3	ПД	ОММ	ЖК	ЖС
4	ПД	ЖС	ЖК	ОММ
5	ПД	ЖК	ОММ	ЖС
6	ПД	ЖК	ЖС	ОММ

После взвешивания ПД и компонентов брикетируемой массы на их поверхности рассчитывали относительные массы Θ_m , %, по выражению

$$\Theta_m = (M_i / M_o) \times 100,$$

где: M_o – исходная масса порообразующих добавок, г;

M_i – масса порообразующих добавок со слоем соответствующего i -го компонента смеси после перемешивания, г.

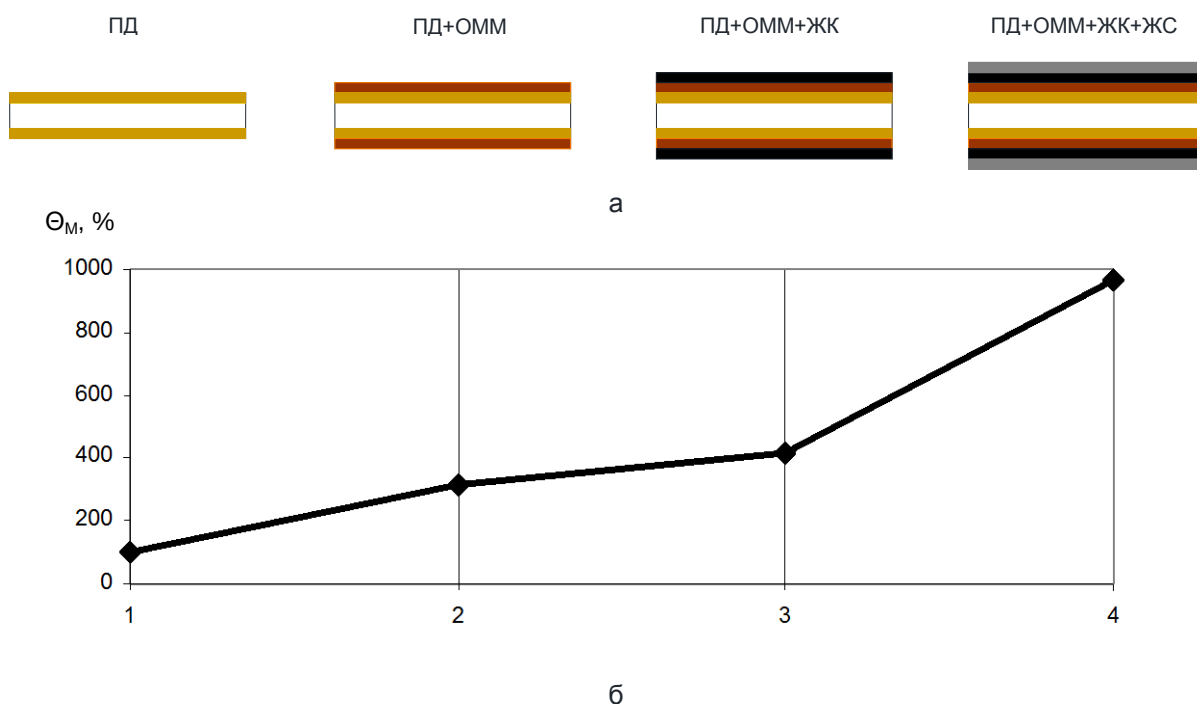
Прирост массы i -го компонента на поверхности ПД $\Delta\Theta_m$, %, рассчитывали по формуле:

$$\Delta\Theta_m = \Theta_{mi} - \Theta_{mi-1}$$

где $\Theta_{M\ i}$ – относительная масса ПД со слоем i -го компонента на ее поверхности, %;

$\Theta_{M\ i-1}$ – относительная масса ПД со слоем $i-1$ -го (предыдущего) компонента на ее поверхности, %.

Схема формирования слоев технологических добавок на поверхности ПД и динамика прироста массы поробразующих добавок показаны на рисунке 1. Зависимость прироста массы поробразующих добавок от температуры ОММ показана на рисунке 2.



В позиции б относительная масса: 1 – ПД, 2 – ПД и ОММ, 3 – ПД, ОММ и ЖК, 4 – ПД, ОММ, ЖК и ЖС

Рисунок 1 – Схема формирования технологических добавок на поверхности ПД – а и динамика прироста относительной массы поробразующих добавок – б

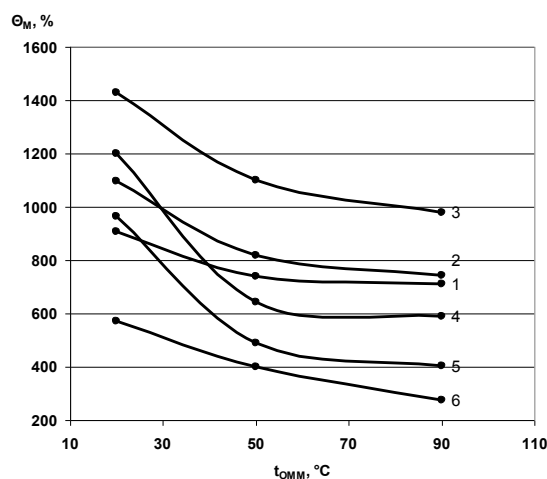


Рисунок 2 – Зависимость прироста относительной массы поробразующих добавок от температуры ОММ

В точке 1 (рисунок 1) для ПД значение Θ_m составляло 100 %. Как видно из полученных результатов (рисунок 2) относительная масса ПД после избирательного смешивания способна возрасти от 100 до 1551 % (режим 3, $t = 25^\circ\text{C}$), т.е., более чем в 15 раз. Для этого режима массовое содержание ПД в брикетируемой массе максимальное и составляет около 6,5 %. Это говорит о том, что еще до собственного брикетирования в процессе смешивания компонентов формируется первичное формообразование и упрочнение массы с образованием коагуляционных агрегатов (рисунок 3). В процессе последующего завершающего брикетирования эти агрегаты, обладающие первичной структурной прочностью, должны ее сохранить и сформировать прогнозируемую коагуляционную структуру брикета, показанную на рисунке 3.

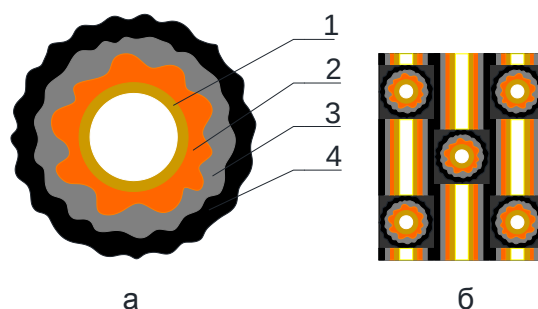
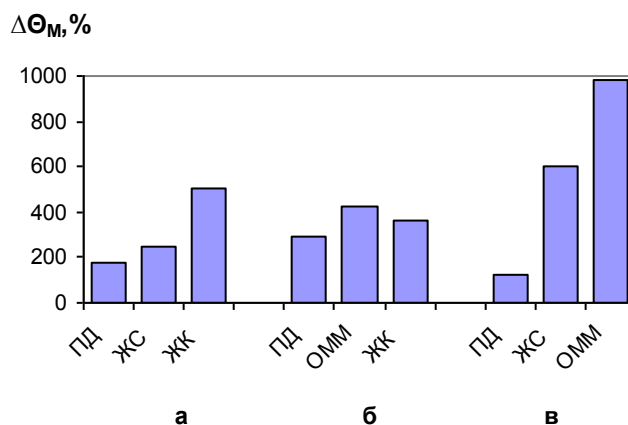


Рисунок 3 – Схема коагуляционного агрегата – а и сформированного железосодержащего брикета на его основе – б

Эти коагуляционные агрегаты, по предварительному прогнозу, в структуре брикетов должны сформировать очаги с повышенной скоростью восстановления оксидов железа. Находясь в структуре брикета, они упрочняются окружающим материалом, содержащим преимущественно концентрат и повышенное количество связующей добавки. Структура этих агрегатов и их прочность должны в максимальной степени удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к металлургическому сырью.

Установлено, что на поверхности ПД, обладающей развитым микрорельефом, способны эффективно коагулироваться все компоненты, принимающие участие в формировании КА. Максимальной значение $\Delta\Theta_m$ на твердой поверхности ПД формирует ЖС ($\Delta\Theta_m = 288\%$), затем ОММ ($\Delta\Theta_m = 176\%$) и после этого ЖК ($\Delta\Theta_m = 122\%$), находящийся в другом агрегатном состоянии (рисунок 4). Когда на поверхности ПД формируется прослойка жидкости из ОММ или ЖС, то значение $\Delta\Theta_m$ для железорудного концентрата многократно возрастает: на ЖС ($\Delta\Theta_m = 605\%$), на ОММ ($\Delta\Theta_m = 995\%$). Это связано с вязким поглощением твердых частиц ЖК жидкостями, обладающими низким поверхностным натяжением. У ОММ сила поверхностного натяжения существенно ниже, чем у ЖС и ее можно снизить увеличением температуры или применением поверхностно активных растворителей. При этом ПД достаточно эффективно пропитываются ОММ, что визуально подтверждается изменением цвета ПД. Взаимодействие ОММ и ЖС также неоднозначное. Процесс формирования массы ПД, содержащей на поверхности ОММ, с ЖС менее эффективный (режим 6, $t = 25^\circ\text{C}$), поскольку при последующем пере-

мешивании ОММ смывается с поверхности ПД жидким стеклом. Обратная схема (ПД→ЖС→ОММ→ЖК) роста массы более эффективна, когда ЖС, содержащееся на поверхности ПД, в значительно меньшей степени смывается ОММ и способно эффективно поглощать ОММ (режим 5, $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). По-видимому, наибольший прирост массы дает поглощение ЖК любой технологической жидкостью (ОММ, ЖС), поэтому слой сыпучего ЖК должен быть сформирован между ОММ и ЖС. Режим, при котором твердая поверхность ПД взаимодействует с ЖК, осложняется смывом частиц с поверхности ПД и характеризуется насыщением ее этими жидкостями. Поэтому получить на поверхности ПД в чистом виде массивный слой из ЖК затруднительно.



а – ОММ; б – ЖС; в – ЖК

Рисунок 4 – Величина относительной массы соответствующего компонента КА (а, б, в), агрегированного поверхностью ПД или коагулированного слоя соответствующего материала (ОММ, ЖС, ЖК), расположенного на поверхности ПД

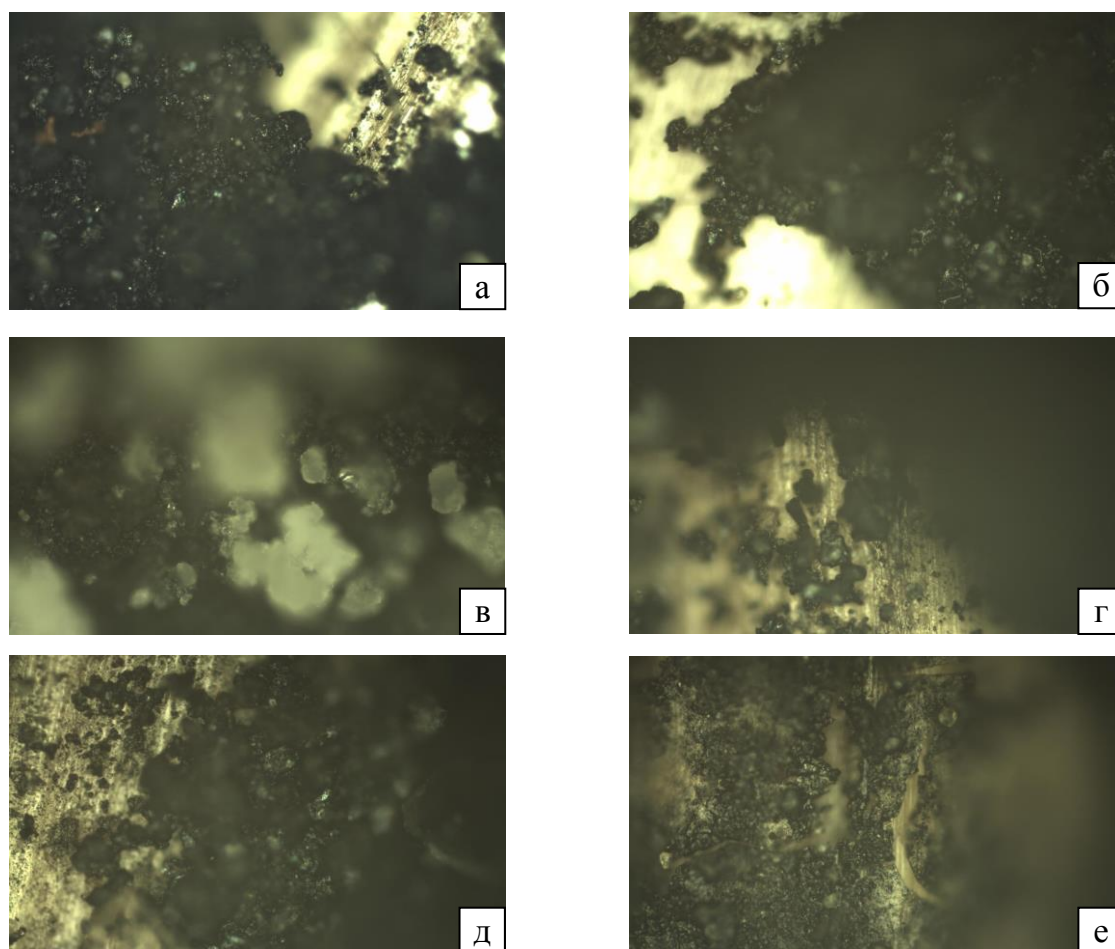
Напрашивается вывод о том, что наиболее эффективен режим, при котором на поверхности ПД можно сформировать слой жидкости, уже содержащей частицы ЖК.

Анализ макроструктуры фрагментов в процессе их вылеживания и затвердевания показывает, что часть ОММ вытекает из структуры КА, содержащего минимум сыпучего материала. Установлено, что минимальное количество ОММ вытекает в режимах 5 и 6, а максимальное количество ОММ теряется в режимах 2 и 3. По-видимому, в свободном, бездозировочном режиме смешивания КА способен поглотить повышенное количество ОММ, но в процессе вылеживания оно не успевает скоагулироваться с ЖС и ЖК и сформировать вязкую слаботекучую структуру КА. Можно предположить, что в этих режимах затруднен физический контакт ОММ со связующим. К этому можно добавить, что в более ранних публикациях [6, 7] было установлено, чтобы исключить наличие нескоагулированного жидким стеклом ОММ, требуется на 1 % ОММ подавать в формуемую смесь примерно 1,2–1,4 % ЖС и сформировать в отсутствии свободного ОММ стабильные сферокоагулянты, обеспечивающие наибольшее упрочнение брикетов.

Повышение температуры ОММ для всех режимов проявляется одно-

значно. Прирост относительной массы компонентов для всех режимов уменьшается на 10–40 % (рисунок 2). Объяснить указанную закономерность можно снижением вязкости ОММ и уменьшением толщины масляной прослойки на поверхности ПД. Можно предположить, что если в процессе смешивания компонентов ОММ не прореагирует с ЖС и ЖК с образованием вязкой суспензии, то при последующей термообработке брикетов, когда его температура будет повышаться, масляная пленка может стекать с поверхности ПД и произойти пропитка маслом окружающих материалов.

Микроструктура поверхности коагуляционных агрегатов показана на рисунке 5. Общими закономерностями микроструктуры КА является то, что в плоскость наблюдения преимущественно попадает поверхностный слой. При этом для некоторых КА выявлено незначительное количество отслоившихся частиц, которые освобождают поверхность ПД от налипшего материала и облегчают анализ микроструктуры. На свободной поверхности ПД различаются структурные впадины и возвышенности продольной формы, заполненные остатками шихты.



Позиции а, б, в, г, д, е соответствуют режимам смешивания 1, 2, 3, 4, 5, 6 таблицы 1. На фотографиях: светлое – поверхность ПД, серое – частицы ЖС, матовое – частицы ОММ, темное – частицы ЖК, $\times 200$.

Рисунок 5 – Микроструктура поверхности коагуляционных агрегатов

На некоторых обнажениях зафиксированы растительные волокна различной конфигурации. На поверхности КА, полученного по режиму 1, зафиксировали слой из частиц ЖК, через которые светлыми фрагментами просвечивают частицы ЖС (рисунок 5, а). Частицы плотно расположены друг к другу, но формируют развитую поверхность КА, изобилующую структурными конгломератами, возвышенностями и впадинами. Микроструктура поверхности КА, полученного в режиме 2, близка структуре КА, сформированного по режиму 1. На ней зафиксирован слой из частиц ЖК, в котором обнаружены фрагменты ОММ, поглотившие частицы железорудного концентрата (рисунок 5, б). Частицы шихты также плотно расположены друг к другу, но кое-где в структуре КА зафиксированы застывшие извилистые пливуны, являющиеся результатом стекания жидкости. На некоторых участках КА обнаружены более рыхлые и пористые области. На поверхности КА, полученного по режиму 3, сформировались крупные образования из жидкого стекла, содержащего частицы ЖК (рисунок 5, в). В процессе анализа микроструктуры КА ожидаемого сплошного слоя из ЖС не обнаружили, поскольку, по-видимому, после кристаллизации произошло частичное растрескивание массы. Причина заключается в том, что ЖК слабо агрегирован на поверхности ПД и способен отслоиться и разрушить слой из ЖС. Здесь также зафиксированы затвердевшие пливуны извилистой формы, проделавшие в структуре КА глубокие каналы. Возможной причиной отслоений массы на КА может быть неравномерная усадка в процессе твердения массы. В режиме 4 на поверхности КА зафиксирован сплошной массив затвердевшего ОММ, содержащего, по-видимому, частицы ЖС и повышенное количество железосодержащего концентрата (рисунок 5, г). Тем не менее, плотная и замазанная поверхность КА обнаруживает мелкие отслоения массы от поверхности ПД. На поверхности КА, полученного по режиму 5, зафиксированы мелкие и достаточно равномерно распределенные фрагменты ЖС, в которые агрегировано небольшое количество железорудного концентрата (рисунок 5, д). Не исключено что, частицы ОММ, расположенные на предыдущем, третьем слое, своим поверхностным натяжением и вязким поглощением формируют более ровный рельеф поверхности КА. На поверхности КА, сформированного по режиму 6, зафиксированы мелкие сфероподобные коагулянты на основе ОММ и ЖС, сравнительно равномерно рассредоточенные на поверхности КА (рисунок 5, е). Можно предположить, что две жидкости, расположенные в контактирующих слоях, способны сформировать более равномерную поверхность КА за счет растекания смеси. Но смесь жидкостей повышает вероятность стекания массы с поверхности ПД, поэтому здесь зафиксировано повышенное количество пливунов, которые формируют извилистые порообразующие каналы и увеличивают вероятность отслоений от поверхности ПД.

Заключение. В процессе экспериментов установили принципиальную возможность получения прочных коагуляционных агрегатов из сложной компонентной базы, являющейся минеральной основой для брикетирования железосодержащих материалов. Получены экспериментальные данные по изменению относительной массы коагуляционных агрегатов и массы компо-

нентов брикетируемой шихты на ПД в зависимости от режима избирательного смешивания и температуры жидкого восстановителя. Установлены закономерности формирования макро- и микроструктуры коагуляционных агрегатов в зависимости от режима избирательного смешивания. Поровая структура брикетируемой массы на основе шихтовых коагуляционных агрегатов, полученных по технологии избирательного смешивания, позволяет прогнозировать повышение скорости восстановления железосодержащего сырья.

Библиографический список

1. Ожогин В. В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В. В. Ожогин. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – 442 с.
2. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
3. Павловец В. М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
4. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 328 с.
5. Использование нетрадиционных восстановителей в производстве металлизованных брикетов /В.В. Ожогин, О.В. Жерлицина, А.П. Бочек, С.А. Коваль – Сталь. – 2007. – №1. – С. 96 – 99.
6. Павловец В.М. Использование техногенных отходов производства в технологии брикетирования железосодержащих материалов / В.М. Павловец, К.И. Домнин К.И.//Сборник трудов X X II Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2021», Часть 2, 347 с., Новокузнецк, СибГИУ, 2021, с. 159-183.
7. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло / В.М. Павловец, К.И. Домнин К.И. //Сборник трудов X X III Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Выпуск 26, часть 2, 317 с, Новокузнецк, СибГИУ, 2022, с. 225-231.
8. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020; Оpubл. 28.06.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.
9. Патент № 2768073 Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2021130684/02, Заявл. 20.10.2021; Оpubл. 23.03.2022. Бюл. №9 //Изобретения. Полезные модели. 2022. – №9.
10. Патент № 2698000; Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2019117140/02, Заявл. 03.06.2019; Оpubл. 21.08.2019. Бюл. №24 //Изобретения. Полезные модели.

2019. – №24.

11. Патент № 2743435 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020104648/02, Заявл. 31.01.2020; Оpubл. 18.02.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2020. – №5.

12. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы в металлургии / В.М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.

УДК 669.162

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ И СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИЗБИРАТЕЛЬНОМУ СМЕШИВАНИЮ

Павловец В.М., Домнин К.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, pawlowets.victor@yandex.ru*

***Аннотация:** Проведена оценка функционального назначения технологических добавок брикетируемой массы на различных этапах производственного маршрута. Представлена техника экспериментов и методика анализа экспериментальных данных. Приведены результаты исследования прочности металлургических брикетов, сформированных с помощью коагуляционных агрегатов, полученных по технологии избирательного смешивания. Обоснована необходимость формирования коагуляционных агрегатов в структуре самовосстанавливающихся брикетов. Проведен анализ изменения прочностных свойств брикетов в зависимости от режима смешивания компонентов брикетируемой массы и структуры коагуляционных агрегатов. Показано влияние размеров порообразующих добавок на прочностные свойства брикетов. Проведен анализ макро- и микроструктуры брикетов, сформированных с помощью коагуляционных агрегатов, полученных по технологии избирательного смешивания.*

***Ключевые слова:** железосодержащие брикеты, техника брикетирования, технология избирательного смешивания, коагуляционные агрегаты, компоненты шихты, жидкий восстановитель, порообразующие добавки.*

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF BRIQUETTING OF IRON- CONTAINING AND STRUCTURE-FORMING MATERIALS SUBJECTED TO SELECTIVE MIXING

Pavlovets V.M., Domnin K.I.

*Siberian state industrial University,
Novokuznetsk, Russia, pawlowets.victor@yandex.ru*

***Abstract:** An assessment of the functional purpose of technological addi-*

tives of the briquetted mass at various stages of the production route was carried out. The technique of experiments and the method of processing experimental data are presented. The results of a study of the strength of metallurgical briquettes formed with the help of coagulation aggregates obtained by selective mixing technology are presented. The necessity of formation of coagulation aggregates in the structure of self-healing briquettes is substantiated. The analysis of changes in the strength properties of briquettes depending on the mode of mixing the components of the briquetted mass and the structure of coagulation aggregates was carried out. The influence of the sizes of pore-forming additives on the strength properties of briquettes is shown. The analysis of the macro- and microstructure of briquettes formed with the help of coagulation aggregates obtained by the technology of selective mixing was carried out.

Keywords: *iron-containing briquettes, briquetting technique, selective mixing technology, coagulation units, charge components, liquid reducing agent, pore-forming additives.*

Брикети́рование железосодержащих материалов является одним из активно развивающихся процессов в подготовке сырья к металлургической плавке. Шихта для производства металлургических брикетов содержит некоторое количество технологических добавок, каждая из которых выполняет определенные задачи [1-2]. Связующие добавки обеспечивают необходимую транспортную и металлургическую прочность брикетов, а в ряде случаев являются структурообразующими материалами [2-3]. В качестве связующего в технике брикетирования наиболее часто используют жидкое стекло (ЖС), которое после смешивания с железосодержащими частицами и другими добавками формирует нормативную прочность брикетируемой массы (более 20–40 МПа). В шихту самовосстанавливающихся брикетов вводят восстановители – углеводородные добавки, которые при термообработке генерируют восстановительные газы [3-4]. В качестве жидкого восстановителя предложено использовать отработанное моторное масло (ОММ), являющееся ценным углеводородным техногенным отходом [5]. Установлено, что оно вносит ряд технологических преимуществ в производстве окускованного железосодержащего сырья [6-7]. Для восстановления оксидов железа внутри брикетов желательна разветвленная сеть поровых каналов, проницаемых для газов и формирующих высокореакционную структуру. Принудительное формирование регламентированной пористости способны выполнять порообразующие добавки (ПД), создающие проницаемые поры определенной структурной идентичности: Эта достаточно сложная задача актуальна в настоящее время. В последние годы в технике окускования металлургического сырья в качестве ПД предложено использовать тонкоизмельченные отходы растительного происхождения на основе стеблей обмолоченных сельскохозяйственных культур (пшеницы, ржи, ячменя и др.), которые наряду со структурообразованием, в ряде случаев, позволяют упрочнять структуру окускованных продуктов и участвовать в процессе восстановления [8-9].

Использование жидких восстановителей, в частности, отработанного

моторного масла при смешивании с жидким стеклом в качестве связующего, более предпочтительно, поскольку смешиваемые компоненты находятся в одном агрегатном состоянии. Железосодержащие материалы, находящиеся в дисперсном сыпучем состоянии, напротив, требуют больших усилий при смешивании с вязким жидким стеклом. При смешивании ЖС с менее вязким ОММ вязкость брикетируемой массы можно снизить и повысить качество смешивания. В наименее неблагоприятном положении в процессе смешивания находятся порообразующие добавки. Они, в отличие от железосодержащих частиц, имеют специфическую форму (трубчатую, игольчатую, желобчатую) и более крупные размеры ($d = 0,1-1,0 \times 1 = 1-5$ мм) и пониженную плотность. После брикетирования частицы восстановителя должны плотно контактировать с железосодержащими частицами, обеспечивая максимальную скорость восстановления оксидов железа, а весь ансамбль перемешанных частиц в структуре брикета должен иметь нормативную прочность.

Сложность агрегатного состояния компонентов шихты требует особого подхода к формированию брикетируемой массы. Технологическая схема получения брикетов, содержащих вышеуказанные добавки, включает механическую подготовку ПД, дозирование и смешивание компонентов с получением брикетируемой массы и ее брикетирование. Использование нескольких видов техногенных добавок различного агрегатного состояния позволяет отказаться от традиционного процесса смешивания, при котором все компоненты смешиваются одновременно, и организовать избирательное смешивание компонентов с получением шихтовых коагуляционных агрегатов (КА), интегрированных в структуру брикетов. Целью предложения по совершенствованию структуры брикетов явилось создание внутри брикетов зон на основе КА, обладающих повышенной скоростью восстановления. Формирование КА возможно с помощью избирательного смешивания компонентов массы, при котором на поверхности ПД создается слоистая структура, состоящая из последовательно сформированных слоев материалов. Ключевым звеном в технологии избирательного смешивания является форма и размеры ПД. Поэтому этот фактор необходимо учитывать при подборе компонентов шихты и разработке технологии брикетирования.

Целью настоящей работы является исследование процесса брикетирования железосодержащих и структурообразующих материалов в технологии получения металлургических брикетов на основе техники избирательного смешивания.

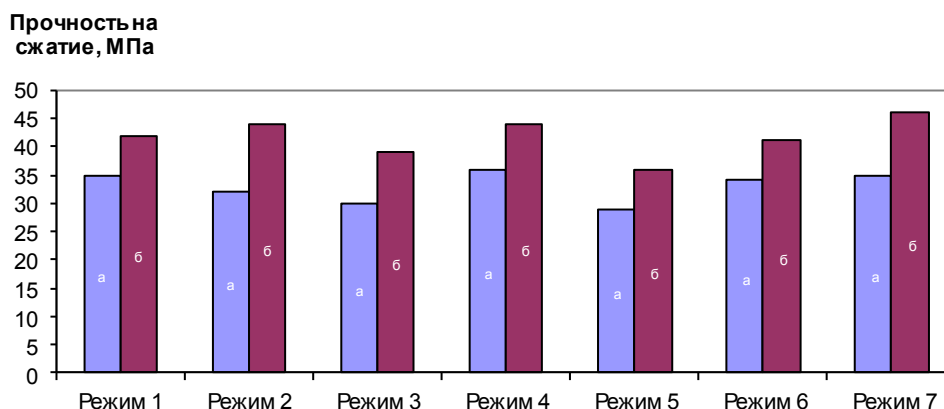
Методика экспериментов заключалась в следующем. Для получения брикетов использовали железорудный концентрат (ЖК) Тейского месторождения ($Fe_{общ} = 63,4$ %, $d_{\text{ср}} = 0,068$ мм). В качестве связующего применяли 50 % раствор жидкого стекла (ЖС), обеспечивающего необходимую схватываемость массы в процессе технологических операций [6-7]. Жидким восстановителем являлось отработанное моторное масло ДВС, содержание которого составляло 5 %. В качестве порообразующих добавок использовали измельченные трубчатые стебли зерновых культур. В первой серии опытов использовали ПД диам. 0,5–1,0 мм и длиной 0,5–4,0 мм, во второй серии применяли

более мелкие частицы - ПД диам. 0,1–0,5 мм и длиной 0,1–2,0 мм. Массовая доля ПД в каждом брикете составляла 1 %. Частицы ПД являлись основой для формирования шихтовых коагуляционных агрегатов. Для повышения достоверности результатов экспериментов дозирование проводили для каждого брикета массой 9–10 г на электронных весах типа VIBRA HT (Shinko Denshi НТР-220СЕ), обеспечивающих точность до 0,0001 г. Для формирования КА порообразующие добавки помещали в один из вышеуказанных компонентов и вручную перемешивали. На поверхности ПД формировался слой нового материала, после чего ее помещали в следующий материал и перемешивали, формируя на ПД второй слой. В конце экспериментов на поверхности ПД было сформировано три слоя материалов (ОММ, ЖС и ЖК). После вылеживания и частичной схватываемости массы КА помещали в остатки массы и перемешивали. Структура режимов и последовательность перемешивания компонентов массы приведены в таблице 1. После этого проводили брикетирование массы на лабораторном прессе при давлении 50 МПа и получали цилиндрические брикеты по форме Архимедова цилиндра ($d = h = 15$ мм). После вылеживания и затвердевания брикетов определяли их прочность, плотность, пористость. Визуально оценивали макро- и микроструктуру готовых брикетов и осколочных агрегатов, образовавшихся после измерения прочности. Анализ проводили с помощью металлографического микроскопа Olympus GX-51 в ЦКП «Материаловедение» СибГИУ.

Таблица 1 – Структура режимов и последовательность смешивания компонентов брикетируемой массы

№ режима	Последовательность смешивания компонентов брикетируемой массы					
	1	2	3	4	5	6
1	ПД	ОММ	ЖС	ЖК	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
2	ПД	ЖС	ОММ	ЖК	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
3	ПД	ОММ	ЖК	ЖС	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
4	ПД	ЖС	ЖК	ОММ	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
5	ПД	ЖК	ОММ	ЖС	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
6	ПД	ЖК	ЖС	ОММ	КА	Смешивание КА и остатков компонентов
7	Одновременное смешивание ПД, ОММ, ЖС, ЖК					

Результаты экспериментов приведены на рисунке 1.



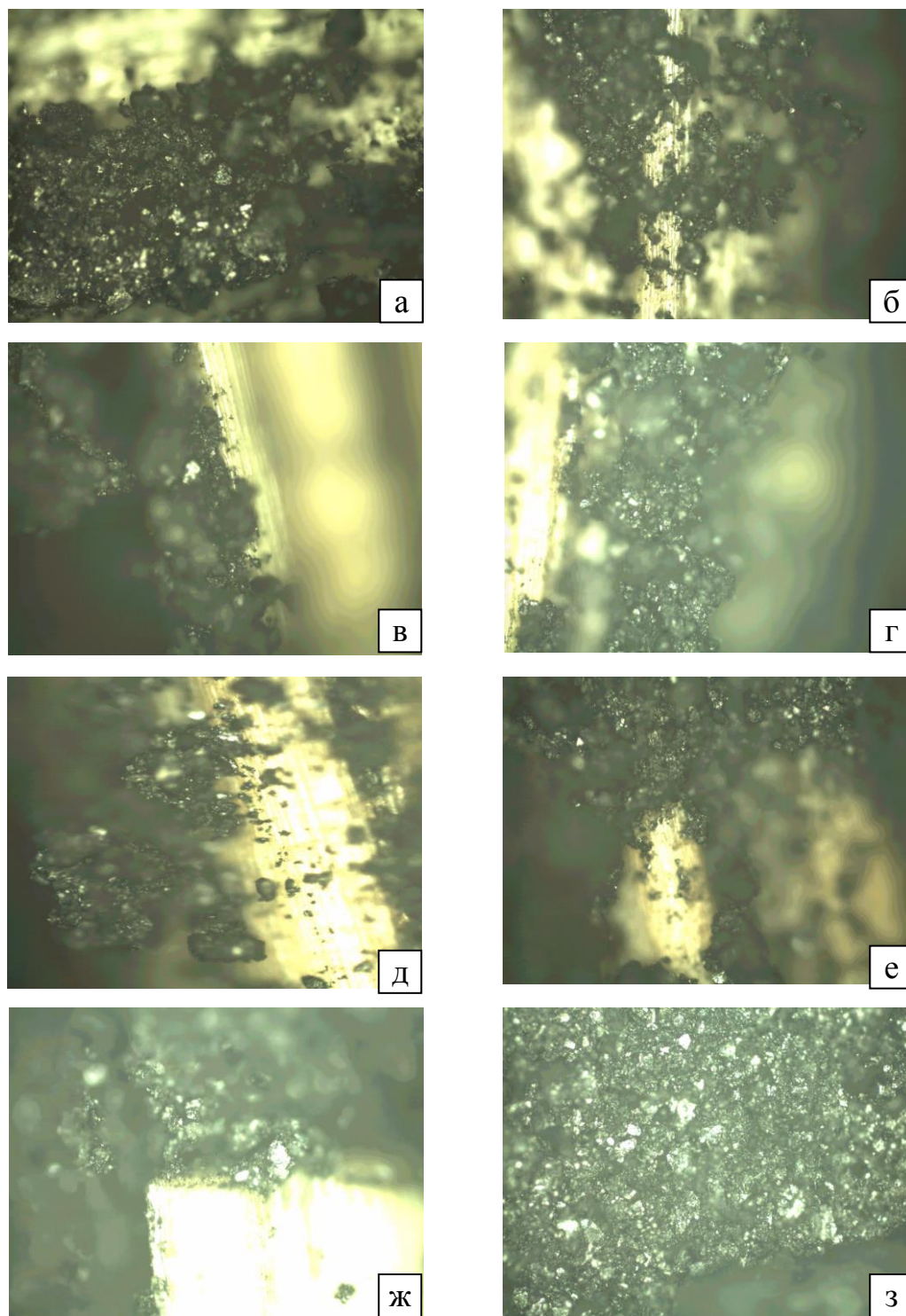
Размер порообразующих добавок: в позиции а – диам. 0,5–1,0 мм и длина 0,5–4,0 мм, в позиции б – диам. 0,1–0,5 мм и длина 0,1–2,0 мм

Рисунок 1 – Величина прочности железосодержащих брикетов в зависимости от режима смешивания компонентов брикетируемой массы (цифры у гистограмм) и размеров порообразующих добавок – а и б

Основным результатом исследований явилась принципиальная возможность получения прочных металлургических брикетов на основе сложной компонентной базы. Установили, что прочность брикетов зависит от режима смешивания компонентов брикетируемой массы и размеров ПД. В режимах 1, 2, 4 получили наибольшие значения прочности брикетов (42,2-44,3 МПа), близкие к режиму 7, при котором реализуется одновременное смешивание ПД, ОММ, ЖС, ЖК. В этих режимах смешивания на поверхности ПД в процессе избирательного смешивания формируется прослойка масляной жидкости на основе ОММ и ЖС, которая пропитывает поверхность ПД и позволяет КА прочнее интегрироваться в структуру брикета. На некоторых режимах смешивания (режимы 5 и 6) получили снижение прочности образцов на 13-19 % по сравнению с режимом 7, в котором все компоненты массы перемешивали одновременно. Объясняется это тем, что в процессе избирательного смешивания на поверхности ПД располагается слой неувлажненного сыпучего ЖК, препятствующий формированию упрочняющей прослойки из жидкой смеси на основе ЖС и ОММ. По-видимому, подобная структура КА не в полной мере интегрируется в тело брикета и является своеобразным концентратором напряжений, снижающим прочность образцов. Поэтому в процессе прессования от поверхности таких добавок легче отслаиваются частицы ЖС, насыщенные ОММ и ЖК. Наибольшее снижение прочности дают ПД крупных размеров (рисунок 1). Снижение размеров ПД до игольчатого состояния повышает прочность брикетов в пределах 18–30 %, но в этом случае растет количество КА относительно небольших размеров и соответственно КА небольшой массы, включая и массу жидкого восстановителя. Поэтому прогнозируемое повышение скорости восстановления для такого размера ПД в КА может быть недостаточно высоким.

Для объяснения результатов экспериментов был проведен анализ микроструктуры материалов. Микроструктура поверхности брикетов и их изло-

мов после разрушения показана на рисунке 2. Общими закономерностями микроструктуры поверхности брикетов является достаточно плотное расположение всех компонентов смеси с минимальной пористостью.



Позиции а, б, в, г, д, е соответствуют режимам смешивания 1, 2, 3, 4, 5, 6; ж и з - режиму 7 (таблица 1). На фотографиях: светлое – поверхность ПД, серое – частицы ЖС, матовое – частицы ОММ, темное – частицы ЖК, $\times 200$.

Рисунок 2 – Микроструктура КА на изломе брикетов

Порообразующие добавки в основном зафиксированы на поверхности изломов, а структура самих ПД и межграничных связей существенно отличается в разных режимах смешивания компонентов брикетируемой массы. На некоторых режимах смешивания межграничные связи имеют ровную поверхность, в других эта поверхность имеет более сложный рельеф и показывает наличие конгломератов бесформенной массы. На границах ПД и в структуре сплошного материала не обнаружено очагов объемной пористости, являющейся причиной снижения прочности прессовки, что говорит о плотном межчастичном контакте компонентов и сохранении первичной структуры КА. Для образцов, полученных по режиму 1, зафиксирована наиболее плотная структура материала, состоящая из смеси ЖС и ЖК, в том числе и на поверхности КА, через который светлыми фрагментами просвечивается поверхность ПД, пропитанная ОММ (рисунок 2, а). Частицы плотно расположены друг к другу и формируют плотную поверхность КА, изобилующую структурными конгломератами, возвышенностями и впадинами. Для образцов, полученных по режиму 2, микроструктура поверхности КА близка структуре КА в режиме 1. Отличие в том, что на поверхности ПД сгруппированы небольшие очаги более рыхлых конгломератов, состоящих из ЖК и ОММ. Подобная структура была зафиксирована в более ранних публикациях [6-7]. На поверхности ПД сосредоточены сферокоагулянты, в которых обнаружены фрагменты ОММ, поглотившие частицы ЖК (рисунок 2, б). Затвердевшие сферокоагулянты являются основой для повышения прочности окускованных продуктов [10-11]. Частицы шихты также плотно расположены друг к другу, но кое-где в структуре КА зафиксированы застывшие извилистые пливуны, являющиеся результатом стекания жидкости. Для образцов, полученных по режиму 3, на границе КА и сформованного материала сгруппировались крупные образования из жидкого стекла, содержащего частицы ЖК (рисунок 2, в). Характер границы между ПД и затвердевшей шихтой свидетельствует о хрупком отслоении массы в процессе приложения нагрузки, но к существенному снижению прочности брикетов это не привело. Здесь также зафиксированы затвердевшие пливуны извилистой формы, проделавшие в структуре КА поровые каналы. Вероятной причиной отслоений массы от КА также может быть дифференцированная усадка в процессе затвердевания шихты на поверхности КА. Для образцов, полученных по режиму 4, на границе КА зафиксирован затвердевший массив расплывшегося ОММ, содержащего частицы ЖС и значительное количество железосодержащего концентрата (рисунок 2, г). Тем не менее, плотная и замазанная поверхность КА обнаруживает потеки и мелкие отслоения массы от поверхности ПД. На рисунке 2, г показана микроструктура ПД в теле брикета, полученного по режиму 5. На поверхности КА зафиксированы мелкие и равномерно распределенные фрагменты брикетируемой массы на основе ЖК, в которой обнаружены измельченные в процессе смешивания частицы ЖС (серое) и сферокоагулянты на основе ОММ (матовое). По-видимому, частицы ОММ, расположенные на последнем, третьем слое ПД, своим поверхностным натяжением и вязким поглощением частиц ЖК формируют более

ровный рельеф границы КА, но в меньшей степени взаимодействуют с поверхностью ПД. Для образцов, полученных по режиму 6, на поверхности КА зафиксированы мелкие сфероподобные коагулянты на основе ОММ и ЖС, сравнительно равномерно рассредоточенные на поверхности КА, близкие по своей структурной идентичности микроструктуре брикета в режиме 5 (рисунок 2, е). Для образцов, полученных по режиму 7 (рисунок 2, ж), поверхность ПД практически не содержит частиц ЖК и связующей жидкости. Однако граница между ПД и затвердевшим материалом излома достаточно плотная. Микроструктура брикета (рисунок 2, з) отличается наличием более мелких частиц ЖС на поверхности брикета и более равномерным распределением компонентов смеси по сечению брикета. По-видимому, жидкие компоненты на основе ОММ и ЖС не связаны избирательностью смешивания и способны в большей степени диспергироваться в процессе подготовки брикетизируемой массы к прессованию.

Закключение. В процессе исследований установили принципиальную возможность получения прочных металлургических брикетов на основе сложной компонентной базы брикетизируемой смеси. Доказано, что формировать структурные свойства железосодержащих брикетов можно избирательным смешиванием технологических добавок, вводимых в формуемую массу. Этот технологический прием дает возможность сформировать в брикетизируемой массе и в структуре брикетов шихтовые коагуляционные агрегаты, обладающие повышенной реакционной способностью и позволяющие прогнозировать повышение скорости восстановления железосодержащего сырья в ходе последующей термообработки.

Библиографический список

1. Ожогин В. В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В. В. Ожогин. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – 442 с.
2. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
3. Павловец В. М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
4. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 328 с.
5. Евдокимов А.Ю. Комплексная схема переработки отработанных масел и смазок / А.Ю. Евдокимов А.Ю. [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия – 1990. 1. – С. 28–31.
6. Павловец В.М. Использование техногенных отходов производства в технологии брикетирования железосодержащих материалов / В.М. Павловец, К.И. Домнин К.И. // Сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2021», Часть 2, 347 с., Новокузнецк, СибГИУ, 2021, с.

159-183.

7. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло / В.М. Павловец, К.И. Домнин К.И. //Сборник трудов X X III Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Выпуск 26, часть 2, 317 с, Новокузнецк, СибГИУ, 2022, с. 225-231.

8. Патент № 2698000; Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2019117140/02, Заявл. 03.06.2019; Оpubл. 21.08.2019. Бюл. №24 //Изобретения. Полезные модели. 2019. – №24.

9. Патент № 2743435 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020104648/02, Заявл. 31.01.2020; Оpubл. 18.02.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2020. – №5.

10. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020; Оpubл. 28.06.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.

11. Патент № 2768073 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2021130684/02, Заявл. 20.10.2021; Оpubл. 23.03.2022. Бюл. №9 //Изобретения. Полезные модели. 2022. – №9.

УДК 666.189

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИЙ С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО СТЕКЛОКОМПОЗИТА

Скирдин К.В., Казьмина О.В.

*Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия, skirlin.kirill@mail.ru*

***Аннотация.** В работе разработаны составы для получения пористого стеклокомпозита по одностадийной щелочной технологии с пониженным содержанием щелочного компонента на основе маршалита с частичной заменой маршалита на микрокремнезем. Показано интенсифицирующее действие микрокремнезема на процессы образования расплава и изменение показателей прочности, плотности и коэффициента вспенивания пористого стеклокомпозита.*

***Ключевые слова:** стеклокомпозит, щелочная технология, маршалит, микрокремнезем, одностадийная технология.*

INVESTIGATION OF COMPOSITIONS OF COMPOSITIONS WITH MICROSILICON FOR THE PRODUCTION OF POROUS GLASS COMPOSITE

Skirdin K.V., Kazmina O.V.

**Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia, skirlin.kirill@mail.ru**

Abstract. *The compositions for the production of porous glass composite by single-stage alkaline technology with a reduced content of the alkaline component based on marshalite with partial replacement of marshalite with microsilicon have been developed. The intensifying effect of microsilicon on the processes of melt formation and changes in the strength, density and foaming coefficient of porous glass composite are shown.*

Keywords: *glass composite, alkaline technology, marshalite, microsilicon, single-stage technology.*

Современный производственный сектор, несмотря на актуальность экологизации техносферы, разработки безотходных технологических решений и инновационных подходов к утилизации загрязняющих веществ, продолжает накапливать значительные объемы производственных отходов. Ежегодные объемы отходов от металлургических предприятий в мире оцениваются более чем в 50 млрд.т. железосодержащих пылей и шламов, при производстве металла на одну тонну продукта приходится порядка 80-100 кг отходов [1]. В России, согласно данным Федеральной службы государственной статистики общий объем отходов всех видов составляют не менее 30 млрд. т. (по состоянию на 2018 г.), из которых порядка 70% составляет доля металлургического производства. Ежегодное накопление отходов в объеме 189-280 млн.т. приводит к изъятию из оборота продуктивных земель в масштабе 400 тыс. га [2-3]. В связи с этим разработка технологий получения материалов с использованием отходов металлургического производства является актуальной.

К одному из перспективных видов техногенного сырья относится микрокремнезем – отход производства ферросплавов и кристаллического кремния, объемы которого в России составляют порядка 150 тыс.т. в год (по состоянию на 2019 г.). При получении одной тонны кремния образуется порядка 450-500 кг технического микрокремнезема. Состав и свойства микрокремнезема, в частности высокая удельная поверхность и аморфность, позволяют рассматривать отход в качестве перспективного и доступного техногенного сырья. Известны составы и способы получения из композиций на основе микрокремнезема растворимых силикатов (жидкое стекло), пеностекла и пеностеклокристаллических материалов [4-6]. При этом получаемый пористый материал не имеет химической стойкости и может применяться только в условиях пониженной влажности. Использование микрокремнезема в качестве реакционно-активной добавки позволит избежать этого недостатка.

Цель работы – установить влияние микрокремнезема на процесс синтеза и свойства пористого стеклокомпозита, получаемого по одностадийной щелочной технологии из композиций на основе маршалита при пониженном

содержании гидроксида натрия.

В настоящее время в научной литературе и периодике отсутствуют данные по составам и технологии пористых материалов на основе маршалита по щелочной технологии. Маршалит, в отличие от микрокремнезема, имеет кристаллическое строение и содержит в своем составе вещества, повышающие химическую стойкость материала. В тоже время это затрудняет процесс получения пористого материала по одностадийной щелочной технологии. Классический двухстадийный способ получения пеностекла относится к высокоэнергоемким процессам и более сложен в технологическом плане. Поэтому частичная замена маршалита на микрокремнезем может позволить получить пористый стеклокомпозит по одностадийной технологии с применением гидроксида натрия.

В работе использован микрокремнезем – отход производства ООО «Братского завода ферросплавов» и природный маршалит Елбашинского месторождения, химический состав которых приведен в таблице 1. Согласно данным маршалит и микрокремнезем относятся к кремнеземистому сырью с высоким содержанием кремнезема.

Таблица 1 - Химический состав сырья

Сырьевой материал	Содержание оксидов, масс. %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Δ п.п.
микрокремнезем	94,2	0,5	0,40	1,2	-	3,7
маршалит	95,7	2,1	0,3	1,0	0,4	0,5

Исследуемые материалы предварительно сушили и просеивали через сито 0,5 мм для удаления агломерированных частиц. Истинная плотность маршалита и микрокремнезема, определенная пикнометрическим методом, составила 2800 и 2100 кг/м³ соответственно. Удельная поверхность по методу ПСХ составила 2300 см²/г для маршалита и 6900 см²/г для микрокремнезема, что свидетельствует о высокой дисперсности материалов и в первую очередь микрокремнезема. По данным лазерного анализатора, установлено, что 75% частиц маршалита имеют размер менее 30 мкм, 73 % частиц микрокремнезема имеют размер менее 0,4 мкм (рисунок1).

Щелочная технология включает взаимодействие кремнеземистого компонента с горячим (95-98 °С) раствором NaOH и образование гидросиликатов натрия и геля кремниевой кислоты по реакции (1):



Эксперименты показали, что получаемая композиция геля и гидросиликатов, в зависимости от количества добавленной воды и концентрации раствора, может быть в виде быстро твердеющей пасты или суспензии, а также пластичного материала из которого можно сформировать гранулы. В работе использован гранулированный материал, который подвергался сушке и последующей термообработке при температуре 850°С. Вспенивание композиции происходит за счет выделения паров воды при дегидратации геля по

реакции (2):

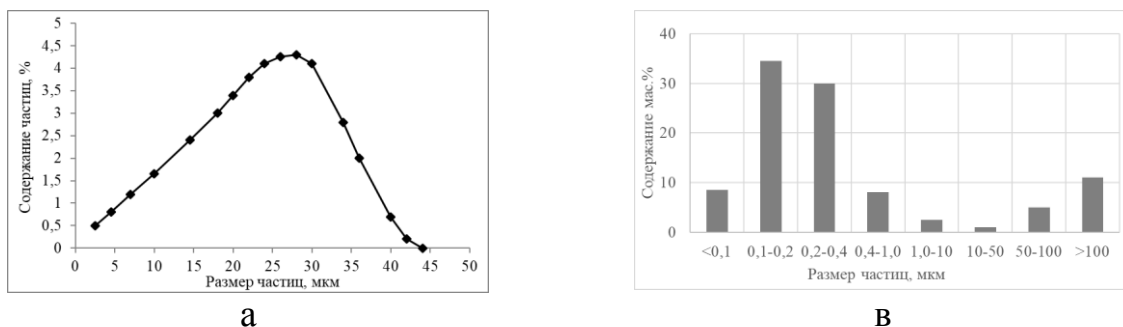
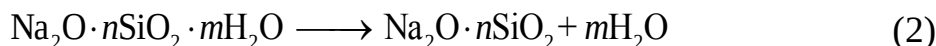


Рисунок 1 - Дифференциальная кривая распределения частиц маршалита (а) и микрокремнезема (в) по размерам На дифракционных рентгенограммах маршалита (рисунок 2, а) и микрокремнезема (рисунок 2, в) видно, что маршалит представляет собой полностью кристаллический материал, состоящий из β -кварца, микрокремнезем является аморфным с тремя рефлексами небольшой интенсивности, относящимися к графиту и карбиду кремния

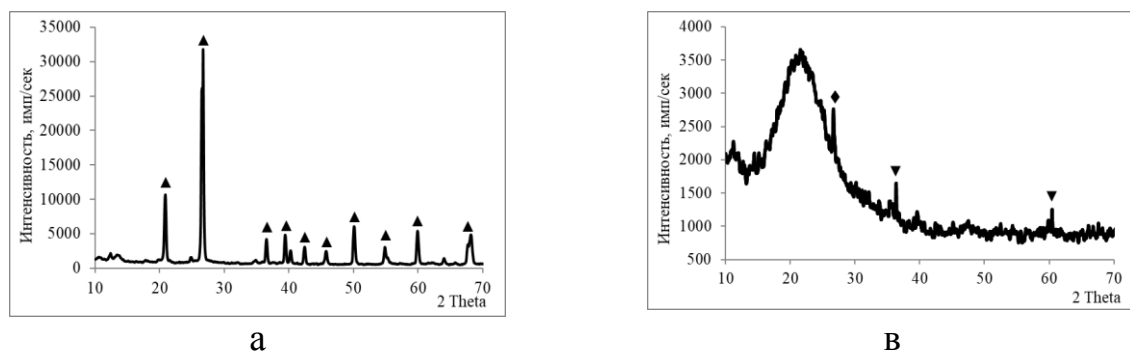


Рисунок 2 - Дифракционные рентгенограммы маршалита (1) и микрокремнезема (2): $\blacktriangle$ - β -кварц, $\blacklozenge$ - графит, $\blacktriangledown$ - карбид кремния SiC

Используемый в щелочной технологии раствор гидроксида натрия является известным ускорителем процесса силикатообразования, добавление которого в шихту снижает порог теплоты реакций образования силикатов. Однако высокая химическая активность NaOH также накладывает ограничения связанные с безопасностью технического персонала и сохранением работоспособности оборудования, ввиду высокой коррозионной активности раствора. Поэтому актуальны исследования по разработке составов стеклокомпозитов на основе кремнеземистого сырья с пониженным (менее 20 % Na_2O) содержанием щелочного компонента [7-10].

На фазовой диаграмме Na_2O - SiO_2 (рисунок 3) показана область составов с низким содержанием Na_2O и наименьшей температурой плавления в системе (798 °C), выбранная для анализа. Для прогнозной оценки возможности получения пористых стеклокомпозитов при пониженном содержании щелочного компонента построены кривые плавкости (рисунок 4) составов содержащих SiO_2 70-88 %. Оксидные составы композиций приведены в таб-

лице 2, по данным которой видно, что соотношение $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ меняется в широком диапазоне от 2,3 до 7,3.

По кривым плавкости (рисунок 4) установлено, что оптимальное для вспенивания количество жидкой фазы в 70 % достигается только для составов с соотношением $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2,3-4,3$. При этом не учитывается влияние примесей и других, кроме SiO_2 , оксидов, присутствующих в сырьевых материалах, которые влияют на количество жидкой фазы. Поэтому для экспериментов выбраны высококремнеземистые составы с соотношением $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=4,3-7,3$.

Количество микрокремнезема, которое вводили в состав композиции взамен маршалита, составило 10, 20 и 30 масс. %. Установлены зависимости влияния микрокремнезема на процесс вспенивания (коэффициент вспенивания) и свойства полученного пористого материала (плотность, прочность), представленные на рисунке 5.

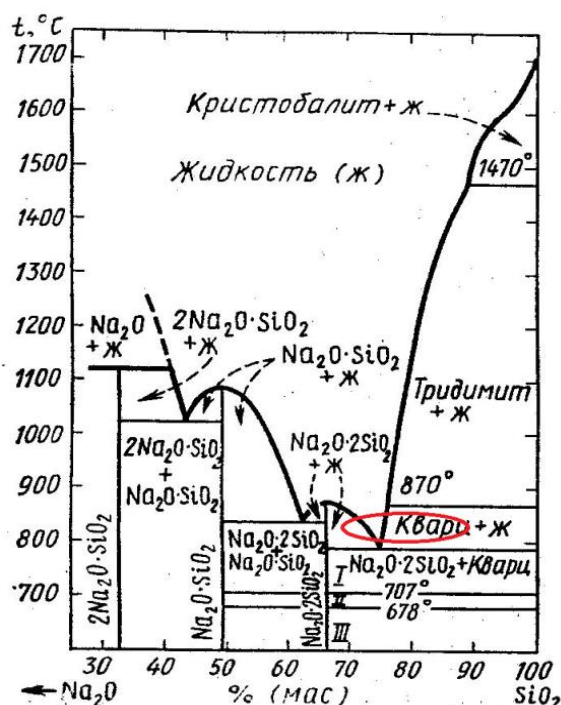


Рисунок 3 - Фазовая диаграмма системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$

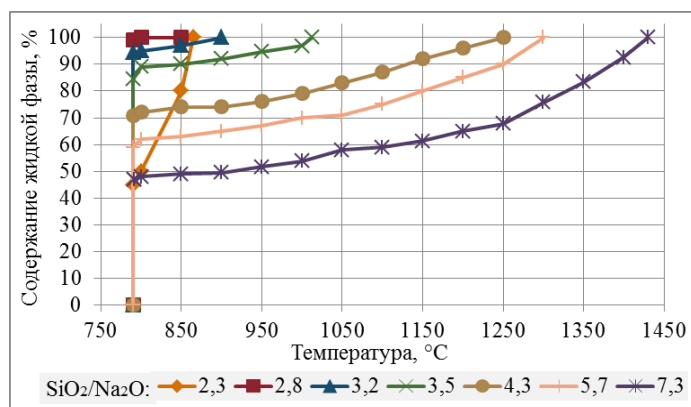
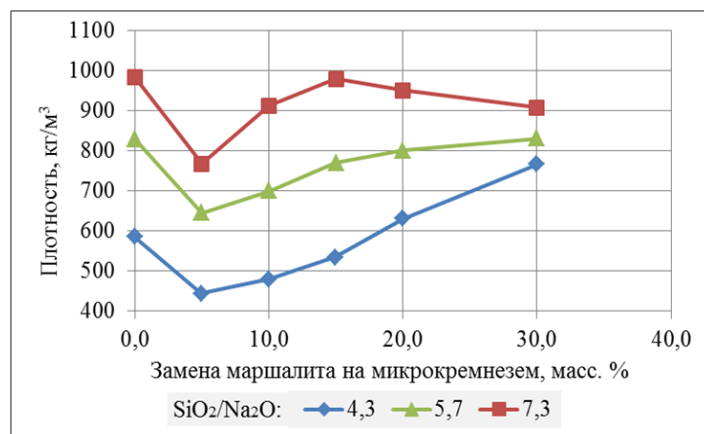


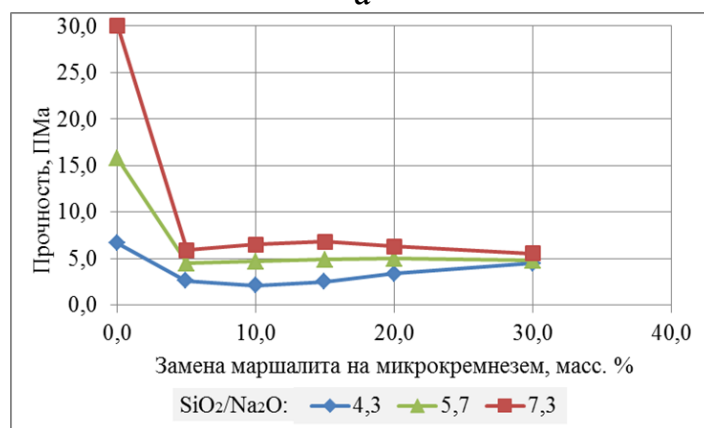
Рисунок 4 - Кривые плавкости составов с различным соотношением $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

Таблица 2 - Оксидный состав композиции

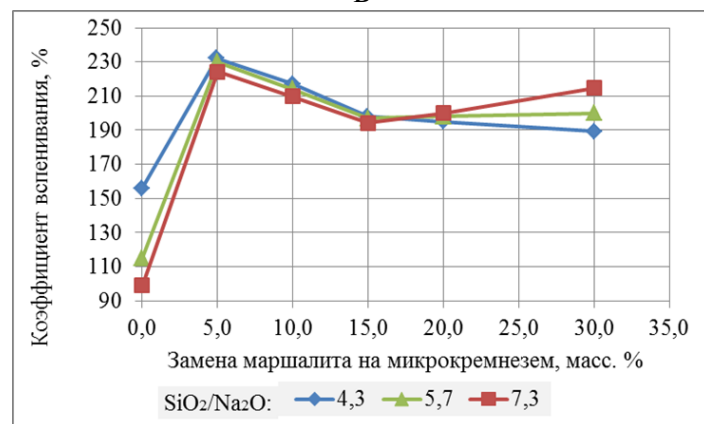
Оксиды и их соотношение	Содержание оксидов в составе композиции, масс. %						
	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	70	74	76	78	81	85	88
Na ₂ O	30	26	24	22	19	15	12
SiO ₂ / Na ₂ O	2,3	2,8	3,2	3,5	4,3	5,7	7,3



а



в



с

Рисунок 5 - Зависимость плотности (а), прочности (в) и коэффициента вспенивания (с) пористого стеклокомпозита от количества микрокремнезема, введенного взамен маршалита, для композиций с различным соотношением SiO₂/Na₂O

Как видно из полученных данных, введение микрокремнезема, взамен маршалита, благоприятно сказывается на процессе вспенивания. Значение коэффициента вспенивания увеличивается со 155 % до 230 % при росте количества микрокремнезема с 10 до 30 %. Установлено, что с увеличением соотношения $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ от 4,3 до 7,3 плотность пористого стеклокомпозита увеличивается с 600 до 1000 кг/м³, при этом прочность материала при введении микрокремнезема падает с 30 МПа до 7 МПа.

По результатам рентгенофазового анализа готового материала (рисунок 6) рассчитано содержание аморфной и кристаллической фаз с помощью программы «Repex». Установлено, что введение добавки микрокремнезема позволяет при одинаковом времени вспенивании получить большее количество расплава (рисунок 7). При 30% содержании микрокремнезема уменьшение количества аморфной фазы связано с кристаллизацией из расплава β -кварца, что способствует увеличению прочности и плотности материала.

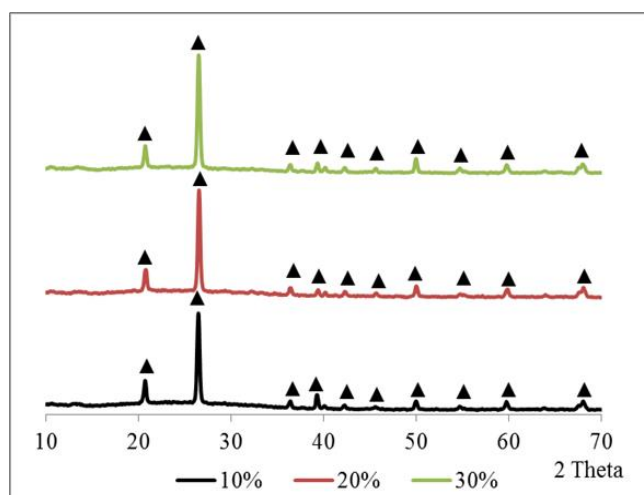


Рисунок 6 - Рентгенограммы пористого материала, полученного при 850 °С (30 минут) с заменой маршалита на микрокремнезем 10, 20, 30 масс.%, при $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=4,3$: ▲ - β -кварц

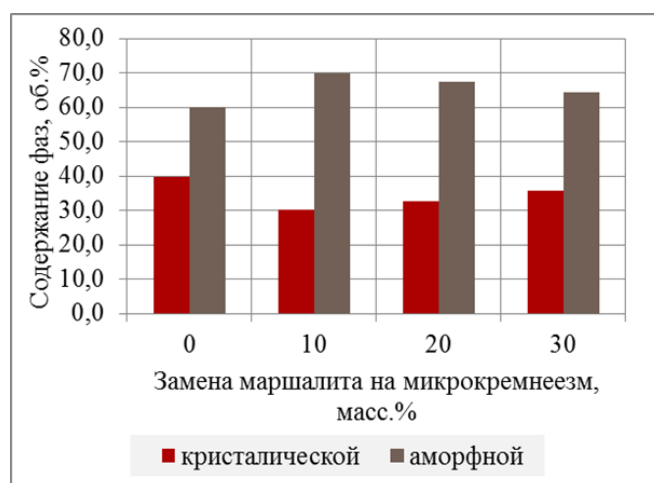


Рисунок 7 - Гистограммы содержания фаз в материале, полученном при 850°С (30 минут), с заменой маршалита на микрокремнезем 10, 20, 30 масс.%, при $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=4,3$

Согласно полученным результатам установлена возможность получения пористого стеклокомпозита на основе маршалита с частичной заменой на микрокремнезем по одностадийной щелочной технологии при пониженном содержании щелочи (Na_2O 19 %). Микрокремнезем оказывает комплексное действие. Частичная замена маршалита на активный, высокодисперсный, аморфный микрокремнезем интенсифицирует реакции силикатообразования и как следствие ускоряет процесс образования расплава, увеличивает количество расплава, образующегося при одинаковом времени вспенивания. Замена маршалита на микрокремнезем увеличивает коэффициент вспенивания композиции со 155 до 230 % и уменьшает прочность готового материала.

Оптимальным для получения пористого материала является состав с соотношением $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 4,3, с заменой маршалита на микрокремнезем в количестве 10%. Для данного состава получен стеклокомпозит с плотностью 450-500 кг/м³ и прочностью при сжатии 4-3 МПа, что позволяет отнести его к теплоизоляционно-конструкционным материалам. Полученный стеклокомпозит имеет большую прочность, чем пеностекло, полученное по более энергозатратной классической двухстадийной технологии (1-1,5 МПа).

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FEMN-2022-0001).

Библиографический список

1. Волынкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 2(20). С. 43-49.
2. Сычева И.В., Котенева М.В., Шельженко Н.А., Тихобаев В.М. о необходимости государственной поддержки развития инфраструктуры переработки отходов черной металлургии в Тульском регионе // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, 2019. № 1. С. 335-344.
3. Брызгалов С.В. Утилизация металлургических шлаков при производстве железобетонных свай // Экология и промышленность России. 2008. № 7. С. 40-43.
4. O. Kazmina, V. Vereshchagin, A. Abiyaka, Prospects for use of finely disperse quartz sands in production of foam-glass crystalline materials. Glass and Ceramics. 2008. V 65. N 9-10. P. 319-321.
5. Суворова О.В., Манакова Н.К. Пористые материалы на основе микрокремнезема и минеральных наполнителей // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 32-35.
6. Manevich V.E, Subbotin R.K., Nikiforov E.A., Senik N.A., Meshkov A.V. Diatomite - siliceous material for the glass industry // Glass and Ceramics. 2012. V. 9. P. 168-172.
7. Казьмина О.В., Волланд С.Н., Душкина М.А., Верещагин В.И. Использование дисперсных отсеков строительных песков для получения пеностеклокристаллических материалов // Строительные материалы. 2014. №.1-2. С. 93-97.

8. Гольцман Б.М., Яценко Е.А., Геращенко В.С., Комунжиева Н.Ю., Яценко Л.А., Смолий В.А., Чиа-чи Ченг. Пористые теплоизоляционные материалы на основе различных видов силикатного сырья // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1(205). С. 55-60.

9. Казьмина О.В., Волкова А.Ю. Получение пеностеклокристаллического материала на основе природного и техногенного кремнеземистого сырья // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. 2016. Т. 1. С. 110-114.

10. Казанцева Л.К., Сторожено Г.И. Теплоизоляционный материал на основе опокового сырья // Строительные материалы. 2013. № 5. С. 85-88.

УДК 622, 504

РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА

Баженова Н.Н., Водолеев А.С., Гибадуллин Р.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, BazhenovaNN_ak@mail.ru*

Аннотация. В статье описывается актуальность вопроса рекультивации нарушенных земель при добыче угля открытым способом, направления рекультивации и ее этапы, проведен обзор основных проблем несоответствия требованиям документам, регламентирующих вопросы восстановления нарушенных земель.

Ключевые слова: рекультивация, нарушенные земли, экологический ущерб, плодородный слой почвы.

RECUITIVATION OF DISTURBED LANDS IN THE COAL MINES OF THE KUZNETSK COAL BASIN

Bazhenova N.N., Vodoleev A.S., Gibadullin R.M.

*Siberian state industrial university,
Novokuznetsk, Russia, BazhenovaNN_ak@mail.ru*

Abstract. The article describes the relevance of the issue of recultivation of disturbed lands during open-pit coal mining, the directions of recultivation and its stages, an overview of the main problems of non-compliance with the requirements of documents regulating the restoration of disturbed lands.

Keywords: reclamation, disturbed lands, environmental damage, fertile soil layer.

Кузнецкий угольный бассейн или Кузбасс является одним из крупнейших месторождений угля в России. Площадь его территории составляет 26,7

тысяч км². Угленосная толща Кузнецкого угольного разреза содержит около 350 угольных пластов различной мощности. Преобладающая мощность пластов угля от 1,3 до 4,0 м. Имеются угольные пласты в 9-15 и даже в 20 м, а в местах раздувов до 30 м. Из всей угледобычи в Кузбассе на долю месторождений, которые осваивают открытым способом, приходится около 66 %.

Угольная промышленность создает мощное техногенное воздействие на окружающую среду. Каждая тонна добытого угля сопровождается сбросом 2,5 м³ загрязненных сточных вод, размещением 2,16 м³ вскрышных (вмещающих) пород; каждые 1000 т добычи – выбросом в атмосферу 2,17 т вредных веществ, нарушением 0,55 га земель. По статистическим данным, площадь нарушенных земель в Кузбассе на конец 2020 года составляла 95,6 тыс. га [1].

Одной из экологических проблем Кузбасса является низкий процент ликвидации последствий нарушения экологических норм землепользования в результате угледобычи, которая ведется преимущественно открытым способом. При использовании земельных ресурсов происходит уничтожение растительного, почвенного покрова, почвообразующих слоев литосферы и геологического фундамента ландшафта. Значительная часть ландшафтных нарушений при открытой разработке угольных месторождений представляется в виде внешних породных отвалов вскрышных пород, расположенных за пределом карьерных полей. Вынесенные на поверхность громадные массы глубинных горных пород постепенно «растекаются» на прилегающие территории, загрязняя их тяжелыми металлами, сернистыми, фенольными и другими токсичными для человека продуктами окисления глубинных горных пород [2]. Площадь нарушенных земель в регионе в 12,5 раза превышает среднероссийские показатели. Вместе с тем в некоторых районах Кемеровской области техногенно нарушено до 20 % площади пашни [3]. Многие месторождения, отрабатываемые открытым способом, не рекультивируются в полной мере и в соответствии с экологическими нормами, консервируются, либо перепродаются более мелким собственникам, неспособным нести затраты на восстановление нарушенных земель. Область входит в число субъектов РФ, где доля проб из почв селитебной зоны, не соответствующих гигиеническим нормативам, постоянно и значительно превышает среднероссийские по микробиологическим и паразитологическим показателям.

Одним из способов снижения экологического ущерба при этом является рекультивация земель. Рекультивация земель представляет собой мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почв, восстановления плодородного слоя почвы, создания защитных лесных насаждений. Рекультивацию нарушенных земель проводят собственники земельных участков, землепользователи, землевладельцы, арендаторы, обладатели сервитута, а при установлении лиц, действия которых повлекли нарушение земель и земельных участков – указанные лица.

Рекультивация нарушенных земель, как правило, осуществляется в два последовательных этапа: технический и биологический.

Технический этап рекультивации нарушенных земель предусматривает комплекс работ по созданию необходимых условий для дальнейшего использования рекультивированных земель в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием. является подготовительным звеном к биологическому этапу. Основная задача этапа – техническое устройство нарушенной территории, подготовка условий для нормального роста и развития растительности.

Технический этап рекультивации предусматривает выполнение мероприятий по подготовке земель, освобождающихся после отработки месторождения, к последующему целевому использованию.

Мероприятия заключаются в грубой и чистовой планировке поверхности нарушенных земель:

- постановке откосов уступов и ярусов отвала в устойчивое положение;
- ликвидации последствий осадки отвала и выполнении противоэрозийных мероприятий;
- выполаживании откосов отвала;
- формировании ограждающего вала по периметру карьерной выемки для предотвращения падения людей и животных;
- очистке рекультивируемой территории от производственных отходов, в том числе строительного мусора, с последующим их захоронением или складированием в установленном месте.

Кроме того, на техническом этапе осуществляется строительство дорог, гидротехнических и мелиоративных сооружений, а также выполняются другие работы, создающие необходимые условия для дальнейшего использования рекультивированных земель по целевому назначению или для проведения мероприятий по восстановлению плодородия почв (биологический этап). Если решения по рекультивации предусматривают нанесение на рекультивируемые поверхности плодородного слоя почвы и потенциально плодородных пород, необходимо установить их пригодность для рекультивации посредством определения химического состава, санитарного состояния, агрохимических свойств.

На угольных разрезах с целью сокращения сроков и затрат на рекультивацию внутренних отвалов технический этап рекультивации совмещается с производством вскрышных работ и формированием отвалов, а также используется веерная отсыпка породы на верхнем ярусе отвала. Рекультивационные работы обычно ведутся с применением имеющегося горнотранспортного оборудования: экскаваторов, отвалообразователей, бульдозеров, скреперов, карьерных самосвалов.

Биологическая рекультивация – это комплекс мелиоративных и агротехнических мероприятий по восстановлению плодородия и хозяйственной ценности земель, подразумевает, в первую очередь, восстановление плодородия почвы [4]. По данным почвоведов, в среднем это удаётся сделать на

80 %, но можно добиться и 90-процентного восстановления. Также биологическая рекультивация направлена на выращивание деревьев и кустарников и на возвращение землям экологической, экономической и социальной ценности. Бывшие выработки могут впоследствии использоваться для производства древесины (если на месте карьеров создаются лесохозяйственные участки) и для выращивания сельскохозяйственных культур. Восстановленные земли могут также использоваться под пастбища, карьеры могут превращаться в рыбные водоёмы и многое другое.

Классификация нарушенных земель по направлениям рекультивации в зависимости от видов последующего использования в народном хозяйстве указана в ГОСТ 17.5.1.02-85 [5] и представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация нарушенных земель по направлениям рекультивации в зависимости от видов последующего использования в народном хозяйстве

Группа нарушенных земель по направлениям рекультивации	Вид использования рекультивированных земель
Земли сельскохозяйственного направления рекультивации	Пашни, сенокосы, пастбища, многолетние насаждения
Земли лесохозяйственного направления рекультивации	Лесонасаждения общего хозяйственного и полезного назначения, лесопитомники
Земли водохозяйственного направления рекультивации	Водоёмы для хозяйственно-бытовых, промышленных нужд, орошения и рыбоводческие
Земли рекреационного направления рекультивации	Зоны отдыха и спорта: парки и лесопарки, водоёмы для оздоровительных целей, охотничьи угодья, туристические базы и спортивные сооружения
Земли природоохранного и санитарно-гигиенического направления рекультивации	Участки природоохранного назначения: противоэрозионные лесонасаждения, задернованные или обводненные участки, участки, закрепленные или законсервированные техническими средствами, участки самозарастания - специально не благоустраиваемые для использования в хозяйственных или рекреационных целях
Земли строительного направления рекультивации	Площадки для промышленного, гражданского и прочего строительства, включая размещение отвалов отходов производства (горных пород, строительного мусора, отходов обогащения и др.)

Выбранное направление рекультивации должно с наибольшим эффектом и наименьшими затратами обеспечивать решение задач рационального и комплексного использования земельных ресурсов района, создания гармоничных ландшафтов, отвечающих экологическим, хозяйственным, эстетическим и санитарно-гигиеническим требованиям.

Основными направлениями рекультивации, применяемыми на угольных разрезах, являются – сельскохозяйственное, лесохозяйственное и санитарно-гигиеническое.

Согласно ГОСТ 17.5.3.04-83 [6], в районах с наличием плодородных почв и благоприятными природными условиями, где возможно производство сельскохозяйственной продукции, рекультивация земель должна вестись преимущественно в сельскохозяйственном направлении. Сельскохозяйственное направление рекультивации экономически целесообразно проводить в районах с высокой плотностью населения с близостью мест потребления выращиваемой продукции.

Требования к рекультивации земель при сельскохозяйственном направлении:

- формирование участков нарушенных земель, удобных для использования по рельефу, размерам и форме, поверхностный слой которых должен быть сложен породами, пригодными для биологической рекультивации;
- планировка участков нарушенных земель, обеспечивающая производительное использование современной техники для сельскохозяйственных работ и исключающая развитие эрозионных процессов и оползней почвы;
- нанесение плодородного слоя почвы на малопригодные породы при подготовке земель под пашню;
- использование потенциально плодородных пород с проведением специальных агротехнических мероприятий при отсутствии или недостатке плодородного слоя почвы;
- проведение интенсивного мелиоративного воздействия с выращиванием однолетних, многолетних злаковых и бобовых культур для восстановления и формирования корнеобитаемого слоя и его обогащения органическими веществами при применении специальных агрохимических, агротехнических, агролесомелиоративных, инженерных и противоэрозионных мероприятий;
- получение заключения агрохимической и санитарно-эпидемиологической служб об отсутствии опасности выноса растениями веществ, токсичных для человека и животных.

Лесная рекультивация предусматривается тогда, когда невозможна или нецелесообразна сельскохозяйственная, но требуется улучшение экологической обстановки, защита прилегающих земель от эрозии и дефляции, необходимо восстановление лесных массивов, нарушенных в процессе разработки полезных ископаемых [6]. Земельные участки в составе земель лесного фонда преимущественно подлежат лесохозяйственному направлению рекультивации [7].

Требования к рекультивации земель при лесохозяйственном направлении:

- создание насаждений эксплуатационного назначения, а при необходимости, лесов защитного, водорегулирующего и рекреационного назначения;
- создание рекультивационного слоя на поверхности откосов и берм отвалов из материала, благоприятного для выращивания леса;

- планировка участков, не допускающая развитие эрозионных процессов и обеспечивающая безопасное применение почвообрабатывающих, лесопосадочных машин и машин по уходу за посадками;
- создание в неблагоприятных почвенно-грунтовых условиях лесонасаждений, выполняющих мелиоративные функции;
- подбор древесных и кустарниковых растений в зависимости от классификации горных пород, характера гидрогеологического режима и других экологических факторов;
- организация противопожарных мероприятий.

Чаще всего предприятия угледобывающей отрасли проводят рекультивацию нарушенных земель в преимущественно санитарно-гигиеническом направлении, так как оно предъявляет наименьшие требования к качеству рекультивируемых земель и выполняется с минимальными затратами. При этом качество рекультивированных земель не всегда находится на должном уровне, что создает трудности при их дальнейшем использовании.

Требования к рекультивации земель при санитарно-гигиеническом направлении:

- выбор средств консервации нарушенных земель в зависимости от состояния, состава и свойств слагаемых пород, природно-климатических условий, технико-экономических показателей;
- согласование всех мероприятий по технической и биологической рекультивации при консервации нарушенных земель с органами санитарно-эпидемиологической службы;
- применение вяжущих материалов для закрепления поверхности нарушенных земель, не оказывающих отрицательного воздействия на окружающую среду и обладающих достаточной водопрочностью и устойчивостью к температурным колебаниям;
- нанесение экранирующего слоя почвы из потенциально плодородных пород на поверхность промышленных отвалов, сложенных непригодным для биологической рекультивации субстратом;
- выполнение мелиоративных работ;
- консервацию шламоотстойников, хвостохранилищ, золоотвалов и других промышленных отвалов, содержащих токсичные вещества, с соблюдением санитарно-гигиенических норм;
- закрепление промышленных отвалов техническими, биологическими или химическими способами.

В соответствии с требованиями природоохранного законодательства рекультивация проводится по проектной документации.

Состав проекта рекультивации нарушенных земель:

1. Описание мероприятий, направленных на восстановление земель.
2. Расчет материальных затрат на данный процесс, а также его календарный график.
3. Графические материалы в виде карт и чертежей.
4. Сметная документация.
5. Мероприятия по рекультивации земель, входящие в проект, вклю-

чают инженерные, горнотехнические, лесохозяйственные, сельскохозяйственные и прочие мероприятия, способствующие восстановлению биологической продуктивности и сельскохозяйственной ценности нарушенных, в ходе промышленной деятельности, земель.

Разработка проектов рекультивации, согласно ГОСТ 17.5.3.04-83 «Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель» [6], производится с учетом:

- природных условий района (климатических, геологических, гидрогеологических, вегетационных);
- фактического состояния нарушенных земель к моменту рекультивации (площади, формы техногенного рельефа, степени естественного зарастания, современного и перспективного использования нарушенных земель, наличия потенциально-плодородных слоев почв, эрозийных процессов, уровня загрязнения почвы);
- показателей химического и гранулометрического состава, агрохимических и агрофизических свойств, инженерно-геологической характеристики грунтов.
- хозяйственных, социально-экономических и санитарно-гигиенических условий района размещения нарушенных земель.

В Кузбассе имеется ряд проблем, несоответствий требованиям документам, регламентирующих вопросы восстановления нарушенных земель, выявляемые при анализе проектов рекультивации земель. К основным из них относятся:

1. Проект рекультивации нарушенных или нарушаемых земель отсутствует.
2. Проектами не предусматривается предварительное селективное снятие плодородного слоя почвы до начала работ, связанных с нарушением почвенного покрова, их сохранение и последующее использование.
3. До начала работ, связанных с нарушением земель не проводятся почвенные исследования, изыскания, обосновывающие отсутствие необходимости, невозможность или нецелесообразность снятия плодородного или потенциально плодородного слоя почвы.
4. Проекты изготавливаются без учёта особенностей нарушаемых земель, вида угодий, особенностей территории и выданных технических условий рекультивации.
5. Проекты не содержат мероприятий по созданию экранизирующего слоя или при отсутствии оценки пригодности пород рекультивируемых поверхностей, а также наносимых грунтов для биологической рекультивации, их безопасности для человека и окружающей среды.
6. Техническими условиями и проектной документацией предусматривается в качестве приоритетного такое направление рекультивации как санитарно-гигиеническое. Также встречается лесохозяйственное направление на землях, до нарушения являвшихся сельскохозяйственными угодьями. Предлагаемые при этом проектные решения (создание рекультивационного слоя малой мощности без внесения мелиорантов и органических удобрений при

отсутствии экранирующего слоя, заустаривание сельхозземель, формирование монокультурных лесных посадок без задернения поверхности) существенно затрудняют, либо делают нецелесообразным и/или небезопасным возможное хозяйственное освоение территории в дальнейшем. Выбытие земель из сельскохозяйственного оборота противоречит Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утверждённой Указом Президента РФ от 02.07.2021 N 400 [8], согласно которой обеспечение продовольственной безопасности осуществляется, в том числе, за счёт повышения плодородия почв, предотвращения истощения и сокращения площадей сельскохозяйственных земель и пахотных угодий.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при восстановлении земель, вышедших из недропользования, важна функциональная роль в рациональном использовании природных ресурсов. Для увеличения эффективности рекультивации, следует выявлять отличительные черты земель, изъятых из недропользования, а также проанализировать экосистемы, распределив экосистемы по назначению, путем классификации и этапов рекультивации земель, изъятых из недропользования.

Библиографический список

1. Кемеровостат [Электронный ресурс]. – URL: <http://kemerovostat.gks.ru/>
2. Хорошилова Л.С. Кузбасс - регион техносферы с высоким уровнем негативного воздействия на человека: учебное пособие / Л.С. Хорошилова, Л.М. Табакаева, Л.Е. Пистунова. - Кемерово: Кузбассвуиздат, 2008. – 108 С.
3. Закон Кемеровской области «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Кемеровской области до 2035 года» от 26 декабря 2018 года № 122-оз.
4. Горная энциклопедия. в 5 т. 4т / ред. Е.А. Козловский - Москва.: Советская энциклопедия. 1984—1991.
5. ГОСТ 17.5.1.02-85 Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации. - взамен гост 17.5.1.02-78; утв. постановлением Госстандарта СССР ОТ 16.07.1985 N 2228; введ. 1986-01-01. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
6. ГОСТ 17.5.3.04-83 Охрана природы. Земли. Общие требования К рекультивации земель.
7. ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН ОТ 04.12.2006 Г. № 200-ФЗ Лесной Кодекс Российской Федерации. — 2006.
8. Указ Президента РФ ОТ 02.07.2021 N 400 "О стратегии национальной безопасности Российской Федерации".

КЕДР КАК ОБЪЕКТ РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ КУЗБАССА

Водолеев А.С., Захарова М.А., Толстикова А.Ф., Баженова Н.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, botanik-egf@yandex.ru*

Аннотация. Проведен анализ технологий проведения лесной рекультивации на угольных отвалах Кузбасса. Особое внимание уделено методическим основам выращивания кедра. Специфичные горно-геологические, агрохимические, водно-физические свойства рекультивируемых угольных субстратов накладывают свой отпечаток на агротехнику выращивания этого хвойного дерева. Использование саженцев с закрытой корневой системой, выращенных в питомнике, календарные сроки их высадки, требования к погодным условиям, послепосадочный полив – это далеко неполный перечень необходимых условий для успешного выращивания кедра.

Ключевые слова: технология проведения лесной рекультивации, угольные отвалы Кузбасса, агротехника выращивания, закрытая корневая система саженцев кедра, совместная посадка других культур.

CEDAR AS AN OBJECT OF RECLAMATION POSSIBILITIES IN THE CONDITIONS OF KUZBASS

Vodoleev A.S., Zakharova M.A., Tolstikova A.F., Bazhenova N.N.

*Siberian state industrial university
Novokuznetsk, Russia, botanik-egf@yandex.ru*

Abstract. The analysis of technologies for carrying out forest reclamation on the coal dumps of Kuzbass was carried out. Particular attention is paid to the methodological foundations of growing cedar. Specific mining-geological, agrochemical, water-physical properties of reclaimed coal substrates leave their mark on the agrotechnics of growing this coniferous tree. The use of seedlings with a closed root system grown in a nursery, the calendar dates for their planting, the requirements for weather conditions, post-planting watering - this is far from an exhaustive list of the necessary conditions for the successful cultivation of cedar.

Keywords: forest reclamation technology, coal dumps in Kuzbass, cultivation techniques, closed root system of cedar seedlings, joint planting of other crops.

Кузбасс – уникальный регион с точки зрения масштабов техногенного воздействия на природу. Плотность угольных, металлургических и химических производств, а так же предприятий энергетики не имеет мировых аналогов.

Развитие угольной отрасли в Кузбассе на протяжении последних десятилетий привело к серьезным изменениям природных ландшафтов, деградации растительного покрова на огромных пространствах. В регионе площа-

дью всего 95,7 тыс. км² в 2021 году было добыто 243,1 млн т угля, что составляет 48,8 % от общероссийского объема добычи. Производство угля постоянно растет, главным образом за счет открытой добычи, доля которой стремительно увеличивается с 64 % в 2007 году до 75–80 % к 2020 году.

В результате горных работ происходит нарушение геоморфологического строения поверхности земли, уничтожение почвенного и растительного покрова, загрязнение водной среды и атмосферы, снижение биологического разнообразия. Со временем происходят кардинальные изменения биологических и почвенно-геохимических процессов, вызванных выносом на поверхность глубинных горных пород прошлых геологических эпох, не свойственных естественным ландшафтам. По экспертным оценкам [1], площадь нарушенных земель в Кузбассе составляет 120–150 тыс. га.

Лесная рекультивация – ведущее направление восстановления нарушенных угольной промышленностью земель в Кузбассе. Посадка на посттехногенных землях древесной растительности в регионе уже проводится на протяжении 50 лет. За прошедший период методами лесной рекультивации возвращено в хозяйственный оборот более 15 тыс. га, что составляет около 60 % площади всех рекультивированных земель в Кузбассе. Но как показывают исследования [2] кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) в насаждениях занимает незначительную долю, как правило, в виде дополнений в сосновых посадках или на мелкоконтурных участках. Это обстоятельство служит весомым аргументом для увеличения кедровых насаждений на рекультивируемых техногенно нарушенных территориях.

Широкое использование методов лесной рекультивации продиктовано, с одной стороны, необходимостью оптимизации крайне напряженной экологической обстановки в районах угледобычи, с другой стороны – относительной малой затратностью и доступностью проведения работ по облесению территорий. Восстановление на посттехногенных землях древесных насаждений позволило создать вокруг городов «зеленые зоны», частично снизить негативное влияние техногенных объектов на окружающие природные ландшафты.

Методические основы лесной рекультивации стали разрабатываться с начала 1970 гг. По многолетним результатам этих опытно-производственных работ в 1989 году были изданы «Рекомендации по созданию лесных насаждений на отвалах угольных разрезов Кузбасса» [3], в 2005 году – «Рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель в Кузбассе» [4] и в 2017 году – «Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе» [1].

Хотя по происхождению кедр сибирский относится к горным лесообразующим породам, в настоящее время он занимает как горные, так и обширные равнинные территории. Сам ареал кедра сибирского в центре таежной зоны северной части Евразии, в основном в Сибири, свидетельствует о нем как о морозоустойчивой континентальной относительно влаголюбивой лесной породе.

Кедр сибирский, как и кедр европейский, считаются породами теневы-

носливыми и в общей шкале их ставят за пихтой сибирской и елью. Теневыносливость проявляется в способности молодых поколений деревьев длительное время довольствоваться незначительной освещенностью под пологом верхних ярусов и образовывать сомкнутые древостой в смеси с пихтой и елью.

Вместе с тем теневыносливость кедра ни в коей мере не является показателем его потребности в затенении. Опыт выращивания посадочного материала в питомниках и сравнение роста в лесных культурах под пологом леса и на открытых площадях свидетельствует о лучшем росте кедра при полной освещенности (по В. Н. Габееву [5]). По отношению к влаге кедр считается требовательной породой, в особенности к влажности воздуха.

Первые попытки создания культур кедра посевом семян в неподготовленную почву в Западной Сибири проводились в 1947 – 1949 гг. Опыт оказался неудачным и культуры погибли. Позднее технология создания культур заключалась в нарезке борозд плугом ПКЛ-70 или ПЛП-135, ручном или механизированном посеве орехов, посадке сеянцев (дичков) по дну борозды. Для закультивирования выбирались наиболее чистые, незахламленные участки. Кедровые вырубки, из-за наличия большого количества порубочных остатков, из лесокультурного фонда обычно исключались. Густота посадок на сравнительно свободных площадях достигала 6 тыс. шт./га.

Заращение культур березой и осиною является основной причиной неудач искусственного восстановления кедра. На свежих и влажных вырубках в первый год после рубки активно поселяются лиственные породы и через 5 – 6 лет посадки оказываются под пологом березы или осины. Даже на тех площадях, где до создания культур процесс облесения из-за сильного задержания почвы протекал медленно, после подготовки почвы площадками и бороздами интенсивно возобновляются лиственные насаждения. Рубки ухода по осветлению кедра интенсивностью 40 – 50 % не дают желаемых результатов. Оставленные на корню береза и осина усиливают рост и восстанавливают первоначальную сомкнутость, поэтому без активных и неоднократных лесоводственных уходов восстановление кедра на таких площадях в лучшем случае возможно только через смену пород.

Агротехника создания лесных насаждений на рекультивируемых землях имеет ряд существенных отличий от классических лесоводственных методов по количеству высаживаемого посадочного материала, схемам посадки и подбору сопутствующих пород. Отличия обусловлены специфическими горно-геологическими, агрохимическими, водно-физическими свойствами рекультивируемых субстратов и эксплуатационными особенностями самих отвалов. Посадку саженцев деревьев и кустарников целесообразно проводить через 1-2 года после завершения технического этапа. За это время происходит усадка и стабилизация поверхности отвала, физическая дезинтеграция горной массы в приповерхностном слое и накопление мелкоземных фракций, которые обеспечивают водоудерживающую способность субстратов. Щебнистые и каменистые грунты, состоящие из песчаников, алевролитов и аргиллитов, не уплотняются, а под воздействием света, влаги и перепада температур формируют рыхлую структуру.

Посадку хвойных пород лучше проводить в начале осени (сентябрь), при наступлении прохладной погоды со среднесуточной температурой 10 – 15 °С, но до наступления продолжительных заморозков, а также весной в конце апреля – первой половине мая, до начала массового трогания в рост верхушечных почек саженцев. Наибольшую выживаемость саженцев кедра обеспечивается их выращиванием в плодородном грунте с закрытой корневой системой (ЗКС). Также дает положительный эффект обмакивание корней сеянца в глиняную болтушку в момент выкопки саженца непосредственно в лесном питомнике. Для увеличения приживаемости культур, роста высаженных растений рекомендуется болтушку готовить с добавлением жидких гуминовых удобрений с набором микроэлементов (Био-Мастер, Техура-М, Техура-био и др.) [1].

Для создания плантационно-обсеменительных культур используются саженцы с закрытой корневой системой, выращенные на питомнике. Посадку следует проводить с конца августа, после прекращения роста и одревеснения побегов текущего года, до середины сентября, чтобы корневая система саженцев успела адаптироваться к новым условиям произрастания. Посадку желательно приурочить к наступлению прохладной погоды с осадками, так как в случае теплой солнечной погоды для лучшей приживаемости требуется послепосадочный полив. Посадку саженцев проводят в заранее подготовленные лунки. Для этого лучше всего подходят бурьямы, агрегатируемые с универсально-пропашными тракторами, или переносные бензобурьямы. Размер лунок подбирается с учетом размера корневого кома, как правило, диаметр лунки больше диаметра кома на 50–70 %, глубина – на 20–30 % больше высоты кома. Одним из приемов повышения средообразующих функций будущих лесных экосистем является создание многокомпонентных по составу древесных пород типов лесных культур, которые более устойчивы и продуктивны, быстрее растут и формируют лесную среду. Учитывая биологические особенности используемых при рекультивации видов, целесообразно кулисное смешение лесообразующих древесных видов и мелиоративных кустарников. Высокий мелиоративный эффект по отношению к главной породе показывают кустарники с симбиотрофным, азотофиксирующим типом почвенного питания.

В горно-таежной подзоне целесообразно проводить совместную посадку сосны обыкновенной и кедра сибирского. Кедр растет в два раза медленнее сосны и обладает высокой теневыносливостью. Целесообразно чередование рядов кедра и сосны через один. Норма высадки на 1 га участка рекультивации составляет: сосны – 1 тыс. шт., кедра – 0,5–0,75 тыс. шт., по схеме 1,5–2 × 3 м. Благодаря быстрому росту сосны при такой посадке в первые 20 лет формируется лесной полог, под который поселяются зональные лесные травянистые виды, и создается необходимое для кедра легкое отенение. К 40 годам на рекультивированном участке сформируется молодой плодоносящий кедровник.

Особенности лесной рекультивации в угледобывающих районах Кузбасса. Район г. Междуреченска. Здесь наиболее масштабные по площа-

ди и объему вскрышных горных пород нарушения. В то же время из-за незначительной площади отработанных участков угольных месторождений рекультивация проводится на небольших площадях. Это создает нетипичную для естественного ландшафта «послепромышленную пустыню» с неблагоприятными условиями и проявлениями природно-климатических аномалий для этого района – загрязнение атмосферы, иссушение приземных слоев воздуха и повышенная летняя температура. Отрицательное воздействие распространяется как на жилые кварталы города, так и на обширную прилегающую территорию. Характерной особенностью горно-геологических условий района является преобладание во вскрышной толще горных пород песчаников, которые трудно поддаются выветриванию, в результате чего высокая каменистость на объектах рекультивации сохраняется длительное время.

С учетом природно-климатических условий района, в качестве лесобразующих пород, кроме сосны и лиственницы, возможно введение в состав кедра (сосны сибирской), ели и пихты.

Район г. Новокузнецка. Район расположен в лесостепной зоне Кузнецкой котловины с благоприятными природно-климатическими условиями. Поскольку город является крупнейшим индустриальным центром с высоким уровнем атмосферного загрязнения, на первый план ставится задача улучшения санитарно-гигиенических условий труда и жизни, необходимость создания лесных зеленых зон, в целом – улучшение экологических условий. В пределах городских земель и на прилегающих территориях преобладают нарушенные земли при подземной добыче угля. Старые шахты в большинстве своем закрыты. Значительная часть подработанных территорий занята лесными культурами сосны, но остаются большие площади нарушенных земель, где необходима лесная рекультивация. Кроме нарушенных угледобычей земель, район характеризуется наличием больших площадей отвалов из отходов металлургического производства. Это хвостохранилище Абагурской обогатительной фабрики и шламохранилище АО «Евраз ЗСМК». Рекультивация этих объектов сложнее, чем нарушенных земель угледобывающих предприятий, но вполне возможна, при использовании положений настоящих рекомендаций и опыта лесной рекультивации отвалов угольных разрезов. Примером может служить закрепление поверхности хвостохранилища агломерации железной руды древесной растительностью. В условиях атмосферного загрязнения повышенную устойчивость и средообразующие качества имеют высокополнотные лесонасаждения. Вместе с тем такие насаждения в черте города и в непосредственной близости к нему представляют собой объекты чрезвычайно высокой пожарной опасности. В целях снижения горимости создаваемых насаждений и поддержания высокой полноты древостоев следует создавать смешанные с лиственными породами лесонасаждения, а также проводить профилактические рубки ухода – обрезку нижних мутовок веток (до 1,5–2,0 м), уборку сухостоя и отставших в росте деревьев.

Таким образом, искусственное восстановление кедра путем создания лесных культур на техногенно нарушенных территориях, в частности, на отвалах открытых угольных разработок, требует определенных технологиче-

ских решений. Прежде всего, это связано с выращиванием в питомнике саженцев с закрытой корневой системой для предотвращения шокового состояния при их высадке в техногенный субстрат, добавление в ЗКС грибной микрофлоры, обеспечивающей создание простой и вильчатой микоризы, что сможет обеспечить наибольшую выживаемость подроста кедра при проведении биологической рекультивации.

Библиографический список

1. Уфимцев В.И. Методические рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель на предприятиях угольной промышленности в Кузбассе / В.И. Уфимцев, Ю.А. Манаков, А.Н. Куприянов – Кемерово: Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Федерал. иссл. центр угля и углехимии СО РАН ; [под общ. ред. Ю.А. Манакова], КРЭОО «Ирбис», 2017. – 44 с.
2. Уфимцев В.И. Современное состояние лесонасаждений и проблемы лесной рекультивации на отвалах угледобычи Кузбасса/Известия Иркутского гос.университета. Сер. «Биология. Экология», 2013. Т.6. №3. – С. 63–69.
3. Баранник Л. П. Рекомендации по созданию лесных насаждений на отвалах угольных разрезов Кузбасса. Воронеж: ЦНИИЛГиС, 1989. – 15 с.
4. Рекомендации по лесной рекультивации нарушенных земель в Кузбассе / Сост.: Л. П. Баранник, А. М. Шмонов, В. П. Николайченко. Кемерово: КООО «Союз экологов Кузбасса», 2005. – 26 с.
5. Габеев, В. Н. Опыт разведения кедра в лесостепной зоне Западной Сибири Текст. / В. Н. Габеев // Пути' улучшения лесоустройства и лесопользования в Западной Сибири. Новосибирск, 1965. – С. 17-21.

УДК 631.5:669.504.064.47

АГРОТЕХНИКА ВЫРАЩИВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Водолеев А.С., Захарова М.А., Постельников В.Н.,
Ким В.И., Бондарев М.Р.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, botanik-egf@yandex.ru*

Аннотация. Проведен полевой опыт по агротехнике возделывания картофеля с использованием отходов металлургического производства. Под влиянием внесенных мелиорантов улучшаются питательные свойства и структура урожая на опытных участках. Дана агроэкологическая оценка биологического урожая и пищевых качеств картофеля.

Ключевые слова: отходы металлургического производства, полевой опыт, агротехника возделывания картофеля, структура урожая, биометрические показатели клубней картофеля, содержание крахмала и витамина С.

AGROTECHNICS OF POTATO CULTIVATION USING

METALLURGICAL WASTE

Vodoleev A.S., Zakharova M.A., Postelnikov V.N., Kim V.I., Bondarev M.R.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, e-mail:botanik-egf@yandex.ru*

Abstract. *A field experiment was carried out on the agrotechnics of potato cultivation using waste from metallurgical production. Under the influence of ameliorants introduced, the nutritional properties and structure of the crop in the experimental plots are improved. An agroecological assessment of the biological yield and nutritional qualities of potatoes is given.*

Keywords: *wastes of metallurgical production, field experience, agricultural technology of potato cultivation, crop structure, biometric indicators of potato tubers, starch and vitamin C content.*

Введение

Одним из приемов повышения плодородия почв является известкование, которое устраняет избыточную кислотность и на 30-40% повышает эффективность минеральных удобрений, а в конечном итоге – урожайность сельскохозяйственных культур, что для Кузбасского региона имеет первостепенное значение. За весь длительный период своего действия (7-8 лет) каждая тонна извести окупается за счёт увеличения объёмов сельскохозяйственной продукции.

Методы химической мелиорации кислых и солонцовых почв основаны на изменении состава поглощенных катионов, главным образом путём введения кальция в почвенный поглощающий комплекс. Для нейтрализации кислотности и повышения плодородия кислых почв основным мероприятием является известкование, а для устройства повышенной щелочности и улучшения свойств солончаков – гипсование.

Мелиорация при помощи известьсодержащих удобрений является довольно дорогостоящим мероприятием, что значительно повышает себестоимость сельскохозяйственной продукции. Увеличить объёмы известкования, причём значительно снизить затраты на это мероприятие можно за счет использования более дешевых известковых материалов. К таким относятся отходы металлургического производства, которые соответствуют по всем своим свойствам требованиям агротехники возделывания продовольственных культур. Такие возможности в нашем регионе есть, в частности, в Новокузнецком районе. Они используются не в полном объеме из-за незнания свойств известьсодержащих отходов и их благотворного воздействия на плодородие почв. Поэтому не случайно целью данной работы является практическое изучение эколого-агротехнической целесообразности использования отходов металлургического производства при агротехнике возделывания картофеля.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– изучить воздействие отходов металлургического производства на изменение уровня кислотности почв и выявить их мелиорационные возможности изменения уровня pH;

– определить оптимальные нормы внесения мелиорантов для получения стабильных урожаев картофеля;

– произвести биометрическую, физиологическую и экологическую оценку урожая картофеля, выращенного с использованием нетрадиционных мелиорантов.

Объект исследования: известьсодержащие отходы металлургического производства, применяемые в качестве мелиорантов.

Предмет исследования: объём и структура биологического урожая картофеля, выращенного с использованием нетрадиционных мелиорантов.

Полевой опыт по выращиванию картофеля построен на рандомизированной основе.

Характеристика используемых металлургических отходов

В опыте использовался шлак, полученный при выплавке чугуна и стали на АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Источником шлака является Тензинское месторождение доломитов в 5 км к востоку от пос. Шерегеш (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав доломита (содержание компонентов в процентах)

MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	S
21,05	30,4	0,04 – 0,14	0,13	0,55	0,03	0,015

Поскольку шлак имеет высокую плотность, и большая часть кальция в нём содержится в виде плохо растворимых кремнекислых соединений, был произведён размол на специальной установке Сибирского государственного индустриального университета.

Кроме того, на опытном участке вносилась пушонка (гашёная известь) известная своим благотворным воздействием на кислые почвы.

Методы проводимых исследований

Определение кислотности (pH) почвы проводили по шкале Алямовского [1]. Полевой опыт согласно Б. А. Доспехову определяется тремя величинами: 1) числом вариантов, 2) заданной точностью, 3) земельным участком, на котором планируется заложить опыт [2]. Методика определения структуры урожая картофеля основана на взвешивании продукции с каждой делянки с выбором мелких (менее 50 г), средних (50-100 г), крупных клубней (более 100 г) [2]. Определение количества крахмала в клубнях картофеля основана на методике определения плотности солевого раствора, в который погружают клубни [3]. В раствор погружают один из клубней. Если клубень всплывет, прибавляют воды, помешивая деревянной палочкой до тех пор, пока клубень не переместится в середину жидкости. Если же при погружении клубень тонет, то добавляют соль до тех пор, пока клубень не поднимется до середины жидкости. Затем этот раствор выливают в мерный цилиндр, опускают туда ареометр (с делением выше и меньше 1.200) и измеряют

плотность раствора. Эта плотность равняется плотности клубня. По таблице находят процентное содержание крахмала в каждом клубне. По этим данным устанавливают среднее процентное содержание крахмала, которое вычисляют по формуле:

$$K = \frac{B_1 \cdot K_1 + B_2 \cdot K_2 + B_3 \cdot K_3}{B},$$

где В – общий вес трех клубней картофеля, в г;

В₁, В₂, В₃ - вес каждого клубня в отдельности;

К₁, К₂, К₃ - соответствующее каждому клубню среднее содержание крахмала, в %.

Методика определения количества витамина С, содержащегося в клубнях картофеля проводится титрометрически [4]. 1 г картофеля растереть в ступке, добавить 2 мл 2 % НСl. Продолжать растирать 1 минуту. Затем содержимое ступки, отцеживая, перелить в стакан № 1. В ступку налить два раза по 10 мл 2% НСl, растереть и каждый раз выливать содержимое ступки в стакан № 1. Довести объём до 50 мл, настоять в течение 5 минут. Затем профильтровать в стакан № 2. 10 мл фильтрата перелить в стакан № 3 и добавить 10 капель 1% крахмала, перемешать. После добавить по капле I в КI до появления слабого синего цвета, который исчезнет через несколько минут (1 капля = 0,08 мл). Для точности расчётов провести анализ образца три раза. Затем сделать расчёт содержания витамина С по формуле:

$$A = \frac{0,088 \cdot B \cdot M \cdot 100}{m \cdot n},$$

где А – содержание витамина С, в мг/100 г сырой массы;

В – количество I израсходованного на титрование;

М – количество приготовленного раствора;

п – навеска растительных тканей в граммах;

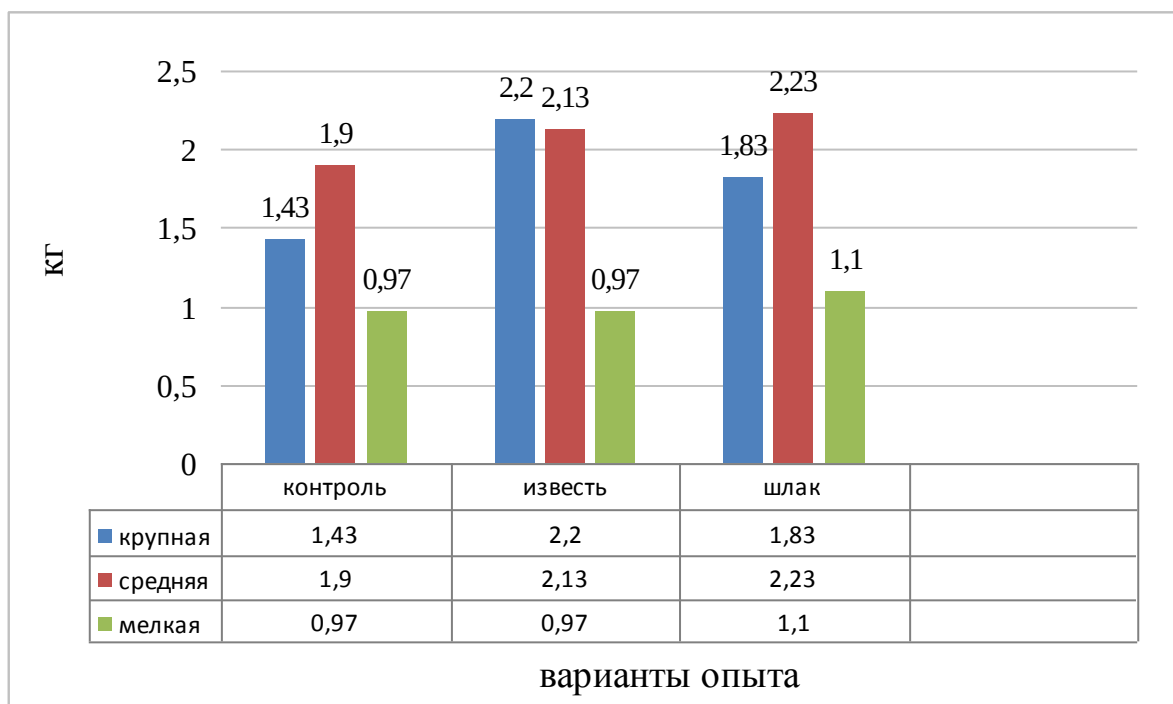
т – количество раствора, взятого на титрование (10 мл).

Постановка полевого опыта и анализ его результатов

В первый год опытный участок площадью 450 м² разделили на 3 полосы, каждая площадью 150 м², одну полосу оставили для контроля, во вторую внесли известь (25 кг), а над третьей распылили измельчённый доменный шлак (6 кг). Сделали три повторности. Дозы внесённых известьсодержащих удобрений разработал учёный-агроном Степнов А. А.

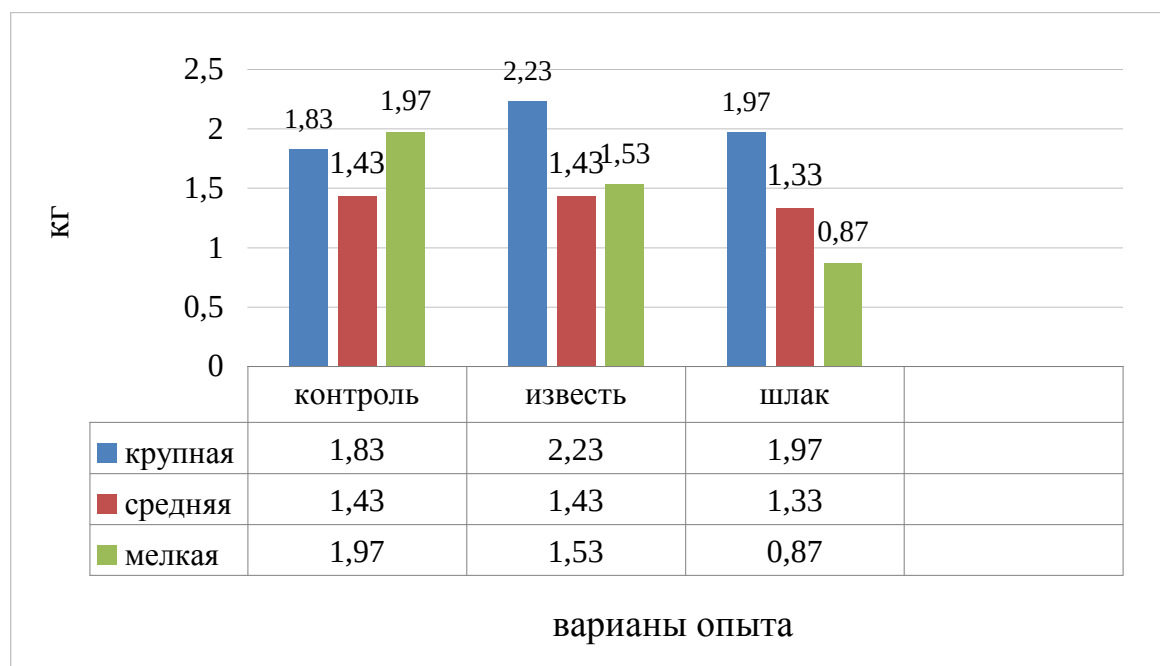
На следующий год поле стояло под паром. Ещё через год на нём посадили картофель.

Анализ результатов опыта производился на основе статистической обработки данных [2], полученных при взвешивании клубней картофеля. Выборки были сделаны в центре делянок (каждой) и по правилу конверта (в пяти точках каждой делянки). Была произведена калибровка клубней и пофракционное взвешивание в килограммах (рисунки 1 и 2).



* данные получены при выборке из центра поля

Рисунок 1 – Структура урожая картофеля



* данные получены при выборке по правилу конверта

Рисунок 2 – Структура урожая картофеля

На основе этих данных нами была выявлена структура урожая, а также определена средняя урожайность картофеля на опытном участке (рисунок 3).

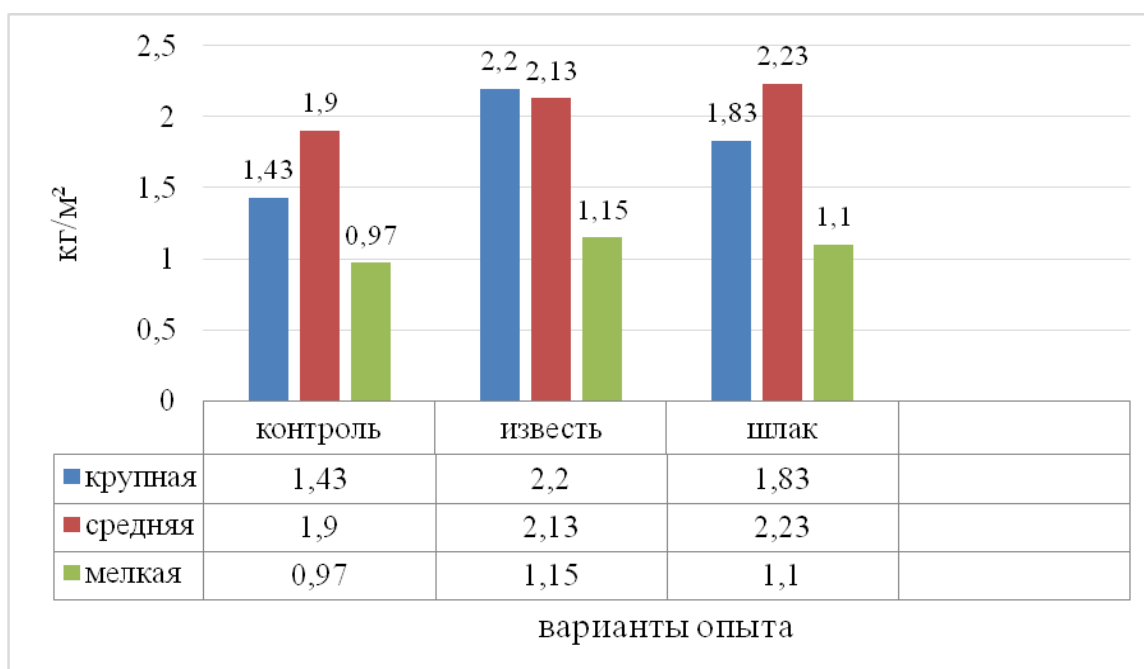


Рисунок 3 – Структура урожая картофеля

Поскольку выборка была сделана из лунок, общая площадь которых составила 1 м², данные по урожайности переведены в стандартные для сельского хозяйства единицы измерения, ц/га (рисунок 4).

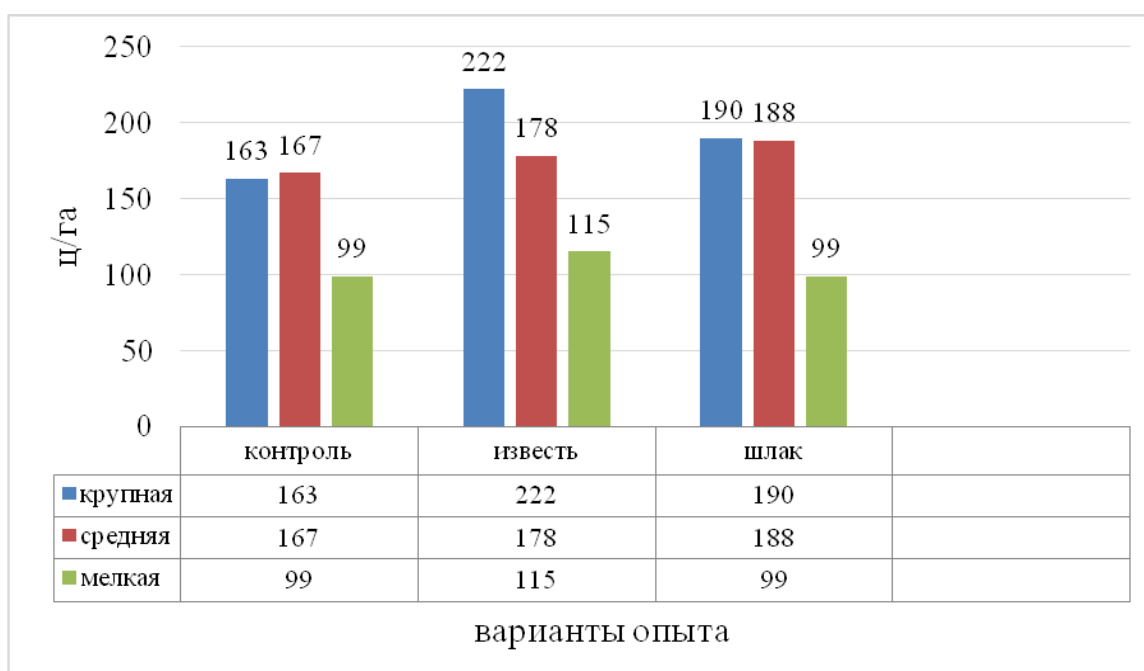


Рисунок 4 – Структура урожая картофеля

Также была определена предполагаемая общая урожайность картофеля на опытном участке, которая составила 429 ц/га с контрольной делянки, 515 ц/га с делянки обработанной известью и 477 ц/га с делянки, обработанной доменным шлаком соответственно (рисунок 5).



Рисунок 5 – Структура урожая картофеля

Опыт показал, что урожайность картофеля на произвесткованных почвах выше (особенно это касается деланки, обработанной известью – 515 ц/га), причём в структуре урожая преобладают клубни крупного и среднего размера.

Поскольку для нас было важно определить и пищевую ценность продукции, в лабораторных условиях клубней с опытного участка были исследованы на содержание витамина С и крахмала (рисунок 6).

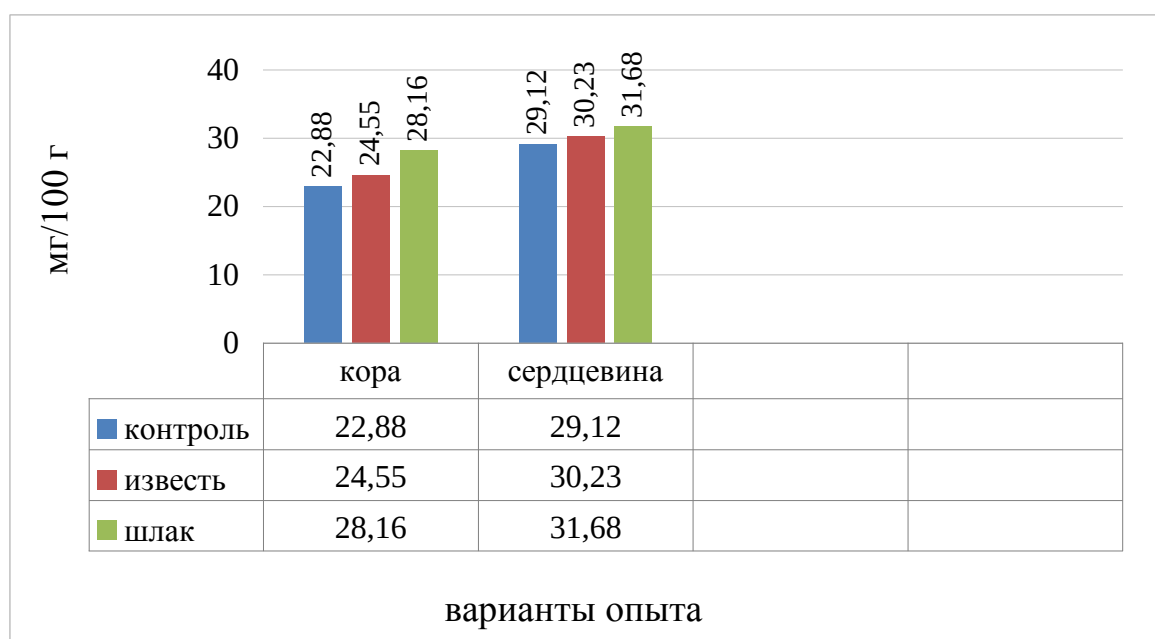


Рисунок 6 – Структура урожая картофеля

В результате исследования было установлено, что кора клубней картофеля, выращенного на произвесткованных почвах, содержит больше витамина С. В опыте с известью на 7 % и 23 % в опыте с доменным шлаком.

Сердцевина также содержит больше витамина С по сравнению с контрольными клубнями. В опыте с известью на 4 % и на 9 % в опыте с доменным шлаком (рисунок 7).

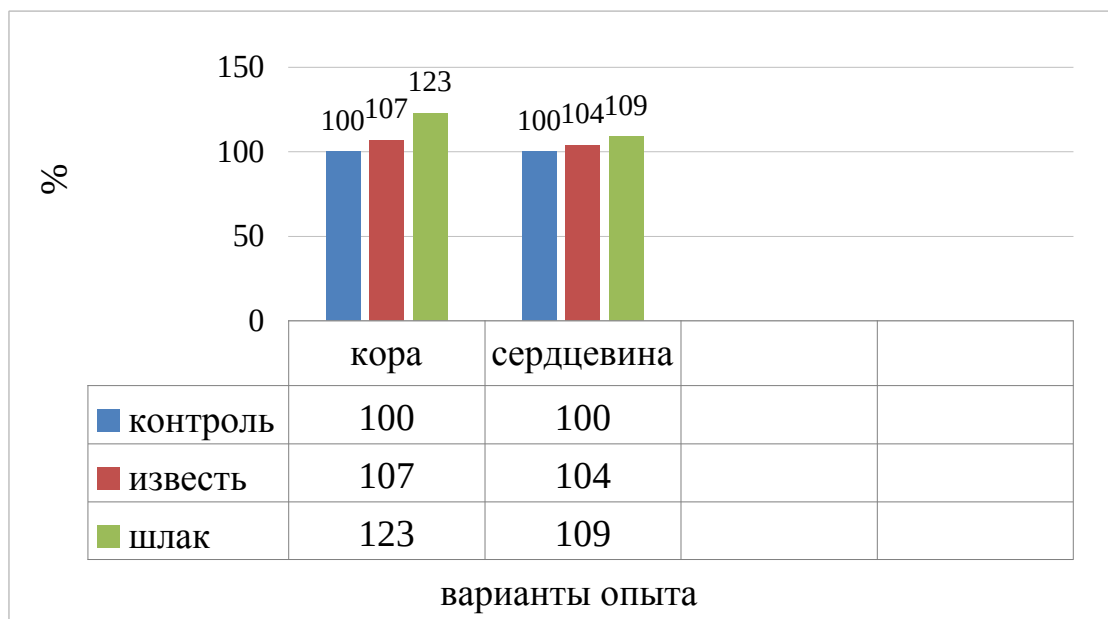


Рисунок 7 – Структура урожая картофеля

Содержание крахмала в картофеле, выращенном на произвесткованных почвах также выше, чем у клубнях с контрольного участка, а это значительно повышает его пищевую и кормовую ценность (рисунок 8).

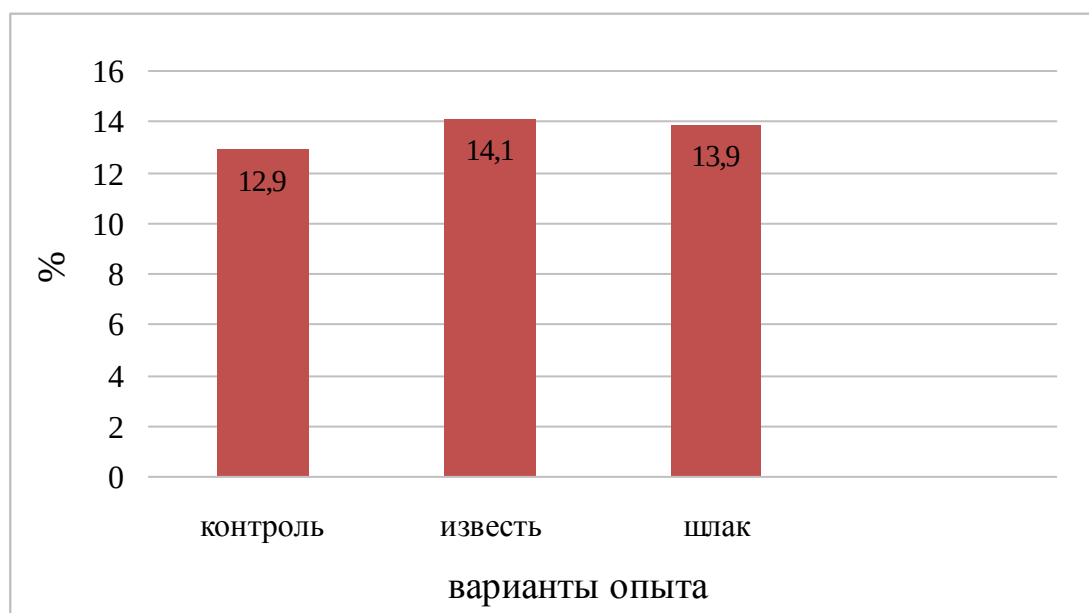


Рисунок 8 – Структура урожая картофеля

Заключение

Для сельскохозяйственной деятельности проблема кислотности почв является весьма насущной. Наличие в поглощенном состоянии в кислых почвах большого количества ионов водорода и алюминия, а в солонцах ка-

тионов натрия резко ухудшает физические, физико-химические и биологические свойства этих почв, их плодородие. Известкование – самое действенное мелиорационное мероприятие. При устранении избыточной кислотности повышается эффективность вносимых удобрений, как минеральных, так и органических, а также снижается доступность тяжёлых металлов при наличии их в почве. Используемые мелиоранты являются источниками минерального питания выращиваемой сельскохозяйственной культуры, так как в их составе (доломит) обнаружены Ca, Mg, Fe, P, S. В ходе исследования было изучено воздействие различных отходов на изменение уровня кислотности почв, и выявлены их мелиорационные возможности, определены оптимальные нормы внесения мелиорантов для получения стабильных урожаев картофеля, произведена биометрическая, физиологическая и экологическая оценка урожая картофеля, выращенного с использованием нетрадиционных мелиорантов. Доказано эколого-агротехническая целесообразность использования отходов металлургического производства, предприятий Новокузнецка (Кузбасса) при выращивании сельскохозяйственных культур. О чём свидетельствует повышение качественных и количественных показателей урожайности клубней картофеля.

Библиографический список

1. Ягодина Б.А. Агрохимия. – Л.: Агропромиздат, 1989. – 243 с.
2. Доспехов Б.А. Основы методики полевого опыта. – М.: Просвещение, 1985. – 350 с.
3. Евсеева И.И., Орлова А.Н., Сударкина А.А. Химия в сельском хозяйстве: учебное пособие по факультативному курсу для учащихся 10 классов. – Москва: Просвещение, 1973. – 143 с.
4. Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А. Пищевая химия. Лабораторный практикум: учебное пособие для студентов вузов. – Санкт-Петербург: ГИОРД, типография «Наука», 2006. – 302 с.

УДК 662 (470.6):04.55.054

СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ЭКОБИОМОНИТОРИНГА ПРИ КОНСЕРВАЦИИ СКЛАДИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Захарова М.А., Водолеев А.С., Лубенцева Ю.А.,
Толстикова А.Ф., Баженова Н.Н.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, botanik-egf@yandex.ru*

***Аннотация.** Даны теоретические основы организации эковиомониторинга на рекультивированных и законсервированных промышленных отходах на примере отходов железорудного обогащения Абагурской агломерационной фабрики, г.Новокузнецк. Для этого создана система, с помощью*

которой проводится оценка состояния законсервированных участков и их влияния на окружающую среду. В неё входят опытные рекультивированные территории и природный и техногенный контроль, где рекультивационные мероприятия не проводились. При проведении мониторинга осуществляют отбор проб компонентов природной среды – техногенный субстрат, почва, растительный материал, почвенные микроорганизмы. Описанная система экобиомониторинга представлена в табличной форме.

Ключевые слова: экобиомониторинг, рекультивированные и нереккультивированные отходы железорудного обогащения, химический анализ, альготестирование, качество пыльцы, растительный видовой состав, ферментативная и дыхательная активность почвы.

ORGANIZATION SYSTEM OF ECOBIOMONITORING DURING CONSERVATION OF STORED IRON-CONTAINING WASTE OF METALLURGICAL PRODUCTION

Zakharova M.A., Vodoleev A.S., Lubentseva Yu. A.,
Tolstikova A.F., Bazhenova N.N.

Siberian state industrial university
Novokuznetsk, Russia, gribkovaelizaveta1@gmail.com

Abstract. Theoretical foundations for organizing eco-biomonitoring on reclaimed and preserved industrial waste are given on the example of iron ore enrichment waste from the Abagur sinter plant, Novokuznetsk. To this end, a system has been created to assess the state of the mothballed sites and their impact on the environment. It includes experimental reclaimed territories and natural and man-caused control, where remediation activities have not been carried out. During monitoring, samples are taken of the components of the natural environment - technogenic substrate, soil, plant material, soil microorganisms. The described ecobiomonitoring system is presented in tabular form.

Keywords: ecobiomonitoring, reclaimed and non-reclaimed iron ore waste, chemical analysis, algotesting, pollen quality, plant species composition, enzymatic and respiratory activity of the soil.

Государственный экологический мониторинг (государственный мониторинг окружающей среды) – комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды (далее – экологический мониторинг) [1]. Экологический биологический мониторинг (экобиомониторинг) включает в себя оценку и прогноз изменений, образующихся в результате природного и антропогенного воздействий. Для этого проводится изучение причин и способов воздействия, ответная реакция живых организмов, выражающаяся в изменении их показателей.

Вопрос правового регулирования мониторинга рекультивированных и

законсервированных промышленных отходов на сегодняшний день остается открытым. В настоящее время на территории нашей страны действуют два нормативных документа, регулирующих мониторинг рекультивированных и законсервированных земель и мониторинг промышленных отходов. Такими документами являются:

1. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 N 1030 "Об утверждении Порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду" (Зарегистрировано в Минюсте России 25.12.2020 N 61832) [2].

2. Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 N 800 (ред. от 07.03.2019) "О проведении рекультивации и консервации земель" (вместе с "Правилами проведения рекультивации и консервации земель") [3].

Приказ Минприроды России от 08.12.2020 N 1030 содержит порядок проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду. Но в нем отсутствует информация о проведении экомониторинга применительно к законсервированным или рекультивированным отходам производства, а это значит, что этот приказ не обязывает собственников таких отходов осуществлять мониторинг.

Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 N 800 описывает процедуру проведения рекультивации и консервации земель, но не содержит информацию о необходимости проведения мониторинга по завершении проведенных мероприятий, а также не распространяется на отходы производства.

Вместе с тем, существует ряд работ [4-5], подтверждающих необходимость проведения мониторинга на рекультивированных территориях после техногенного воздействия. Все эти факторы указывают на необходимость совершенствования правового регулирования процесса рекультивации [6].

В сложившейся ситуации требуется система, с помощью которой появилась бы возможность проводить оценку состояния законсервированных участков и их влияния на окружающую среду. На сегодняшний день имеется ряд разработок, позволяющих решить поставленную задачу. Но вместе с тем, они ориентированы на нереккультивированные объекты, то есть объекты, деятельность которых прекращена, и в отношении которых не предпринято дополнительных мер по снижению их негативного воздействия на окружающую среду. В работе предложена система, предполагающая проведение мониторинга законсервированного участка (с помощью рекультивантов), законсервированного участка без рекультивантов, либо эксплуатирующегося участка отходов, а также природного участка, выступающего в качестве эталона, на который не распространяется техногенное воздействие. Полученные данные сравнивают между собой, с ПДК и на основании этого делают вывод

о состоянии законсервированного участка, его влияния на окружающую среду, делают прогноз о возможных изменениях, при необходимости предпринимают меры по устранению негативного влияния, если таковое выявлено на основании данных мониторинга. Также возможно использование указанной системы мониторинга при отсутствии законсервированного участка без рекультиванта или эксплуатирующегося участка. В такой ситуации мониторингу подвергаются два объекта – законсервированный (рекультивированный) и природный участки.

При проведении мониторинга осуществляют отбор проб компонентов природной среды – грунт, почва, растительный материал, почвенные микроорганизмы, животные. Такой подход дает возможность проследить воздействие складированных отходов на разных структурных уровнях жизни, что позволяет дать более комплексную объективную оценку состояния объекта размещения отходов.

Процедура мониторинга осуществляется в следующей последовательности. На объектах проведения мониторинга: законсервированном (с помощью рекультивантов) участке, природном участке и участке без рекультивантов выбираются опытные площадки, определяется периодичность отбора проб с выбранных точек. Указанные параметры выбирают исходя из размеров исследуемых территорий, а также принципа представительности. Отбор проб предполагается проводить в летне-осенний период.

В пробах почвы, грунта и растительном материале проводят определение загрязняющих веществ (тяжелых металлов) методом количественного химического анализа. Такая система помогает сделать вывод о миграции элементов в системе «грунт-растение», а также спрогнозировать способность этих элементов к распространению за пределы наблюдаемых территорий. Пробы отбирают с глубины 0-5 и 5-20 см, массой не более 200 г. При этом, инструмент для отбора проб не должен содержать металлов, стенку прикопки также следует зачистить инструментом из полиэтилена или пластмассы. Растительный материал отбирают с учетом видовой принадлежности в количестве 1-2 кг на сырую массу.

Отобранные пробы почвы также оцениваются на наличие токсического воздействия на биологические объекты. В предлагаемой системе предпочтительнее использовать альтотестирование, так как наряду с биотестированием проводится оценка почвенной микрофлоры, что в совокупности позволяет оценить воздействие почвенной среды на микроорганизмы. Вместе с тем не исключается проведение биотестирования и на других организмах, например, дафниях. По результатам биотестирования и определения почвенных водорослей можно сделать вывод о наличии или отсутствии в субстрате каких-либо веществ, негативно влияющих на тест-объект, что в дальнейшем позволит оценить возможность самовосстановления природной среды на законсервированных участках.

Также в точках отбора проб в полевых условиях предполагается проведение анализа по дыханию почв, который позволяет оценить интенсивность газообмена между почвенным воздухом и атмосферой, на основании

которого следует судить о процессах почвообразования с участием почвенных микроорганизмов и корней растений.

Ввиду того, что основную массу растительного вещества составляет клетчатка, при экологическом мониторинге важно контролировать активность почвенной целлюлозоразрушающей микрофлоры. С этой целью предлагается определять микрофлору аппликационным методом по разложению хлопчатобумажной ткани. По результатам исследования следует делать вывод об интенсивности преобразования клетчатки в гумусовые вещества, необходимые для формирования почвенной структуры.

Важным элементом экологического мониторинга является проведение химического анализа субстрата, результаты которого являются используются для контроля за наличием загрязнений, в том числе и тяжелых металлов.

Мониторинг состояния растительного покров осуществляется по двум показателям – содержанию тяжелых металлов в растительности и по качеству пыльцы. Уровень содержания тяжелых металлов позволяет судить о их миграции из субстрата, при этом важно учитывать видовую принадлежность растений и связанную с этим диффузию, а также прогнозировать химический состав отходов под слоем рекультивантов с целью их последующего извлечения и переработки. Методика анализа качества пыльцы заключается в определении процента ненормальных (абортивных) пыльцевых зерен, что позволяет спрогнозировать жизненный потенциал растительного материала при проведении рекультивационных работ на складированных отходах. У растений, произрастающих в нормальных условиях, пыльца имеет хорошее качество, процент нормальных пыльцевых зерен близок к 100 %. Повышенное загрязнение может снизить процент нормальных пыльцевых зерен до 50 % и ниже.

Оценка динамики видового состава травяного покрова проводится ввиду того, что фитоценоз является главной составляющей, узловой во всех отношениях подсистемой биogeоценоза, где в растительных популяциях протекают основные процессы образования и преобразования того, что является основой жизни на планете – органического вещества.

Описанную систему экомониторинга можно представить в табличной форме, что отражено в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Экомониторинг почвы (грунта)

Виды исследований	Используемые методы	Периодичность проведения	Контролируемые показатели
Дыхание почвы	Полевой опыт, абсорбционный метод Штатнова	Раз в год	Интенсивность дыхания
Целлюлозоразрушающая микрофлора	Полевой опыт, аппликационный метод (определение интенсивности разложения льняного полотна)	Раз в год	Оценка ферментативной активности почвенной микрофлоры

Продолжение таблицы 1

Виды исследований	Используемые методы	Периодичность проведения	Контролируемые показатели
Биотестирование	Морфофизиологический метод	Раз в год	Токсическая кратность разбавления, ТКР
Почвенная альгофлора	Метод «обрастания стекол» по Н.Г. Холодному) лабораторно-аналитический метод (микроскопирование с целью определения видового состава почвенных водорослей)	Раз в год	Оценка видового состава водорослей по морфологическим признакам
Химический анализ	Метод атомно-абсорбционной спектроскопии	Раз в год	Концентрация тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Sr, Ba, Fe, Al, Cd) и As

Таблица 2 – Экобиомониторинг растительности

Виды исследований	Используемые методы	Периодичность проведения	Контролируемые показатели
Химический анализ	Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой	Раз в год	Концентрация тяжелых металлов (Zn, Cu, Ni, Co, Sr, Ba, Fe, Al, Cd) и As
Качество пыльцы	Полевой опыт (сбор пыльцы) лабораторно-аналитический метод (микроскопирование с целью определения качества пыльцевых зерен)	Раз в год	Доля нормальных зерен и доля abortивных зерен
Видовое разнообразие	Полевой	Раз в год	Видовая принадлежность в рамках растительного сообщества

Предложенный способ экобиомониторинга был опробован на законсервированном с помощью рекультиванта (осадки сточных вод) участке Абагурской агломерационно-обоганительной фабрики АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Работы проводились на данной территории в течение 20 лет, что позволило выявить следующие тенденции:

- восстановление плодородного слоя почвенного покрова на участке с использованием рекультиванта;
- активное формирование растительного покрова складированных на железосодержащих отходах;
- нейтрализация негативного воздействия шламохранилища Абагурской агломерационно-обогажительной фабрики;
- создание оздоровительного эффекта пригородной и городской территории г. Новокузнецка;
- перспектива длительной экологически безопасной консервации железосодержащих отходов до проведения их глубокой переработки.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 10 января 2002 г. №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электронный.
2. Приказ Минприроды России от 08.12.2020 N 1030 "Об утверждении Порядка проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду" (Зарегистрировано в Минюсте России 25.12.2020 N 61832) – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электронный.
3. Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 N 800 (ред. от 07.03.2019) "О проведении рекультивации и консервации земель" (вместе с "Правилами проведения рекультивации и консервации земель") – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электронный.
4. Щербакова Е.П. К вопросу о рекультивации техногенных образований. Горный информационно-аналитический бюллетень. №7. - М.: МГГУ, 2003. - С. 72-77.
5. Желибо Т.В. Оценка формирования растительного покрова рекультивированных территорий золошлакоотваловых отходов Читинской ТЭЦ-1/ Т. В. Желибо, Е. А. Банщикова, И. Л. Вахнина // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 3(39). – С. 106-122.
6. Полищук, А. И. Правовые и организационные проблемы проведения рекультивационных работ / А. И. Полищук // Эпомен. – 2020. – № 43. – С. 111-120.

ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Корнилов Д.А., Водолеев А.С., Грибкова Е.О.,
Гибадуллин Р.М., Конаков С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, kornilov_dan@mail.ru*

Аннотация. В статье дан обзор доступных технологий утилизации отработанных моторных масел, проведена оценка основных источников их получения, определен причиняемый экологический вред окружающей среде. Масштабность масляных отходов определяет актуальность их экологически безопасной технологии переработки, включающей в себя изучение примесей, которые оказывают значительное влияние на способы их утилизации. Завершается статья обзором наиболее востребованных на рынке технологических предложений утилизации отработанных моторных масел.

Ключевые слова: зеленая экономика, экология, утилизация отработанных моторных масел.

RENEWABLE ENERGY SOURCES: PROBLEMS AND PROSPECTS

Kornilov D.A., Vodoleev A.S., Gribkova E.O.,
Gibadullin R.M., Konakov S.V.

*Siberian state industrial university,
Novokuznetsk, Russia, kornilov_dan@mail.ru*

Abstract. The article provides an overview of the available technologies for the disposal of used motor oils, an assessment of the main sources of their production is carried out, the environmental damage caused to the environment is determined. The scale of oil waste determines the relevance of their environmentally safe recycling technology, which includes the study of impurities that have a significant impact on the methods of their disposal. The article concludes with an overview of the most popular technological proposals for the disposal of used motor oils on the market.

Keywords: green economy, ecology, recycling of used motor oils.

В настоящее время масла находят широкое и разнообразное применение при эксплуатации современной техники. Каждый год увеличиваются объемы потребления смазочных материалов и, как следствие, объемы отработанных масел.

Отработанные нефтепродукты токсичны, имеют невысокую степень биоразлагаемости (10-30%) и являются опасными отходами, которые подлежат обязательному сбору и утилизации, а в отдельных случаях – уничтоже-

нию. Однако законодательство в России по этому вопросу до сих пор отсутствует. 26-77 % всех отработанных масел нелегально сбрасывается на почву и в водоемы; 40-48 % - собирается, но из собранных отработанных масел только 14 – 15 % идет на очистку, а остальные 26-33 % используются как топливо или сжигаются.

На современном этапе развития российской промышленности важным и актуальным является вопрос получения вторичного сырья на основе отработанных масел, которое может служить основой для получения ценных нефтепродуктов при надлежащей переработке. Наиболее эффективным способом утилизации является регенерация отработанных масел с полным восстановлением их первоначальных свойств. Не менее важной задачей является вовлечение новых материалов для решения экологических и ресурсосберегающих проблем [1]. Потенциал переработки отработанных моторных масел составляет около 80 % по массе.

Законодатели считают, что экологическую безопасность отходов необходимо обеспечить, в первую очередь, их рациональным использованием. Такой же подход превалирует в большинстве стран мира и стимулируется законодательной базой. В соответствии с законом, отработанные масла внесены в Федеральный классификационный каталог отходов и подлежат паспортизации. На практике их относят к отходам 3-й группы опасности. Одним из основных поставщиков отработанных масел является автотранспорт.

Автотранспорт как основной «поставщик» отработанных моторных масел

Автомобильный парк, являющийся одним из основных источников загрязнения окружающей среды, сосредоточен, в основном, в городах. Если в среднем в мире на 1 км² территории приходится пять автомобилей, то плотность их в крупнейших городах развитых стран в 200-300 раз выше.

Во всех странах мира продолжается концентрация населения в крупных городских агломерациях. С развитием городов и ростом городских агломераций всё большую актуальность приобретает своевременное и качественное обслуживание населения, охрана окружающей среды от негативного воздействия городского, особенно автомобильного, транспорта. В настоящее время в мире насчитывается 520 млн. легковых, 80 млн. грузовых автомобилей и примерно 1 млн. городских автобусов [2].

Автомобили сжигают огромное количество ценных нефтепродуктов, нанося одновременно ощутимый вред окружающей среде, главным образом атмосфере. Поскольку основная масса автомобилей сконцентрирована в крупных и крупнейших городах, воздух этих городов не только обедняется кислородом, но и загрязняется вредными компонентами отработавших газов. Противоречия, из которых «соткан» автомобиль, пожалуй, ни в чём не выявляются так резко, как в деле защиты природы. С одной стороны, он облегчил человеку жизнь, с другой – отравляет её в самом прямом смысле слова. Специалисты установили, что один легковой автомобиль ежегодно поглощает из атмосферы в среднем более 4 тонн кислорода, выбрасывая с отработавшими газами примерно 800 кг угарного газа, около 40 кг оксидов азота и почти 200

кг различных углеводородов. Структура выбросов от автотранспорта представлена на рисунке 1.

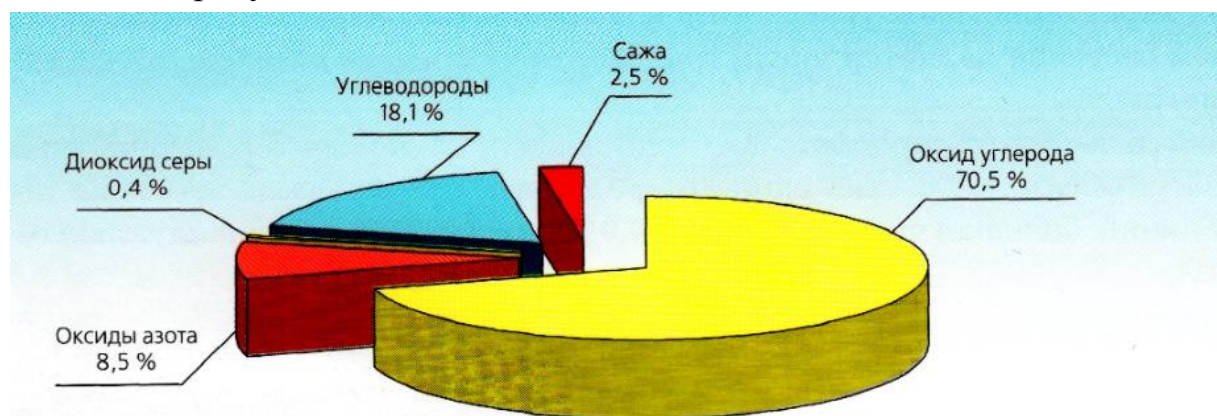


Рисунок 1 – Структура выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта

Если помножить эти цифры на 600 млн. единиц мирового парка автомобилей, можно представить себе степень угрозы, таящейся в чрезмерной автомобилизации. В таблице 1 приведены ПДК (предельно допустимые концентрации) некоторых вредных веществ. ПДК, разработанные и утвержденные законодательством нашей страны – это максимальный уровень содержания данного вещества, который человек может переносить без ущерба для здоровья (плюс 10-50 %, как «запас прочности»).

Таблица 1 – Токсичность вредных веществ (ПДК)

Загрязняющие вещества	ПДК в мг/м ³ максимальная, разовая	ПДК среднесу- точная	Класс ток- сичности
Угарный газ	3,0000	1,0000	4
Оксид азота	0,0850	0,0850	2
Свинец и его соедине- ния (кроме тетраэтил- свинца)	-	0,0007	1
Сажа (копоть)	0,1500	0,1500	3
Пыль нетоксичная	0,5000	0,1500	3
Сернистый газ	0,5000	0,1500	3

Автопарк России большой – на 01.01.2022 он насчитывал 50,6 млн. единиц, из них легковых – 42,4 млн. За последние 15 лет количество автомобилей в России выросло приблизительно в два раза и продолжает расти примерно на 1,5 - 2 млн. единиц в год. Значительная часть легковых автомобилей (до 95 %) оснащена бензиновыми двигателями, и только чуть больше 5 % – дизельными. Среди легковых автомобилей более 20 % - это внедорожники или кроссоверы. На долю дизельных автобусов приходится почти половина от их общего числа, а на долю дизельных грузовиков – две трети.

Средний возраст автомобилей высокий из-за большой доли старых ав-

томобилей: по данным Автостата, машин старше 10 лет более 54 % от общего парка, это более 27 млн. единиц. Новых машин (до 3 лет) менее 9 %, т.е. 3,75 млн. единиц. Современным экологическим стандартам Евро-4 и Евро-5 соответствует лишь каждая третья и восемнадцатая легковая машина или восьмая и двадцать восьмая грузовая. Источником самых больших объемов отработанных масел (ОМ) являются моторные. Объем и качество ОМ напрямую зависит от возраста автомобиля, в частности, масло загрязняется не полностью сгоревшими углеводородами и сажой, продуктами износа, а также быстрее и сильнее окисляется. В то же время собирать именно использованные масла из автомобилей – задача не из легких, так как нет законодательной, экономической и материальной базы.

Основная доля автотранспортных средств принадлежит физическим лицам, а потому трудно контролировать утилизацию большей части ОМ законными экологически безопасными методами. Эффективным сбор ОМ как от физических, так и от юридических лиц, может быть только в соответствии с законодательной базой в этой области. В последние годы потребление смазочных масел в России составляло 1,6 - 1,7 млн. тонн в год.

Часть потребляемых масел теряется в процессе эксплуатации, причем в первую очередь используемые в проточных системах смазки (к примеру, осевые или консервационные). Считается, что из половины потребляемого масла образуются отходы. А отдельные виды свежих масел можно собрать и переработать от 8 до 80%. В отдельных государствах собирают ОМ в объеме 45% от свежих. В первую очередь, это относится к Германии, Швеции, Норвегии и Финляндии, меньше сбор ОМ в Бельгии, Голландии и Франции. В России сбор и переработка ОМ лицензируется. Сбор ОМ интересен, прежде всего, тем, что снижает экологическую угрозу. Из-за отсутствия квалифицированной системы сбора ОМ большая часть их попадает в окружающую среду и оказывает на нее губительное воздействие. ОМ крайне медленно разлагаются, их экологическая опасность заключается в следующем?

Характеристика стандартных нефтяных и синтетических масел

По происхождению масла делятся на нефтяные, синтетические, частично синтетические и растительные. В России около 90% потребляемых масел являются нативными нефтяными. Нефтяные базовые масла, полученные по традиционным схемам производства и очистки, представляют собой сложные смеси углеводородов (его атомов в молекуле от 20 до 60), выкипающие при температуре от 300 °С. В сырьевых масляных фракциях и остатке содержатся углеводороды и различные соединения следующих типов:

1. Парафины нормального и с молекулярной массой от 250 до 600;
2. Нафтенны би-, три- и полициклические;
3. Полициклические ароматические (ПАУ) и нафтеноароматические углеводороды с тремя и более циклами и с короткими боковыми цепями.
4. Парафино-нафтенные с 1–4 одинаковыми или разными циклами сочлененного или конденсированного типа строения и радикалами разной длины и степени разветвленности;
5. Парафино-ароматические: моно-, би-, полициклические с радикала-

ми разной длины и степени разветвленности;

Есть желательные компоненты, отвечающие требованиям к базовым маслам (БМ), и нежелательные, ухудшающие свойства масел (таблица 2) [3].

Таблица 2 – Желательные и нежелательные компоненты

Компоненты нефтяных базовых масел	
Желательные	Нежелательные
Изопарафиновые углеводороды	Твердые парафиновые и изопарафиновые углеводороды
Нафтеновые и парафино-нафтеновые углеводороды	Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и нафтено-ароматические углеводороды с короткими боковыми цепями
Моно- и бициклические ароматические и нафтено-ароматические углеводороды с длинными боковыми цепями	Смолистые и смолисто-асфальтеновые соединения
	Гетероорганические соединения

Нежелательные компоненты заметно снижают как физико-химические свойства – вязкость, коксуемость, плотность, цвет, так и эксплуатационные – вязкостно-температурные, низкотемпературные, стабильность к окислению.

Изменения состава масел при эксплуатации. Состав отработанных масел

В настоящее время прослеживается устойчивая тенденция дальнейшего совершенствования двигателей внутреннего сгорания, повышения мощности и снижения металлоемкости промышленных агрегатов. При этом, в маслах происходят процессы, ухудшающие их свойства и, в конечном счете, требующие их замены. Характер и глубина этих изменений зависят от свойств исходного масла и условий его работы. Вот некоторые из подобных процессов:

1. Старение масел в результате изменения коллоидной структуры масла, испарения (угара) легких фракций, химических реакций низко- и высокотемпературного окисления, термоллиза тяжелых ароматических углеводородов, полимеризации и конденсации углеводородов;

2. Взаимодействие с продуктами сгорания топлива, содержащими большое количество оксидов серы и азота, неполностью сгоревшие углеводороды и сажу;

3. Срабатывание функциональных присадок при их взаимодействии с продуктами старения масла и сгорания топлива, каталитическом действии некоторых металлов, температуры, кислорода и влаги, низкой стабильности самих присадок, а также адсорбции и хемосорбции некоторых из них поверхностного действия;

4. Накопление в масле продуктов срабатывания зольных присадок, органических и продуктов механической, термической и термоокислительной

деструкции полимерных присадок (загущающих и депрессорных), смол;

5. Образование олефинов с последующим их осмолением;

6. Обводнение.

При сборе состав отработанных масел усредняется. Сборщики сырья, зная состав масел и требования переработки, могут сортировать его для облегчения последующей переработки и повышения её экономических результатов. В усреднённом образце доля нефтяных масел - около 70 %, а синтетических - не больше 10 % (рисунок 2). Ведущее место по объёму потребления среди смазочных материалов занимают нефтяные масла.

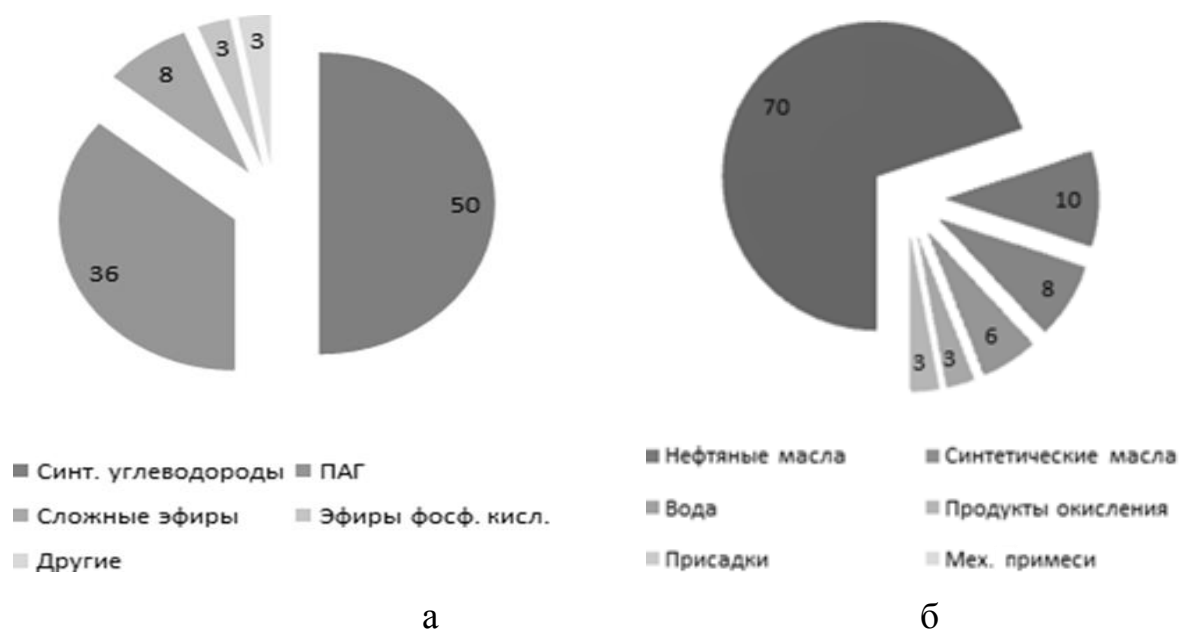


Рисунок 2 – Состав смесей отработанных масел

Основные стадии переработки отработанных масел

В ряде случаев масло из ОМ превосходит нефтяное по некоторым показателям. Из-за множества и разнообразия загрязнений смеси отработанных масел, собираемых централизованно, как правило, перерабатывают в несколько стадий. Регенерация ОМ на малогабаритных установках чаще всего основана на контактной, селективной очистке или иных физических, химических, физико-химических методах.

Современные технологии вторичной переработки ОМ на крупнотоннажных заводах мощностью 30 - 100 тыс. тонн позволяют перерабатывать доступные для сбора смеси ОМ. Такие заводы имеют следующие основные блоки (рисунок 3):

1. Предварительной очистки сырья;
2. Вакуумной дистилляции;
3. Доочистки дистиллятных масляных фракций.

Необходимо отметить, что селективная очистка возможна лишь для отсортированных промышленных масел общего назначения без присадок. Наиболее распространено включение кубового остатка в битумы [4].

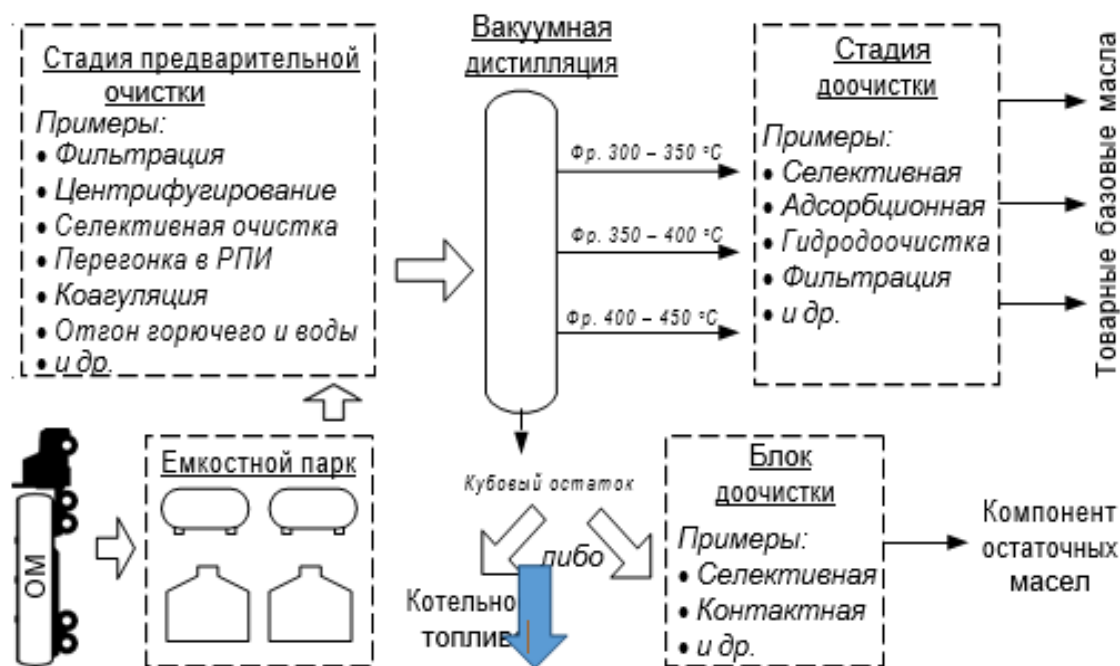


Рисунок 3 – Блок-схема завода промышленной переработки ОМ

На предприятиях используют различные технологии на основе физических, физико-химических и химических процессов, позволяющие получать из сырья до 65 - 70 % очищенного масла.

Технологические схемы могут включать предварительную очистку сырья и доочистку дистиллятных масляных фракций. Вот некоторые из этих процессов:

- отстаивание,
- фильтрация,
- центрифугирование,
- перегонка в роторно-плёночном испарителе (РПИ),
- отгон горючего топлива и воды,
- коагуляционная очистка,
- экстракционная (селективная) очистка,
- сернокислотная очистка,
- адсорбционная очистка,
- гидроочистка,
- ультрафильтрация [5].

Основная задача предварительной очистки – продление межремонтного пробега установок, снижение в змеевиках печи и, по возможности, повышение качества товарных продуктов. Стадия доочистки дистиллятных масляных фракций необходима для удаления остатков в производимой продукции нежелательных компонентов.

Стадия предварительной очистки

На стадии предварительной очистки из отработанных масел удаляют механические примеси (пыль, песок, частицы металла, коксообразные вещества),

воду, САВ, тяжелые продукты окисления, соли органических кислот и прочие, которые затрудняют дальнейшую переработку и грозят преждевременным выходом установок из строя, сокращая тем самым межремонтный период.

В настоящее время предварительная очистка сырья предполагает методы:

1. Физические (отстаивание, центрифугирование, фильтрация);
2. Экстракционные (селективная очистка, промывка);
3. Ректификационные (перегонка в РПИ, вакуумная дистилляция);
4. Физико-химические (коагуляционная очистка).

Отстаивание – осаждение частиц под действием силы тяжести. Отстаивание ранее применяли для удаления грубых механических примесей, отделения шлама и воды на первой стадии предварительной очистки. Оптимальной температурой процесса считают 80–90°C. Сегодня отстаивание, наряду с центрифугированием и фильтрацией, по-прежнему применяют для очистки масел, в которых нет детергентных и диспергирующих присадок (трансформаторное, турбинное).

Однако метод отстаивания малоэффективен для предварительной подготовки сырья, доступного для сбора, особенно содержащего диспергирующие присадки.

Центрифугирование – разделение частиц дисперсных систем с разной удельной массой под влиянием центробежных сил. При этом наиболее тяжелые загрязняющие примеси оттесняются к стенкам сосуда, затем следует водный слой, а у оси вращения скапливается очищенное масло. Центрифугирование эффективнее отстаивания, однако требует больших капитальных вложений и эксплуатационных расходов, а из-за большого содержания диспергирующих присадок неэффективно. Кроме того, при центрифугировании есть проблема «третьей фазы», то есть кроме фаз «масла» и «воды», образуется промежуточная фаза густого шлама, который засоряет центрифугу и заставляет часто останавливать её для чистки.

Фильтрация – разделение неоднородных систем при помощи пористых перегородок, задерживающих одни фазы и пропускающих другие. На стадии предварительной очистки используют грубую фильтрацию, а для доочистки дистиллятных масляных фракций – тонкую.

Селективная (экстракционная) очистка. Эффективным способом удаления канцерогенных соединений из отработанных масел, помимо гидроочистки жесткого режима, считают глубокую селективную (экстракционную) очистку. Её можно использовать как на стадии предварительной очистки ОМ после удаления механических примесей и воды, так и на стадии доочистки.

Коагуляционная очистка. Поскольку ОМ эмульсионно суспензионный коллоидный раствор, его предварительную очистку можно свести к разрушению данной коллоидной системы. Среди возможных способов разрушения коллоидных систем (повышение температуры, действие электрического тока, центрифугирование, фильтрация) наибольший интерес представляет коагуляционная очистка, способная в одну стадию разрушить коллоидную

систему, нейтрализовать сырье и удалить компоненты, которые сложно удалить другим методами. Щелочная коагуляционная очистка является альтернативой селективной и перегонке в РПИ.

На некоторых предприятиях применяют технологию, включающую коагуляционную, контактную или кислотнo-контактную очистку, вакуумную дистилляцию.

В таблице 3 приведено сопоставление ключевых методов предварительной очистки ОМ – пропановой деасфальтизации, перегонки в РПИ и щелочной коагуляционной очистки при переработке на крупных предприятиях по свключающей вакуумной дистилляции [10].

Таблица 3 – Сравнение различных методов предварительной очистки ОМ

Критерии оценки	Пропановая деасфальтизация	Перегонка в РПИ	Щелочная коагуляционная очистка
Выход продуктов, % масс:			
асфальт деасфальтизации	25	–5	–
керосино-дизельная фракция	4,5	74	5
масляныепогоны	55,5	20	64
кубовый остаток	13	1	25
потери	2		6
Качество асфальта деасфальтизации	Только для инсинерации	–	–
Качество керосино-дизельной фракции	Компонент котельного топлива	Только для инсинерации	Компонент котельного топлива
Качество масляных погонов	Требуютдоочистки		
Качество кубового остатка вакуумной дистилляции	Пригоден для низкосортных смазочных материалов	Только для инсинерации	Компонент битума
Капитальные затраты	Высокие	Умеренные	Низкие
Энергетические затраты	Высокие	Высокие	Умеренные

Таким образом, на стадии предварительной подготовки наиболее эффективными считаются коагуляционная и селективная очистка, перегонка в РПИ, термическая обработка. Отстаивание, фильтрация, центрифугирование не позволяют качественно подготовить к переработке современные ОМ и их смеси, доступные для сбора.

К достоинствам схемы с применением щелочной коагуляционной очистки и последующей вакуумной дистилляции относятся высокий выход целевого продукта, превышающий 65 % масс., низкий выход побочных продуктов (компонентов котельного топлива) - примерно 25% масс. при низких капитальных и умеренных эксплуатационных затратах. Такой результат дру-

гими методами переработки получить затруднительно.

Стадия перегонки предварительно очищенных отработанных масел

Вакуумная перегонка необходима для контроля пределов кипения и вязкости масляных фракций, получаемых из смесей отработанных масел. В этом процессе получают дистиллятные масляные фракции и кубовый остаток, который содержит, помимо смол, продуктов окисления и нежелательных соединений, ценное сырье – высоковязкий остаточный масляный компонент. Для его выделения заводы по переработке ОМ могут включать доочистку кубового остатка, например, деасфальтизацию пропаном. По упрощенной технологической схеме кубовый остаток вакуумной дистилляции можно использовать в качестве компонента котельного топлива или асфальта. При этом его применение в качестве топлива затруднено вследствие высокой зольности и наличия органических соединений фосфора. Коагуляционная очистка щелочью с последующим нагревом в печи вакуумной колонны до 360°C позволяет либо удалить, либо нейтрализовать, либо превратить органические соединения фосфора в неорганические [6].

Перегонка в роторно-пленочном испарителе (РПИ) известна во множестве вариантов. В этом процессе масло после удаления воды и легких фракций перегоняют в РПИ при глубоком вакууме и относительно невысокой температуре. Неиспарившуюся часть, состоящую из механических примесей, САВ и других нежелательных компонентов, удаляют снизу испарителя и используют обычно в производстве асфальта.

Перегонка осуществляется при остаточном давлении 1-2 мм рт. ст., температуре 300–350°C и непродолжительном контакте горячего сырья с металлическими поверхностями. В этих условиях крекинг сырья исключён, сработанные присадки концентрируются в кубовом остатке испарителя, а целевой продукт, включая остаточные масла, после доочистки пригоден для применения в качестве компонентов смазочных масел.

Стадия доочистки

На стадии доочистки из сырья удаляют остатки продуктов старения и загрязнений и придают ему товарный вид. Здесь наиболее эффективна контактная и кислотно-контактная очистка, гидрогенизация.

Сернокислотная очистка. Серная кислота разрушает смолисто-асфальтовые и ненасыщенные соединения, которые вместе с не прореагировавшей кислотой выпадают в осадок, образуя кислый гудрон. Наиболее ценные для масел циклопарафины серной кислотой не затрагиваются. После отделения кислого гудрона сырье промывают водным раствором щелочи, которая нейтрализует остатки серной кислоты и кислого гудрона. Очистку заканчивают промывкой масла водой и последующим его обезвоживанием. Обработка щелочью после серной кислоты может привести к образованию стойких водомасляных эмульсий. Для предотвращения этого обработку щелочью заменяют контактной очисткой отбеливающими глинами. Последние обладают большой адсорбционной способностью поглощать полярно-активные вещества продукты взаимодействия с серной кислотой. Кислотную очистку, совмещенную с контактной отбеливающими глинами, называют

кисотно-контактной очисткой [7]. Образующийся в процессе сернокислотной очистки кислый гудрон, а при кислотнo-кoнтактнoй очистке еще и oтpaбoтанный сорбент являются весьма токсичными побочными продуктами. Кроме серной кислоты, в них содержатся смолистые вещества и продукты полимеризации. Эти отходы экологически весьма опасны. Переработка ОМ с применением деасфальтизации, вакуумной перегонки или других процессов практически полностью вытеснила сернокислотную очистку. Недостатком сернокислотной очистки является не только образование кислого гудрона, но и невысокий выход очищенного масла. Она не удаляет из ОМ полициклических ароматических углеводородов и высокотоксичных соединений хлора, а также не позволяет перерабатывать масла на основе сложных эфиров, разлагая их и увеличивая количество кислого гудрона. Процессы с применением серной кислоты по своим экологическим характеристикам уступают другим процессам переработки ОМ.

Адсорбционная очистка. Применяется для доочистки дистиллятных масляных фракций и основана на способности адсорбентов удерживать загрязнения на поверхности и в гранулах капилляров. Адсорбционная очистка широко используется при переработке oтpaбoтанных масел, позволяя получать высококачественные базовые масла. В качестве адсорбентов применяют отбеливающие глины, бокситы, природные и синтетические цеолиты, силикагель, окись алюминия, алюмосиликаты. Адсорбционная очистка может осуществляться контактнoм методом, когда масло перемешивают с измельченным адсорбентом, перколяциoннoм, когда очищаемое масло пропускают через слой адсорбента. При перколяциoннoй очистке в качестве адсорбента чаще применяется силикагель, а потому этот метод весьма дорог. Перед контактнoй очисткой из oтpaбoтанных масел необходимо удалить воду и топливные фракции. Суть контактнoй очистки в следующем: при температуре 70 – 75 °С ОМ смешивают с порошкообразным адсорбентом, выдерживают при той же температуре, а затем фильтруют. Расход адсорбента при такой схеме может составлять 120 - 160 кг/м³ сырья.

Ионнообменная очистка. Является разновидностью адсорбционной и основана на способности ионитов (ионнообменных смол) удерживать загрязнения, диссоциирующие в растворенном состоянии на ионы. Иониты представляют собой твердые гигроскопические гели, получаемые полимеризацией и поликонденсацией органических веществ и не растворяющиеся в воде и углеводородах. Очищать ОМ можно контактнoм методом при перемешивании с зернами ионита размером 0,3-2,0 мм или перколяциoннoм методом, пропуская масло через колонну, заполненную ионитом. В результате ионoобмена подвижные ионы в пространственной решетке ионита заменяются ионами загрязнений. Свойства ионитов восстанавливают промывкой растворителем, сушкой и активацией 5 %-ным раствором едкого натра. Ионно-обменная очистка удаляет из масла кислые соединения, при этом смолистые вещества остаются [8].

Гидроочистка. Гидрогенизационные процессы все шире применяют при переработке ОМ, так как они позволяют получать качественные базовые

масла с высоким выходом и являются экологически более чистыми, чем серноокислотная и адсорбционная очистки. Гидроочистка с применением эффективных современных катализаторов обеспечивает лучшее качество масла по показателям стабильности и цвета, и поэтому её в основном применяют при доочистке дистиллятных масляных фракций под давлением до 2 МПа в присутствии различных катализаторов, водорода и температуре 380–400 °С. Недостатками гидроочистки являются использование водорода и серьезные эксплуатационные затраты, а также высокие требования к качеству сырья, так как многие вещества (в первую очередь органические соединения фосфора, кремния и хлора) отравляют катализатор. Гидроочистка экономически целесообразна при производительности завода не менее 30-50 тыс. т/год. На установках гидроочистки масел, как правило, используют водородсодержащий газ (ВСГ) каталитического риформинга, поэтому такая установка должна либо входить в состав нефтеперерабатывающего завода, либо находиться в непосредственной близости от него. Не исключено, что гидроочистка в будущем приобретет практическое значение при подготовке сырья вторичной переработки ОМ. Имеются отдельные сведения о работе в этом направлении. В частности, есть положительные результаты применения в гидроочистке отработанного катализатора гидрокрекинга, что коренным образом может изменить экономику процесса.

Ультрафильтрация. В последнее время появляются методы фильтрации масел на молекулярном уровне, когда фильтр или мембрана пропускают молекулы углеводородов и задерживают молекулы продуктов окислительной полимеризации и другие нежелательные примеси.

Таким образом, крупнотоннажные современные технологии вторичной переработки ОМ на заводах мощностью 30 – 100 тыс. тонн включают в себя три основных блока:

1. Предварительная очистка сырья;
2. Вакуумная дистилляция;
3. Доочистка дистиллятных масляных фракций.

Такая классическая схема переработки ОМ может претерпевать незначительные технологические изменения, направленные на улучшение качества конечного продукта

Библиографический список

1. Чередниченко Р.О. Методика отбора проб неоднородных по составу отработанных смазочных материалов [Текст] / Р. О. Чередниченко, В. А. Дорогочинская, Л. Станьковский // ХТТМ. – Москва, 2010. – С. 48–51.
2. Тонконогов Б.П. Вопросы импортозамещения смазочных масел [Текст]/ Б.П. Тонконогов, Л. Станьковский, В.А. Дорогочинская // Промышленный сервис, 2017 г. - Москва, 2017. – С. 8–14.
3. Станьковский Л. Качество масел вторичной переработки [Текст] / Д. А. Чумаков, В. А. Дорогочинская // Технологии нефти и газа, 2014 г. – Москва, 2014. – С. 16–19.
4. Бакулин Е.К. Антипенные свойства восстановленных масел [Текст] /

Л. Станьковский, В. А. Дорогочинская // Технологии нефти и газа. – Москва, 2016.–С. 35–39.

5. Станьковский Л. Приемистость к присадкам и рациональные пути использования восстановленных масел [Текст] / Л. Станьковский, В.А. Дорогочинская, Д.А. Чумаков, Б. П. Тонконогов, Е. К. Бакулин // Технологии нефти и газа. – Москва, 2015. –С. 53–57.

6. Трегер Ю.А. Стойкие органические загрязнители. Проблемы и пути их решения [Текст] / Ю.А. Трегер // Вестник МИТХТ – Москва, 2011.– С.87–101.

7. Станьковский Л. Классификация отработанных смазочных масел и показатели их качества [Текст] / Р.О. Чередниченко, В.А. Дорогочинская // ХТТМ – Москва, 2010. – С. 8–11.

8. Трегер Ю.А. Инвентаризация содержащего полихлорбифенилы оборудования в РФ. [Текст] / В.Н. Розанов, Г.С. Дасаева. // Энциклопедия инженера-химика – Москва, 2010. – С. 25–29.

УДК 628.357:54.635

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАВАЮЩЕГО ВОДНОГО РАСТЕНИЯ ЭЙХОРНИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, ОБРАЗОВАННЫХ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Гашникова А.О., Михайличенко Т.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, gashnikova20172017@gmail.com*

Аннотация. В данной статье рассматривается применение плавающего водного растения эйхорния для повышения эффективности доочистки сточных вод, образующихся в металлургическом производстве: основная характеристика водного растения, способы посадки и содержание цветка, выбросы сточных вод металлургического производства, способы очистки сточных вод, экологическое влияние.

Ключевые слова: водный гиацинт эйхорния, очистка сточных вод, экологи, металлургическое производство.

THE USE OF THE FLOATING AQUATIC PLANT EICHORNII FOR THE EFFICIENCY OF POST-TREATMENT OF WASTEWATER GENERATED IN METALLURGICAL PRODUCTION

Gashnikova A.O., Mikhailichenko T.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, gashnikova20172017@gmail.com*

Abstract. This article discusses the use of the floating aquatic plant eichornium to improve the efficiency of wastewater treatment generated in metallurgical

production: the main characteristics of the aquatic plant, planting methods and flower content, wastewater emissions from metallurgical production, wastewater treatment methods, environmental impact.

Keywords: *water hyacinth eichornia, wastewater treatment, environmentalists, metallurgical production.*

Металлургия является одним из крупнейших потребителей воды. Её водопотребление составляет 15-20% от общего водопотребления промышленных предприятий страны. Загрязнение окружающей среды металлургическими предприятиями происходит за счет сточных вод, в состав которых входят различные химические соединения, образующиеся при выплавке металлов. Металлургические производства обычно размещают в непосредственной близости от рек и озер или создают специальные гидротехнические сооружения, в которых она накапливается. По существующим оценкам от 20 до 50 % сточных вод содержат опасные ядохимикаты, нитраты, тяжелые металлы в концентрациях, опасные для здоровья. Расход воды по видам металлургического производства представлен на таблице 1.

Таблица 1 - Расход воды по видам металлургического производства

Вид производства	Продукция	Удельный расход воды, м ³ /т продукции	Доля в общем удельном расходе воды, %	всего
Горнорудное	руда	12	4,5	5,0
Агломерационное	агломерат	7,5	0,6	3,1
Коксохимическое	кокс	12,5	1,0	5,2
Доменное	чугун	60	4,5	25,0
Сталеплавильное	сталь	52	3,5	21,7
Прокатное	прокат	96	5,5	40,0
Всего	сталь	240	20	100

Перед сбросом в водоемы сточные воды проходят циклы очистки. Современная индустрия промышленной водоподготовки (водоподготовки) предлагает ряд высокотехнологичных решений для получения воды практически любой степени чистоты.

Ключевую роль в современных системах водоподготовки играют:

1. новые синтетические материалы и среды (на основе различных минералов и полностью синтетические, например, ионообменные смолы), включая разнообразные мембраны, и технологии на их основе (микро-, ультра-, нано-фильтрация, обратный осмос).

2. комбинирование химических, физико-химических и электрохимических принципов работы в рамках одной технологии (например, электродиализ, электродеионизация).

Эти методы уже показали положительные результаты в действии, но часть вредных примесей так или иначе остается в сточных водах при их поступлении в водоемы. Типы загрязняющих веществ перечислены в таблице 2.

Таблица 2- Количество вредных веществ входящие в состав сточных вод после определённого этапа производства

Загрязняющее вещество	Коксохимическое производство			Агломерационное производство			Доменное производство		
	Образуются загрязнений, т/год	Выбрасывается		Образуются загрязнений, т/год	Выбрасывается		Образуются загрязнений, т/год	Выбрасывается	
		т/год	кг/т кокса		т/год	кг/т агломерата		т/год	кг/т чугуна
Пыль, всего	21819	10827	2,157	45222	20910	1,643	11616	8046	0,793
В т.ч. диоксид марганца	0,007	0,007	—	4353	198	0,016	727	71	0,007
Оксид свинца	—	—	—	42	2	0,0002	—	—	—
Оксид кальция	—	—	—	58063	2755	0,217	18327	3387	0,334
Бенз(а)пирен	0,148	0,101	0,00002	0,119	0,057	—	0,004	0,003	—
Газообр. и жидкие:									
оксид углерода	8062	7877	1,569	365350	363350	28,711	37048	25263	2,49
сернистый ангидрид	4383	4278	0,852	21307	21307	1,674	1410	1404	0,138

Повысить эффективность биологической деструкции загрязняющих веществ на локализованных территориях можно за счет использования контактных носителей. В настоящее время в зарубежной и отечественной практике предлагается большое количество различных контактных носителей биомассы активного ила, с помощью которых можно значительно повысить интенсивность биохимических процессов, происходящих в водных массах.

Эйхорния используется как естественный носитель биомассы как плавающее растение, которое можно выращивать не только в естественных, но и в искусственных водоемах или на локализованных участках. Для этого растения главным условием является наличие воды соответствующей теплой температуры и наличие освещения.

Эйхорния (*Eichornia crassipes*) - многолетнее травянистое водное растение семейства понтедериевых, которое относится к сорнякам. Особенности растения – длинное корневище и стебель. Благодаря своей форме черешки листьев наполнены воздухом, благодаря чему соцветия и сами листья обладают плавучестью. Но главной особенностью растения является его уникальное свойство – эйхорния способна «переваривать» большинство вредных веществ и активно противодействует болезнетворным микроорганизмам, содержащимся в воде. Делается это путем осаждения взвесей по всей поверхности корней растения, при этом само растение может перерабатывать самые разные органические загрязнители - от горюче-смазочных материалов до навоза.

Уход за водяным гиацинтом в пруду требует соблюдения ряда правил. При посадке растения необходимо правильно выбрать участок. Емкость не должна быть слишком глубокой, и находиться она должна на открытом месте, так как культуре нужна теплая среда и много солнечного света. Эйхорнию высаживают в конце весны или в начале лета, когда устанавливается температура от +24 до +30 и хорошо прогревается водоем.

Для нормального роста и развития почву необходимо предварительно удобрить, используя следующие составы:

1. перегной;
2. очищенный донный ил;
3. коровяк или компост;
4. комплексное удобрение.

Эти композиции подходят и для периодической подкормки насаждений. Рост культуры напрямую зависит от количества питательных веществ в водной среде.

Теплолюбивая эйхорния не переносит температуры ниже 0 градусов. Чтобы сохранить плантации до следующего сезона, вам нужно будет переместить их в теплую среду. Хранение зимой можно осуществлять в аквариуме или другой прозрачной емкости, на дно которой будет помещен песок или ил.

Для успешной зимовки водяного гиацинта необходимо соблюдать следующие правила:

1. поддерживать температуру воды в карантинной ёмкости на том же уровне, что и в месте постоянного обитания цветка;
2. поместить удобренную почву на дно контейнера, чтобы корни растения могли правильно питаться;
3. регулярно подкармливать растение.

Освещение для посадок желательно организовать 12 часов в сутки. Но если такой возможности нет, достаточно поставить емкость с водяными гиацинтами на подоконник с южной стороны комнаты. А после того, как установится устойчивая теплая погода, его можно будет перенести в родной водоем, где он быстро нарастит массу листвы и к концу лета выбросит стебель.

Использование эйхорнии для очистки сточных вод основано на способности растения быстро размножаться и интенсивно расти. Благодаря способностям эйхорнии можно решить проблемы осветления и дезодорации сточных вод (исчезновение запахов и гибель многих болезнетворных бактерий).

В то же время необходимо учитывать, что потеря жизнедеятельности растения, например, перенесшего неожиданный мороз, резко снижает переработку растением загрязняющих элементов вплоть до полного прекращения. Если оставить на поверхности воды, эйхорния замерзает при низких температурах, а при таянии льда насыщается водой и полностью оседает на дно. Объем осадочной массы соответствует примерно 1/2 объема культивируемой биомассы. Но эти объемы намного меньше по сравнению с объемами извлеченных и переработанных загрязняющих веществ. В биомассе, отложившейся весной на дно, процессы деструкции продолжаются через процесс брожения, который в анаэробных условиях протекает довольно быстро за счет утилизации части кислорода воды. Для водоемов с малой нагрузкой нет необходимости срочно удалять культурные растения после сезона работ.

В водоемах с большими нагрузками, в основном с малым расходом или застоем воды, когда растения полностью покрывают поверхность бассейна, утратившие жизненные силы растения создают дополнительную ор-

ганическую нагрузку, поэтому целесообразно удалять растения на воду поверхность. каждый теплый культурный сезон. Хотя необходимость сбора растительной биомассы регулярно увеличивает затраты, эти плавающие растения собирать намного легче, чем подводные или укоренившиеся растения.

Фактически в ходе исследований не выявлено отрицательных особенностей использования эйхорнии для очистки сточных вод, за исключением возможного риска бесконтрольного размножения в условиях экваториального климата.

В остальном растение имеет лишь ряд преимуществ:

1. Не обладает способностью к самоопылению, что при необходимости остановит процесс роста в ограниченном водоеме;
2. Если водоем осушается, растительные остатки не выделяют опасных токсинов;
3. Улучшает качество загрязненной воды до естественного состояния;
4. Успешно борется с патогенами в воде;
5. Уровень затрат при использовании установки стремится к минимальным значениям, особенно в разрезе достигаемого эффекта;
6. Строительство очистных сооружений с расчетом на их использование значительно дешевле, чем организация традиционных малых и средних очистных сооружений;
7. Нет необходимости в обучении, удержании и переобучении высококвалифицированных кадров;
8. Излишки эйхорнии можно использовать на корм скоту, птице и рыбе;
9. Биоматериалы можно использовать для производства газа в биогенераторах, а затем использовать для отопления или производства энергии;
10. Материал полностью экологичен для человека, флоры и фауны.

Эйхорния в любом виде – растущем, цветущем, устаревшем – совершенно безопасна для человека, флоры и фауны, что подтверждено многочисленными научными исследованиями в процессе оценки ее использования для очистки воды. Он не накапливает вредные вещества в полном объеме, расщепляя их на микроэлементы, не наносящие вреда. Эйхорнию ошибочно считают растением с невероятным уровнем жизнеспособности, делающим невозможным ее полное уничтожение в случае необходимости, так как даже в тропических широтах, где она наиболее эффективно распространяется, она еще не нанесла существенного ущерба природе.

При этом она имеет большое количество вариаций использования, возрастающих и устаревших, от возможности использования в качестве корма и удобрения, пищевых добавок для рыб, птицы, скота (биомасса - источник витаминов А, В, С, Е, кроме микроэлементов в виде азота и калия) к использованию биомассы в качестве источника энергии для биогенераторов и компостирования. Использование водоочистных сооружений для повышения уровня экологической безопасности водоема и прилегающих земель – современная технология, не требующая значительных строительных и финансовых вложений.

Примером производства, внедрившее данную технологию, является

ЕВРАЗ НТМК. ежегодно высаживают в пруд-осветлитель, где отстаиваются производственные воды, более 1000 высших водных растений, мощные корни которых поглощают вредные примеси, окисляют и расщепляют их до простых элементов и усваивают в пищу. Экологи ЕВРАЗ НТМК используют микроводоросль хлореллу с 2010 года. Эта сферическая или эллипсоидальная клетка размером не более восьми микрометров попадает в воду в виде концентрированной взвеси. Микроводоросли быстро размножаются: в течение дня их становится в четыре раза больше. В процессе фотосинтеза растение поглощает углекислый газ, насыщает воду кислородом, удаляет органические и неорганические вещества и обогащает воду питательными веществами.

Для предотвращения миграции "жителей" вдоль акватории пруда устанавливаются камышовые отводы. Кроме того, для очистки сточных вод используются угольные фильтры, которые меняются несколько раз в месяц.

Следовательно, хотелось бы еще раз подчеркнуть преимущества технологии с использованием эйхорнии:

1. Наличие стабильного воздействия на основную задачу – очистка воды;
2. Минимальный уровень инвестиций для начала внедрения технологии;
3. Возможность зачета части вложенных средств за счет продукта переработки;
4. Привести состав очищенной воды в соответствие с правилами гигиены;
5. Очистка сточных вод эйхорнией – это рациональное использование природных ресурсов на благо человечества в будущем.

Распространение данной технологии может найти себя на территории металлургического производства «Евраз ЗСМК». Предполагается на ежегодной основе распространение данного растения во всех существующих акваториях предприятия, что в последствии будет иметь существенных экологических эффект за счет переработки растением всех органических и неорганических веществ на простые вещества на весенне-летний период.

Библиографический список

1. Эйхорния для очистки сточных вод [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://prof-vodochistka.ru/tekhnologiya/ejkhorniya-dlya-ochistki-stochnykh-vod> (дата обращения: 12.09.2022).
2. Влияние металлургической промышленности на окружающую среду и здоровье человека. Меры по снижению воздействия [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://greenologia.ru/eko-problemy/metallurgicheskay-promyshlennost.html> (дата обращения: 12.09.2022).
3. Влияние металлургических предприятий на сточные воды [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: https://studbooks.net/1247052/ekologiya/vliyanie_metallurgicheskikh_predpriyatiy_stochnye_vody (дата обращения: 12.09.2022).

4. Эйхорния поможет очистке [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://35media.ru/articles/2018/07/02/ejhorniya-pomozhet-ochistke> (дата обращения: 12.09.2022).

5. Эйхорния [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://epz.ru/stroitelstvo/prudyi/vodnyie-rasteniya/eyhorniya> (дата обращения: 12.09.2022).

6. ЕВРАЗ НТМК высадил тропические растения для очистки воды в одном из прудов Нижнего Тагила [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://mstrok.ru/news/evraz-ntmk-vysadil-tropicheskie-rasteniya-dlya-ochistki-vody-v-odnom-iz-prudov-nizhnego-tagila> (дата обращения: 12.09.2022).

УДК 632. 151

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. НОВОКУЗНЕЦКА И ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Коноплев Д.Д., Коротков С.Г., Домнин К.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, konoplev-ddk@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено состояние атмосферного воздуха города Новокузнецк и проведена его эколого-климатическая оценка. Произведен анализ результатов расчетов выбросов загрязняющих веществ от сжигания угля марки Д и А, а также, выбор наиболее приемлемого с экологической точки зрения вида топлива для котельного агрегата.

Ключевые слова: атмосферный воздух, вредные выбросы, твердое топливо, котельный агрегат, уголь.

INVESTIGATION OF THE STATE OF THE ATMOSPHERIC AIR OF NOVOKUZNETSK AND THE POSSIBILITY OF REDUCING HARMFUL EMISSIONS

Konoplev D.D., Korotkov S.G., Domnin K.I.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, konoplev-ddk@mail.ru*

Abstract. The paper considers the state of the atmospheric air of the city of Novokuznetsk and its ecological and climatic assessment is carried out. The analysis of the results of calculations of emissions of pollutants from the combustion of coal grades D and A, as well as the choice of the most environmentally acceptable type of fuel for the boiler unit.

Keywords: atmospheric air, декабрь harmful ozone emissions, solid наибольшее fuel, городского boiler unit, углерод coal.

Защита воздушного бассейна от загрязнений промышленными

выбросами является одной из важнейших проблем вообще, и для г. Новокузнецка в частности.

Атмосферный воздух Новокузнецка исследовался на содержание аммиака, бенз(а)пирена, взвешенных веществ, водорода фтористого, водорода цианистого, диоксида и оксида азота, диоксида серы, металлов, оксида углерода, углерода (сажи), сероводорода, фенола и формальдегида [1]. Количество проб атмосферного воздуха с превышением ПДК загрязняющих веществ представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Количество проб атмосферного воздуха с превышением ПДК загрязняющих веществ

Наименование загрязняющего вещества	Количество проб	Количество проб с превышением ПДК
Всего, в том числе:	39468	837
Водород фтористый	6069	658
Оксид углерода	4741	58
Взвешенные вещества	6901	92
Формальдегид	5233	17
Фенол	5290	2
Аммиак	805	1
Диоксид азота	6970	7
Оксид азота	3459	2

Наибольшее количество проб с превышением ПДК отмечено по водороду фтористому – 658, наименьшее по аммиаку – 1.

Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в г. Новокузнецк в долях ПДК представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в г. Новокузнецке в долях ПДК

Наименование вещества	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Бенз(а)пирен	6,0	6,8	5,8	3,5	7,1
Водород фтористый	0,8	0,8	0,9	0,9	1,2
Взвешенные вещества	0,9	1,0	1,0	0,7	1,6
Аммиак	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
Диоксид азота	0,8	0,6	0,7	0,6	1,0
Формальдегид	0,5	0,6	0,7	0,5	1,7
Оксид углерода	0,3	0,5	0,4	0,5	0,5
Фенол	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3
Оксид азота	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
Диоксид серы	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Углерод(сажа)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7

Бенз(а)пирен

Среднегодовая концентрация бенз(а)пирена по сравнению с 2020 годом увеличилась в 2 раза. Наибольшее загрязнение этой примесью наблюдалось в Кузнецком районе, где средняя за год концентрация составила 13,5 ПДК, максимальная из среднемесячных концентрация установлена в декабре – 42,4 ПДК. В течение года зарегистрировано 10 высоких среднемесячных концентраций бенз(а)пирена, превышающих ПДК более чем в 10 раз.

Формальдегид, взвешенные вещества, водород фтористый

Средняя за год концентрация формальдегида относительно 2020 года возросла в 3,4 раза, взвешенных веществ – в 2,3 раза, водорода фтористого – 1,3 раза. В Куйбышевском районе установлены максимальные из разовых концентрации: формальдегида – 1,9 ПДК, взвешенных веществ – 5,2 ПДК; в Центральном районе – водорода фтористого – 4,4 ПДК [5].

Диоксид азота, оксид азота

По сравнению с предыдущим годом увеличились среднегодовые концентрации диоксида азота в 1,7 раза, оксида азота – в 2 раза, но не превысили допустимого значения. Максимальные из разовых концентрации данных примесей зарегистрированы в Центральном районе и составили 1,3 ПДК и 2,0 ПДК соответственно.

Углерод (сажа)

Средняя за год концентрация углерода (сажи) увеличилась в 7 раз и составила 0,7 ПДК. Максимальная из разовых концентрация углерода не превысила установленную ПДК во всех районах городского округа.

Диоксид серы, оксид углерода

Среднегодовая концентрация диоксида серы (0,1 ПДК) сохраняется на одном уровне в течение четырех последних лет. Средняя за год концентрация оксида углерода (0,5 ПДК) осталась на неизменном уровне по сравнению с прошлым годом. Максимальная из разовых концентрация оксида углерода 2,7 ПДК и наибольшая повторяемость проб выше ПДК – 2,0 % отмечены в Центральном районе.

Фенол, аммиак

Среднегодовые концентрации аммиака и фенола по отношению к прошлому году увеличились незначительно, составили 0,8 ПДК и 0,3 ПДК соответственно. Максимальные из разовых концентрации аммиака и фенола – 1,1 ПДК.

Водород цианистый, сероводород

Максимальная из разовых концентрация водорода цианистого составила 0,033 мг/м³, сероводорода – 1,0 ПДК.

Металлы

Загрязнение воздушного бассейна металлами невелико: максимальные концентрации из среднемесячных значений не превышали допустимые санитарные нормы.

За пятилетний период (2017-2021 гг.) среднегодовая концентрация бенз(а)пирена увеличилась в 1,2 раза. Средняя за год концентрация взвешен-

ных веществ увеличилась в 1,8 раза, водорода фтористого – в 1,5 раза [1].

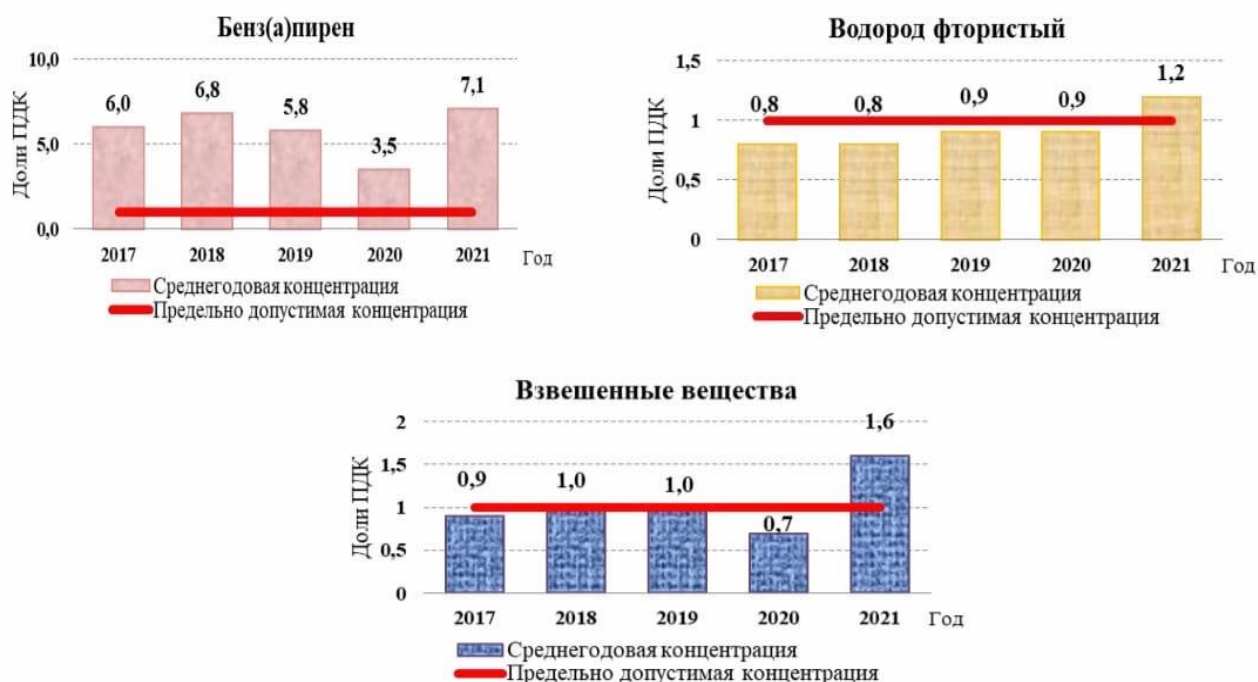


Рисунок 1 - Тенденция выполненные изменения отходах среднегодовых концентраций фтористого основных оксида примесей в г. Новокузнецке в положе долях ПДК

Экологическая обстановка в городе Новокузнецк очень напряженная. Новокузнецк является седьмым в России по выбросу отходов и входит в пятерку городских областей страны по химическому загрязнению атмосферы. В городе существуют 42 предприятия, которые выбрасывают в атмосферу более ста наименований загрязняющих веществ. Состояние оборудования промышленных предприятий города оставляет желать лучшего – только 75 % выбросов улавливаются и обезвреживаются. Остальное остается в атмосфере и сточных водах. Экологическая обстановка ещё больше обостряется климатическими условиями и географическим расположением города – окружающие Новокузнецк горные скалы содействуют «штилевой» погоде, а это ведет к образованию смога. Вода в реке Томь, сильно загрязнена. В стоках отмечено повышенное содержание, железа, магния, меди, нефтепродуктов [2].

Крупными загрязнителями городского воздуха являются:

- ОАО ЗСМК – 60 %;
- Кузнецкая ТЭЦ – 12 %;
- алюминиевый завод – 8 %;
- объекты бывшего КМК – 7 %;
- Абагурская аглофабрика – 7 %;
- ОАО «Кузнецкие ферросплавы» – 6 %.

В таблице 3 представлены валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по отраслям промышленности г. Новокузнецка за 2021 г.

Таблица 3 – Валовые выбросы в атмосферу за 2021 год

Отрасль	Валовый выброс, тыс. тонн/год	Процент, %
Черная металлургия	374,07	71,88
Цветная металлургия	31,44	6,04
Теплоэнергетика	42,5	8,16
Производство строительных материалов	3,61	0,69
Топливная отрасль	52,2	10,03
Жилищно-коммунальное хозяйство	12,8	2,46
Прочие	3,82	0,73
Итого	520,44	100

Остальная часть вредных выбросов, составляющих из года в год практически 550 кг на 1-го городского жителя, оседает в воздушной среде и сточных водах [2].

Ощутимый вклад в загрязнение воздуха вносит теплоэнергетика, в частности выбросы от котельных.

Условия сгорания топлива в разных теплотехнических устройствах и подготовка их к сжиганию различны, как различны и сами виды топлива [3].

Для горения твёрдого топлива нужно большое количество воздуха, превышающее в несколько раз по весу количество топлива. При продувании слоя топлива воздухом сила аэродинамического давления потока P может быть меньше веса кусочка топлива G или, наоборот, больше его. В топках с «кипящим слоем» «кипение» связано с разьединением частиц топлива, что увеличивает объем слоя в 1,5-2,5 раза. Движение частиц топлива (обычно они от 2 до 12 мм) похоже на движение кипящей жидкости, почему такой слой и получил название «кипящего». Процесс сгорания может быть условно разделен на стадии, накладывающиеся одна на другую. Эти стадии протекают в разных температурных и тепловых условиях и требуют различного количества окислителя. Свежее топливо, поступающее в топку, подвергается более или менее быстрому нагреванию, из него испаряется влага и выделяются летучие вещества – продукты сухой перегонки топлива. Одновременно протекает процесс коксообразования. Кокс сгорает и частично газифицируется на колосниковой решетке, а газообразные продукты сгорают в топочном пространстве. Негорючая минеральная часть топлива при сгорании топлива превращается в шлак и золу [4].

Ниже приведён показатель вредности различных видов топлива, который базируется на ПДК соответствующих вредностей (таблица 4).

Котельные Новокузнецка работают на твёрдом топливе - угле Кузнецкого бассейна. Дымовые газы содержат такие вредные вещества, как зола, диоксид серы, диоксид азота, оксид углерода, бенз(а)пирен.

Таблица 4 – Сравнительные данные по вредности различных видов органического топлива

Топливо	Относительные слагаемые вредности			Суммарная вредность
	зола	SO ₂	NO _x	
Кузнецкий уголь	0,26	1,82	6,66	8,74
Назаровский уголь Т	0,33	3,87	7,56	11,76
Мазут, $S^P=1\%$	-	1,53	6,41	7,94
Сланцы	2,59	8,57	8,16	19,32
Подмосковный уголь	1,12	14,58	7,26	22,96

Известно, что в золошлаковых отходах содержание большинства химических элементов (за исключением легколетучих) в несколько раз выше их первичного содержания в исходном угле (таблица 5).

Таблица 5 – Среднее содержание микроэлементов в различных углях и их золах, г/т

Микроэлемент	Уголь	Зола	Степень концентрации, раз
Be	2,7	10,5	>3,8
Cd	1,8	9,0	5,0
V	24,7	120,4	4,8
Cu	11,8	60,0	5,1
Zn	28	140,1	5,0
Hg	0,15	0,9	6,0
Pb	12,8	63,3	4,9
As	18,8	91,0	5,0
Ni	10,4	50,5	4,9

Данные таблицы указывают на высокую концентрацию тяжелых микроэлементов в золах, что, в свою очередь, может вызывать серьёзные проблемы со здоровьем и наносить ощутимый вред окружающей среде.

Диоксид углерода поступает в атмосферу, включаются в природные циклы и поглощаются растительностью в процессе синтеза органических соединений и регенерации кислорода. В этом качестве отходы нельзя признать вредными. Однако масштабы использования органического топлива и выброса CO₂ превышают регенерационные возможности растительного мира.

При горении серы, присутствующая в органическом топливе, превращается в диоксид серы, количество которого определяется сернистостью используемого топлива. Из-за трансграничного переноса в наиболее неблагоприятном положении оказались страны, расположенные на востоке и северо-востоке Европы, в связи с преобладанием западных потоков воздушных масс в этом регионе.

Диоксиды азота образуются при горении за счет окисления азота воздуха только при высоких температурах и за счет азота в топливе,

находящегося в сложных органических соединениях, входящих в состав угля и в молекулярном состоянии. При движении дымового факела в атмосфере количество остаточного диоксида азота находится в пределах 60÷70 %. Если выбросы от автотранспорта производятся на уровне земли, то выбросы энергетических объектов осуществляются на высоте более 100-300 м. Это способствует попаданию примесей в верхние слои атмосферы, в частности в озоновый слой, расположенный на высоте 18÷26 км.

Комплексность рассмотрения проблемы защиты атмосферы предусматривает применение одновременно трех мероприятий: снижение величины вредных выбросов путем усовершенствования технологических процессов, конструкций агрегатов и использования отходов; очистку технологических газов от вредных выбросов; рассеивание вредных выбросов в атмосфере [5].

На основе расчетов выбросов загрязняющих веществ от сжигания углей марки Д и А, выполненного по методике [6], можно представить результаты этих расчетов на следующих диаграммах (рисунки 2 и 3).

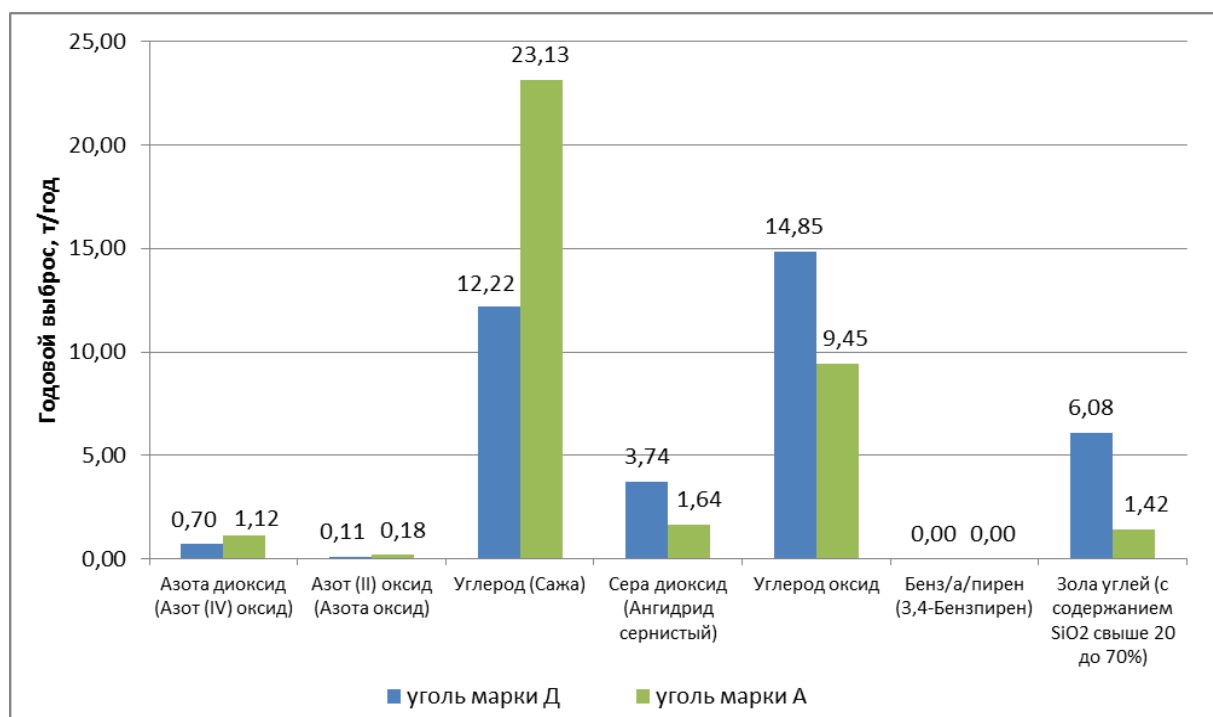


Рисунок 2 – Годовой выброс при сжигании углей марок Д и А. Из гистограммы на рисунке 2 видно, что выбросов всех загрязняющих веществ (кроме сажи, оксидов азота и 3,4-Бензпирена) выделяется меньше при сжигании угля марки А. Большее количество выбросов сажи и возможно 3,4-Бензпирена при сжигании угля марки А объясняется большим содержанием углерода в нём. Большее количество выбросов оксидов азота при сжигании угля марки А объясняется большим значением его низшей теплоты сгорания и более высокой температурой горения.

Поскольку низшая теплота сгорания у угля марки А больше, чем Д, следовательно его расход будет ниже на единицу генерируемой тепловой энергии и количество выбросов будет меньше.

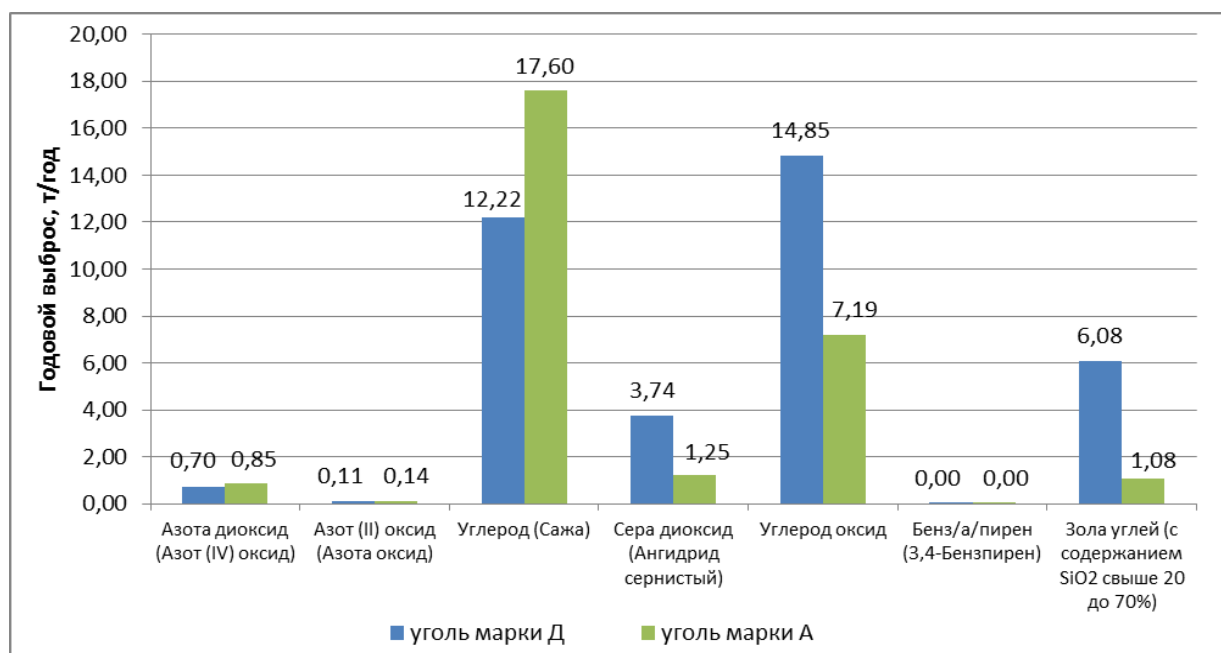


Рисунок 3 - Годовой выброс при сжигании углей марок Д и А при генерации равной тепловой мощности

Из гистограммы на рисунке 3 видно, что выбросов всех загрязняющих веществ (кроме сажи, оксидов азота и 3,4-Бензпирена) выделяется меньше при сжигании угля марки А.

Таким образом, выполненные расчеты и анализ их результатов показывают, что при равных условиях сжигания углей марок Д и А лучшие значения выбросов по диоксиду серы, оксиду углерода и золе принадлежат углю марки А, а выбросов сажи, оксидов азота и бенз/а/пирена – углю марки Д.

По годовому выбросу (исходя из расхода топлива 365 т/год) при сжигании угля марки А по сравнению с углем марки Д имеем следующую разницу в показателях:

- на 5,4 т/год меньше CO,
- на 4,65 т/год меньше золы углей,
- на 2,1 т/год меньше SO₂,
- на 0,067 т/год больше NO,
- на 0,42 т/год больше NO₂,
- на 10,9 т/год больше сажи,
- на $6 \cdot 10^{-6}$ т/год больше бенз/а/пирена.

Суммарный годовой выброс загрязняющих веществ для угля марки Д и марки А составляет соответственно 37,71 и 36,94 т/год. Таким образом, при сжигании угля марки А годовой выброс загрязняющих веществ на 0,77 т/год меньше.

При генерации равной тепловой мощности по годовому выбросу при сжигании угля марки А (исходя из расхода 277,7 т/год) по сравнению с углем марки Д (исходя из расхода 365 т/год) имеем следующую разницу в показателях:

- на 7,67 т/год меньше CO,

- на 4,99 т/год меньше золы углей,
- на 2,5 т/год меньше SO₂,
- на 0,024 т/год больше NO,
- на 0,15 т/год больше NO₂,
- на 5,38 т/год больше сажи,
- на $19 \cdot 10^{-7}$ т/год больше бенз/а/пирена.

При генерации равной тепловой мощности суммарный годовой выброс загрязняющих веществ для угля марки Д и марки А составляет соответственно 37,71 и 28,1 т/год. Таким образом, генерация равной тепловой мощности от сжигания угля марки А, дает годовое снижение выбросов загрязняющих веществ на 9,6 т/год.

При окончательном выборе в качестве рабочего топлива угля марки А снижение выбросов сажи возможно при организации более совершенной системы сжигания, уменьшающей уровень недожога углерода или установке соответствующей газоочистки(сажеуловителя). Уловленная сажа может быть окускована(сбрикетирована) и возвращена в процесс сжигания, что соответствует современным подходам безотходного производства, или может быть реализована в качестве сырья для других технологических процессов.

Библиографический список

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса в 2020 году// Администрация Правительства Кузбасса. Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса. – Кемерово, 2021. – 240 с.
2. Статистический анализ экологической обстановки г. Новокузнецка / Е.А. Тарбеева, С.А. Стрекалова // Экономическая наука сегодня : теория и практика - Чебоксары, 2016. - 302-304 с.
3. Теплотехника / Щукин А.А. / Москва : Металлургия, 1973. – 223 с.
4. Горение твердого топлива (гетерогенное горение) [Электронный ресурс]: сайт. – режим доступа: <https://infopedia.su/22x7049.html>, свободный (дата обращения: 25.09.2022).
5. Топливо и основы теории горения. Конструкции топок [Электронный ресурс]: сайт. - Режим доступа: https://eti.su/articles/over/over_1523.html, свободный (дата обращения: 25.09.2022).
6. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 ГКалл в час (с учетом методического письма НИИ Атмосфера № 335/33-07 от 17 мая 2000 г.) – Москва, 1999.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛУРГИИ

Вахтарова К.О., Михайличенко Т.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, kristinkavax@gmail.com*

Аннотация. В работе приведены свойства и методы получения водорода. Представлена и проанализирована структура потребления водорода в России и в мире. Перечислены основные сдерживающие факторы внедрения водорода в производственные процессы металлургической отрасли. Рассмотрена концепция развития водородной энергетики в РФ. Дана экологическая и экономическая оценка перехода на «зеленый» водород.

Ключевые слова: металлургия, «зеленый» водород, водородная энергетика, экологическая оценка.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE USE OF HYDROGEN IN METALLURGY

Vakhtarova K.O., Mikhailichenko T.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, kristinkavax@gmail.com*

Abstract. The paper presents the properties and methods for producing hydrogen. The structure of hydrogen consumption in Russia and in the world is presented and analyzed. The main constraining factors for the introduction of hydrogen into the production processes of the metallurgical industry are listed. The concept of development of hydrogen energy in the Russian Federation is considered. An ecological and economic assessment of the transition to "green" hydrogen is given.

Key words: metallurgy, "green" hydrogen, hydrogen energy, environmental assessment.

Водород – химический элемент, открывающий периодическую таблицу химических элементов Д.И. Менделеева под атомным номером 1 и являющийся самым распространенным химическим веществом во Вселенной.

Однако на Земле водород практически не встречается в чистом виде и требует извлечения из других соединений различными методами: паровой конверсией метана или природного газа, газификацией угля, электролизом воды, пиролизом, частичным окислением. Также разрабатываются и применяются биотехнологии, с помощью которых водород возможно получить из водорослей, биомассы или даже мусора [1].

Благодаря своим положительным физико-химическим свойствам, а

именно:

- малый вес;
- хорошая теплопроводность;
- высокая химическая активность;
- большое количество тепла, образующееся в процессе горения;
- универсальность;
- безопасность использования.

Водород является не только востребованным компонентом для большинства технологических процессов во многих отраслях промышленности, но и популярным [2]. Структура мирового потребления водорода представлена на рисунке 1.

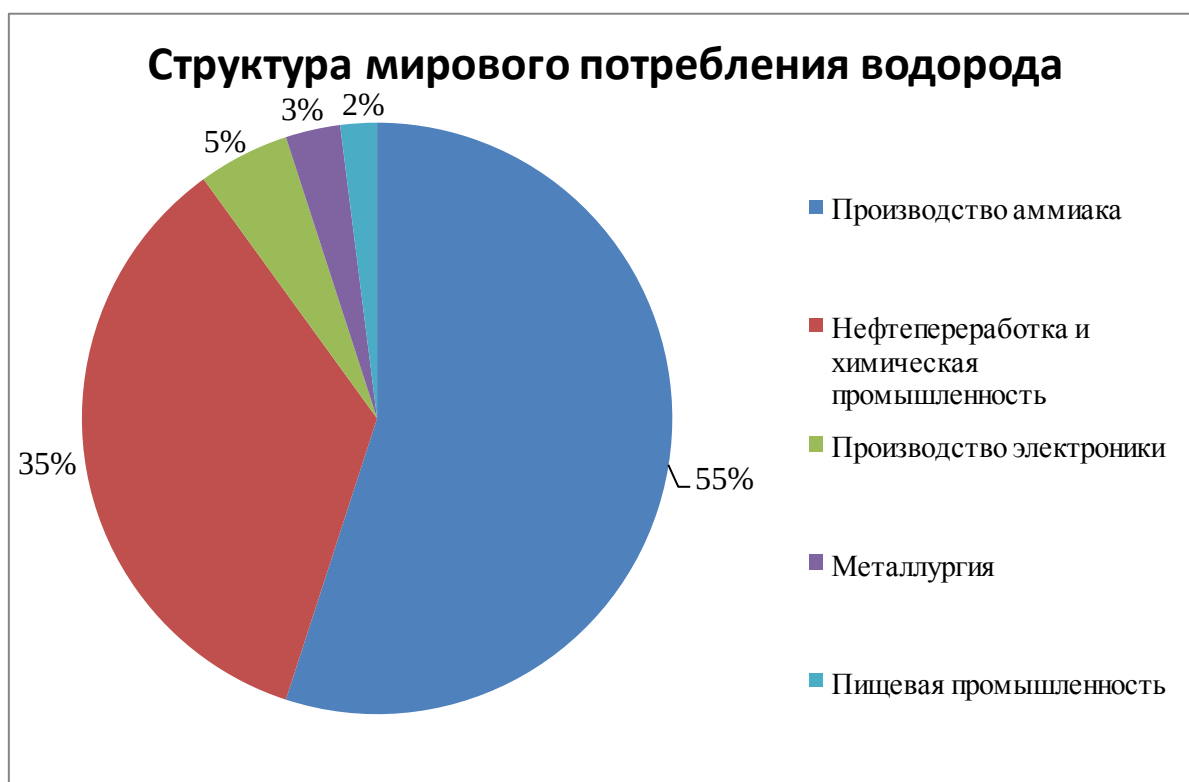


Рисунок 1 – Структура мирового потребления водорода

Из диаграммы, представленной на рисунке 1, наглядно видно, что доля применение водорода, приходящаяся на металлургическую отрасль невелика. В основном он используется для получения металлизированного сырья прямым восстановлением железа. С помощью водорода восстанавливают металлы из их оксидов, например, таким способом получают вольфрам. При горении водорода в кислороде температура поднимается примерно до 3000 °С, что позволяет сваривать тугоплавкие металлы.

На рисунке 2 представлена структура потребления водорода в России, которая позволяет судить о схожести отечественной и мировой «водородной» ситуации. Одинаково преобладающей отраслью является производство аммиака (по 55 % за ней следует нефтеперерабатывающая промышленность, потребляющая 35 % мирового объема водорода и немногим меньше 23 % российского).

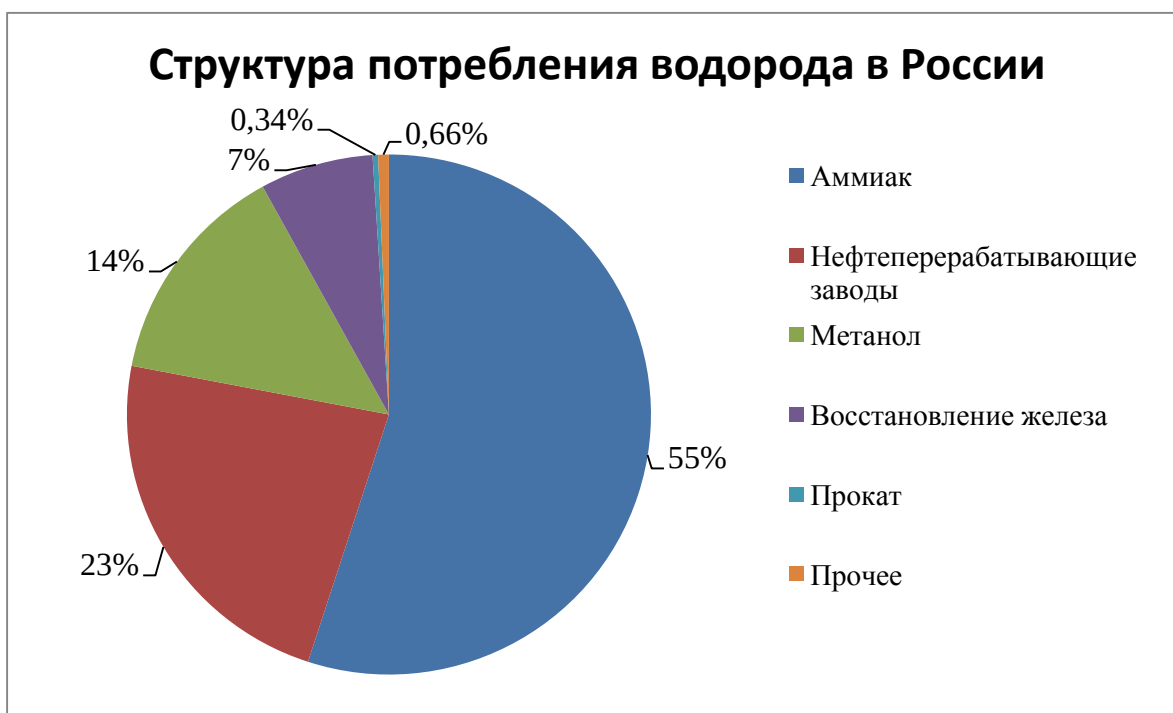


Рисунок 2 – Структура потребления водорода в России

Производство электроники и пищевая промышленность, потребляющие по 5 % и 2 % соответственно в мировой структуре, в российской относятся категории «Прочие» и составляют менее 1 %.

Российская металлургическая отрасль является более освоенной в плане применения водорода в процессах производства в сравнении с общемировыми цифрами (7 % и 3 % соответственно). Однако на низком уровне внедрения технологий водородной металлургии находится прокатное производство, где водород в больших объемах используется при термической обработке холоднокатаного проката, а также для получения азотно-водородной защитной атмосферы при термической обработке трубного проката на металлургических предприятиях. И, несмотря на способность водорода при производстве стали заменить уголь и газ, оставляющих высокий углеродный след, его применение в данной отрасли составляет лишь 0,34 % от общего объема потребления нашей страны.

Основными сдерживающими факторами развития водородной металлургии являются проблемы материаловедения, необходимость совершенствования технологий транспортировки, хранения и потребления водорода. Перспективными способами для транспортировки водорода в РФ является трубопроводный транспорт, автомобильный, морской, железнодорожный для транспортировки в сжатом, сжиженном или связанном состоянии, в том числе в виде аммиака, жидких или твердых носителей. Основной материаловедческой проблемой при этом является охрупчивание металлов водородом. Проблема водородной хрупкости тесно связана с хладостойкостью конструкционных материалов, поскольку большая часть России – это территории с низкой годовой температурой. Перед учеными и инженерами поставлена задача разработки современных

энергетических систем потребления водорода, включая создание турбогенераторов и двигателей. Также по водородной тематике требуется разработка нормативной документации по материалам, технологиям, конструкциям.

Барьером для широкого внедрения водорода является необходимость строительства углеродных хранилищ, поскольку при производстве водорода необходимо соблюдать требования по выбросам углекислого газа. Это обуславливает повышенную стоимость водорода по сравнению с традиционными энергоносителями. Поэтому необходимо развивать технологии для уменьшения себестоимости получения, транспортировки, хранения и потребления водорода [3].

Концепция развития водородной энергетики в РФ утверждена 5 августа 2021 года и согласно ей к концу 2024 года российская промышленность должна вырабатывать 200 тыс. тонн водорода в год, до 2–12 млн тонн в 2035 году, а к 2050 году Россия будет отправлять на экспорт 15–50 млн тонн водорода. Однако концепция предусматривает получение водорода за счет использования энергии гидроэлектростанций, атомных и тепловых станций при электролизе воды, а также при пиролизе углеводородов [4].

На настоящий момент наиболее экономически выгодным считается производство водорода из ископаемого сырья и в данный момент наиболее доступным и дешёвым процессом является паровая конверсия (согласно прогнозам, она будет использоваться в начальной стадии перехода к водородной экономике для упрощения преодоления проблемы «курицы и яйца», когда из-за отсутствия инфраструктуры нет спроса на водородные автомобили, а из-за отсутствия водородных автомобилей не строится инфраструктура. В долгосрочной перспективе, однако, необходим переход на возобновляемые источники энергии, так как одной из главных целей внедрения водородной энергетики является снижения выброса парниковых газов; такими источниками может быть энергия ветра или солнечная энергия, позволяющая проводить электролиз воды). Снизить уровень выбросов углерода в производственных отраслях можно за счет водорода, полученного с использованием низкоуглеродных технологий, для этого можно применять технологии улавливания и хранения углекислого газа, а также электролиза воды, «в первую очередь с помощью энергии объектов атомной, гидро-, ветряной и солнечной энергетики».

Цветовая градация водорода зависит от способа его выработки и углеродного следа, то есть количества вредных выбросов:

- «зеленый» - произведён с помощью энергии из возобновляемых источников методом электролиза воды, считается самым чистым;
- «голубой» - произведенный из природного газа; в этом случае углекислый газ накапливается в специальных хранилищах;
- «желтый» - произведенный при помощи атомной энергии.
- при производстве «серого» водорода вредные выбросы идут в атмосферу [5].

Сейчас Россия производит около 5 млн тонн водорода в год в основ-

ном методом парового риформинга метана («серый» водород).

В атомной энергетике для производства «желтого» водорода, получаемого электролизом с использованием ядерной энергии, у нас есть передовые высокоэффективные технологии строительства как больших, так и малых модульных реакторов по производству альтернативного источника энергии. Кроме того, ядерная энергия может быть использована для деминерализации значительного количества воды, необходимой для электролиза, так как для получения 1 кг водорода требуется не менее 9 кг деминерализованной воды.

Для производства «голубого» водорода у нас есть не только колоссальные ресурсы природного газа, но и геологические запасы и истощенные залежи, в которых можно хранить уловленный CO_2 , в том числе образующийся в процессе риформинга метана. Не в каждой стране есть такая возможность – использовать CO_2 за счет его улавливания и хранения. Поэтому с производством и поставками «голубого» водорода для России открываются новые возможности для бизнеса в сфере оказания международных услуг по долговременному хранению парниковых газов. Это отдельная, перспективная отрасль, которая, по мнению экспертов, может быть сравнима по масштабам с нефтяной промышленностью и имеет большой экспортный потенциал.

Для полного перехода на использование «зеленого» водорода при выплавке стали металлургическим компаниям РФ необходимо около 100 ГВт новых мощностей ВИЭ и еще 50 ГВт традиционной генерации. На это потребуется свыше \$50 млрд инвестиций, а себестоимость стали вырастет вдвое. Предполагается, что использование водорода вместо угля и газа поможет сократить углеродный налог в ЕС, объем которого для черной металлургии РФ оценивается в \$314 млн в год.

Экономический смысл такая замена будет иметь при двух условиях: если «зеленый» водород, как и ожидается, подешевеет до значений менее \$3–4 за 1 кг (сегодня такой водород стоит в три раза дороже), а также если сталелитейная промышленность будет вынуждена платить за \$75–100 за тонну CO_2 [6].

Таким образом, концепция водородной энергетики и переход к «зеленеющей» стали являются экологически верными, но, к большому сожалению, экономически невыгодными. Однако перед Россией сейчас не стоит вопрос, развивать низкоуглеродную водородную энергетику или нет. Для большинства экономик мира были установлены цели по достижению углеродной нейтральности. По поручению руководства страны такая же задача была создана в РФ не позднее 2050 года. И только за счет развития и использования зеленых технологий и малоэмиссионной водородной энергетики это достижимо.

Библиографический список

1. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р.В. Радченко, А.С. Мокрушин, В.В. Тюльпа. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 229 с.

2. Применение водорода в промышленности [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.oxumat.ru/primenenie/primenenie-vodoroda-v-promyshlennosti>.

3. Водородная энергетика: новый уровень [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://research.spbstu.ru>.

4. Водородная концепция России [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://globalenergyprize.org/ru/2021/08/11/vodorodnaya-konceptsiya-rossii/> свободный (дата обращения: 13.10.22).

5. Водородная энергетика [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://aquaecology.group/otrasli/energetika/vodorodnaya-energetika/> свободный (дата обращения: 13.10.22).

6. Как зеленилась сталь [Электронный ресурс]: сайт. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/5065597> / свободный (дата обращения: 13.10.22).

УДК 662.772

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ АССОРТИМЕНТА И КАЧЕСТВА УГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ УГЛЕЙ

Мурко В.И.¹, Карпенюк В.И.¹, Темлянцева Е.Н.¹, Аникин А.Е.²

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, sib_eco@mail.ru, vkarpenok@mail.ru,
Elena.temlyantseva@yandex.ru*

²*ООО «КМК-Энерджи», г. Новокузнецк, Россия, anikin1985@rambler.ru*

***Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментальных исследований Центра инновационных угольных технологий СибГИУ по получению дефицитного вида углеродной продукции - термоантрацита из различных марок углей, а также получение товарной продукции из отходов обогащения и сжигания углей. Для более широкого использования угля в энергетике и расширения его применения как источника химических продуктов перспективно энерготехнологическое использование угольного сырья, в котором основную роль играет его термообработка.*

***Ключевые слова:** уголь, антрацит, термоантрацит, термообработка, чистые угольные технологии.*

TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF INCREASING THE RANGE AND QUALITY OF COAL PRODUCTS BY HEAT TREATMENT OF COALS

Murko V.I.¹, Karpenok V.I.¹, Temlyantseva E.N.¹, Anikin A.E.²

¹*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, sib_eco@mail.ru,
vkarpenok@mail.ru, Elena.temlyantseva@yandex.ru*

Annotation. The article presents the results of experimental studies of the Center for Innovative Coal Technologies of SibGIU to obtain a scarce type of carbon products - thermal anthracite from various brands of coal, as well as waste from coal enrichment and combustion. To increase the use of coal in the energy sector and expand its use as a source of chemical products, the energy-technological use of coal raw materials, in which its heat treatment plays a major role, is promising.

Keywords: coal, anthracite, thermal anthracite, heat treatment, clean coal technologies.

Введение

В структуре мирового потребления топливно-энергетических ресурсов доля угля составляет 29 %. Он занимает второе место в мире после нефти, на долю которой приходится 33 %. В перспективе доля угля в мировом топливном балансе будет сокращаться примерно до 25 %. Однако в 2021 году, по данным Международного энергетического агентства (МЭА), выработка электроэнергии с применением угля в мире выросла почти на 9 %. При этом выработка газовой генерации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) росла значительно медленнее: на 2,1 и 6,2 % соответственно.

В Кузбассе основным теплоэнергетическим ресурсом является уголь, добыча которого в бассейне составляет около 250 млн. тонн в год. При этом доля энергетического угля составляет порядка 70 %, а угля коксующихся марок – 30 %. Учитывая мировые тенденции в сокращении углеродного следа при использовании органических топлив, в первую очередь угля, для дальнейшего развития угольной промышленности следует рассматривать применение экологически чистых и эффективных угольных технологий. В первую очередь для увеличения использования угля в энергетике и расширения его применения как источника химических продуктов перспективно энерготехнологическое использование угольного сырья [1], в котором основную роль играет его термообработка.

Состояние вопроса

На рисунке 1 представлена перспективная схема переработки углей на углеперерабатывающих предприятиях с получением как традиционных продуктов (термоантрацит, кокс, смола), так и фактически новых для России продуктов (полукокс, генераторный газ, агломатериалы).

В последние годы в РФ ощущается значительный дефицит углеродистого сырья в стране, что привело к необходимости его импорта и поставках антрацита, в том числе термоантрацита, для нужд электродной, химической промышленности, черной металлургии и др. С 1997 г. Россия начала импортировать антрацит, наращивая с каждым годом объем его ввоза. И это при том, что страна обладает значительными разведанными запасами антрацита, одними из лучших в мире.



Рисунок 1 – Схема переработки углей

Потребность электродных заводов России в антрацитах и термоантрацитах составляет более 110 тыс. т в год и имеет тенденцию увеличения, однако уже в настоящее время существует значительный дефицит термоантрацита (более 20 тыс. т в год).

В ближайшие 10 – 15 лет приоритетами научно-технологического развития Российской Федерации следует считать те направления, которые позволят получить научные и научно-технические результаты и создать технологии, являющиеся основой инновационного развития внутреннего рынка продуктов и услуг, устойчивого положения России на внешнем рынке, и обеспечат развитие угольной промышленности России, в первую очередь в Кузбассе.

В настоящее время производство термоантрацита организовано либо ретортным способом, что сопряжено с малой производительностью и большой энергоемкостью процесса, либо в аппаратах непрерывного действия типа вращающихся печей, применение которых приводит к образованию значительного количества мелочи и пыли. В результате существующие технологии являются энергоемкими и экологически грязными и не позволяют использовать угли других марок, кроме марки «А». Антрацит является основным технологическим сырьем (наполнителем) при производстве таких важнейших видов углеродной продукции, как подовые и боковые блоки для алюминиевых электролизеров, блоки различной конфигурации для футеровки доменных печей, угольные электроды для электротермических процессов получения кремния, ферросплавов, фосфора и других материалов, электродные массы для рудотермических печей с самообжигающимися электродами и др.

Организация производств по переработке антрацитов в угледобываю-

щем регионе, особенно в составе горного предприятия, может, как показывают исследования, за счет повышения рентабельности производства, способствовать преодолению многолетнего кризиса в горнодобывающей отрасли.

Современные требования к углеродной продукции предусматривают термическую обработку антрацита перед его применением в качестве углеродного наполнителя. Традиционными процессами термообработки антрацитов являются: газокальцинирование во вращающейся печи при температуре до 1350 °С и электрокальцинирование в электрокальцинаторе при температуре около 1800 °С.

Известны, также технологии приготовления из антрацитов активных углей. Для получения активных углей термоантрацит обрабатывается перегретым паром. В [2] описаны технологические процессы получения термоантрацита в различных агрегатах (шахтная печь, барабанная вращающаяся печь, электрокальцинатор, печь графитации). Здесь же отмечены особенности и недостатки описанных технологических приемов (процессов, происходящих в различных агрегатах).

В шахтных печах термообработка осуществляется теплом газа, который образуется при сгорании и газификации части антрацита. Угар превышает 20 %. При обработке в барабанной вращающейся печи потери за счет угара и уноса могут достигать 20 %.

Обе вышеуказанные технологии обеспечивают получение достаточно однородного материала, но велики технологические потери.

Электрокальцинатор обеспечивает термообработку при протекании электрического тока по массе загруженного материала. При таком способе обработки к угару относятся только лишь летучие вещества угля. Но и этот агрегат имеет недостатки. За счет неоднородной структуры загруженного материала тепловыделение по объему оказывается неравномерным, и качество продукта соответственно также оказывается неоднородным.

Как видно на рисунке 1, угли коксующихся марок подвергают высокотемпературному пиролизу. Этот процесс реализован в коксовых печах, которые собраны в батареи. Это производство хорошо отлажено. Для каждого коксохимзавода подбирается состав шихты, который обеспечивается выбором поставщиков угля и строго контролируется. При соблюдении всех технологических режимов (состав шихты, технологические регламенты и др.) продукция коксохимзаводов соответствует требованиям потребителей и условиям стандартов и технических условий.

Угли низкой стадии метаморфизма (марок «Б» и «Д») подвергают низкотемпературному пиролизу. В частности угли марки «Д» с нулевым значением параметра Y (толщина пластического слоя) подвергают пиролизу при температуре около 700°С с получением полукокса, смолы и генераторного газа. Полукокс в больших количествах востребован в металлургии, смола является ценным сырьем для химической промышленности, газ используют как топливо (источник энергии) в технологическом процессе пиролиза и для отопления.

Компанией «Карбоника» (г. Красноярск) разработан способ получения

полукокса и генераторного газа, а также созданы аппараты (реакторы) для реализации этого способа. Этот реактор используют для термообработки необогащенных бурых углей. В частности при термообработке бурых углей Канско-Ачинского бассейна был получен полукокс, который использовался как бездымное топливо в бытовых отопительных печах частного сектора [3].

Работа такого аппарата основана на автотермическом протекании реакции частичного сжигания выделяющихся из исходного угля летучих веществ. Созданные «Карбоникой» реакторы являются аппаратами периодического действия. Реакционный объем заполняется углем, закрывается, в верхних слоях, организуется (инициируется) горение, снизу организуется воздушное дутье. Воздух перемещается снизу вверх, фронт горения - сверху вниз. От фронта горения нагреваются нижележащие слои угля, из них выделяются летучие, которые загораются. За счет горения летучих происходит прогрев угля. При этом угольные частицы, прогреваясь не загораются, так как окислитель (кислород) «сработался» при горении летучих.

В 2001 году «Карбоникой» было введено в эксплуатацию в г. Красноярске опытно-промышленное производство буроугольного полукокса из Канско-Ачинских углей производительностью 33 тыс. т/год по исходному углю (10 тыс. тонн по полукоксу). Полукокс из бурого угля Канско-Ачинского бассейна был получен со следующими характеристиками.

Таблица 1 - Характеристика полукокса из Канско-Ачинского угля

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Ед-ца изм.	Значение
1	Низшая теплота сгорания	Q_h^p	ккал/кг	6500÷7200
2	Зольность	A^d	%	8÷15
3	Выход летучих	V^{daf}	%	5÷15
4	Влажность	W_t^r	%	1÷2

Результаты исследований

Центром инновационных угольных технологий СибГИУ были проведены экспериментальные исследования с различными марками углей, а также отходами обогащения и сжигания углей с целью получения угольных продуктов более высокого качества путем их термической обработки.

Первая серия экспериментов была проведена по высокотемпературной термообработке антрацита марки «А» компании «Сибирский антрацит».

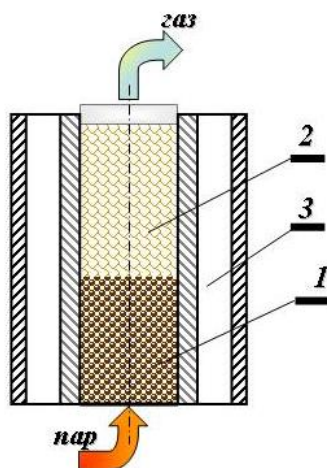
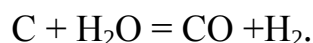
Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

Установка представляет собой капсулу цилиндрической формы. В нижней части капсулы смонтировано устройство для ввода пара, в верхней – устройство для отвода газов.

Методика проведения экспериментов

Капсула загружается слоями инертного материала и дробленого антрацита. Содержимое капсулы греется потоком внешнего тепла, создаваемого соляной горелкой. Температура в нагревательном канале поддерживается на уровне 1300÷1350°C. После того, как в центре капсулы, заполненной инертным материалом и антрацитом, температура достигает 1050÷1150°C, в

капсулу из внешнего парогенератора подается насыщенный водяной пар. Необходимый перегрев пара осуществляется при прохождении пара через слой прогретого инертного материала. Перегретый до температуры более 1000 °С пар поступает в область, занятую нагретым антрацитом (1050÷1150 °С). При взаимодействии водяного пара с раскаленным углеродом происходит эндотермическая реакция:



1 – слой инертного материала;
2 – слой антрацита; 3 – нагревательный канал

Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Из-за эндотермичности реакции и ограниченный запас тепла в инертном слое происходит выравнивание температур (охлаждение) термоантрацита и слоя инертного материала.

Результаты экспериментов

В результате такой обработки свойства антрацита существенно изменяются, что видно из таблицы 2.

Таблица 2 – Характеристика исходного и термообработанного антрацита

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Ед-ца изм.	Значение показателя	
				исходный антрацит	термообработанный антрацит
1	Влага рабочая	W_t^r	%	5,7	0,4
2	Зольность	A^d	%	5,3	7,8
3	Выход летучих	V^{daf}	%	4,0	1,4
4	Содержание углерода	C_f^d	%	90,9	91,4

Как видно из таблицы 2, в процессе термообработки практически на порядок снизилась влажность антрацита и в три раза сократился выход летучих веществ. При этом, на два с половиной процента увеличилась зольность

и на полпроцента повысилось содержание углерода. При соответствующей настройке режимных параметров таким путем можно получать активированный уголь или термоантрацит.

Вторая серия экспериментов была проведена по термообработке углей низкой стадии метаморфизма. Для исследований использовались угли разрезов «Чулым-уголь», Хакасия (бурый уголь марки Б2) и «Задубровский», Кузбасс (каменный уголь марки Д). Крупность угля предварительно отобранных проб марки Б2 составляла 0-250 мм, а угля марки Д 0-300 мм. Отбор проб угля, определение гранулометрического состава, зольности и влажности определялся по ГОСТам: 10742-71, 33814-2016.

Указанные пробы угля были раздроблены в молотковой дробилке. После дробления верхняя крупность угля снизилась до 25 мм. Дробленный уголь был подвергнут ситовому анализу с определением зольности и влажности каждого класса крупности.

В таблицах 3 и 4 представлены результаты ситового анализа и определения зольности.

Таблица 3 - Гранулометрический состав и зольность бурого угля

Классы крупности, мм.	Показатели			
	выход, %			зольность по классам, %
	по классам	сверху	снизу	
13,0-25,0	14,8	14,8	100,0	8,5
6,0-13,0	29,9	44,7	85,2	8,4
3,0-6,0	23,1	67,8	55,3	7,3
1,0-3,0	16,4	84,2	32,2	9,3
0,5-1,0	6,2	90,4	15,8	9,7
0-0,5	9,6	100,0	9,6	11,2
Итого	100,0			8,7

Таблица 4 - Гранулометрический состав и зольность каменного угля

Классы крупности, мм.	Показатели			
	выход, %			зольность по классам, %
	по классам	сверху	снизу	
13,0-25,0	16,3	16,3	100	6,9
6,0-13,0	21,4	37,7	83,7	7,7
3,0-6,0	19,3	57	62,7	7,9
1,0-3,0	15,5	72,5	43	11,0
0,5-1,0	11,3	83,8	27,7	15,4
0-0,5	16,2	100,0	16,2	16,3
Итого	100,0			10,4

Для проведения экспериментов была разработана газогенераторная установка непрерывного действия, в которой производится воздушная или паровоздушная газификация твердого топлива с получением генераторного газа и твердого остатка (полукокса, угольного сорбента или шлака). Газогенераторная установка

нератор разработан и введен в эксплуатацию ООО НПЦ «Сибэкотехника», СибГИУ при творческом содействии и материальной помощи Ю.С. Щапова. На рисунке 3 представлена схема устройства созданного газогенератора.

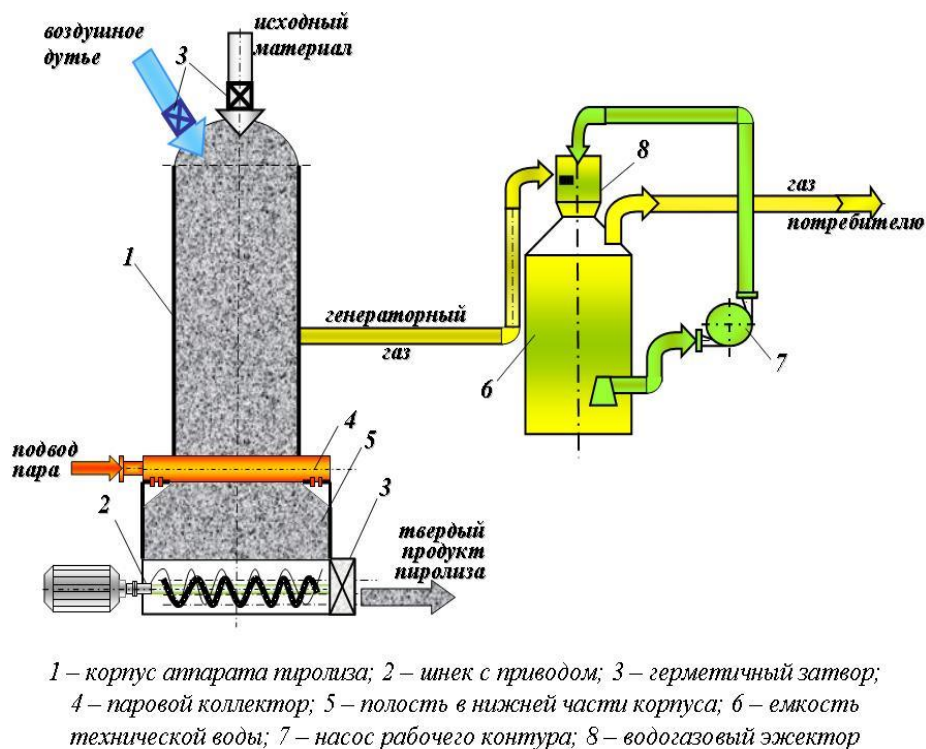


Рисунок 3 - Схема газогенератора непрерывного действия

Преимуществами предложенного газогенератора по сравнению с существующими аналогами являются:

- осуществление процесса газификации угля и получения генераторного газа в непрерывном режиме;
- использование водогазового эжектора для удаления генераторного газа из зоны газификации;
- равномерный подвод пара в зону газификации.

Использование водогазового эжектора позволяет не только отбирать генераторный газ, но и концентрировать водосмоляную жидкость с дальнейшим направлением ее на очистку или переработку.

В процессе проведения экспериментов были получены материалы со следующими характеристиками.

Таблица 5 – Характеристики полукокса и генераторного газа

№ п/п	Наименование параметра	Наименование продукта			
		Твердый продукт		Газообразный продукт	
		марка «Б»	марка «Д»	марка «Б»	марка «Д»
1.	Влажность, %	4,6/33,2*	5,6/6,5*		
2.	Зольность, %	13,7/7,6*	15,3/10,4*		

Продолжение таблицы 5

№ п/п	Наименование параметра	Наименование продукта			
		Твердый продукт		Газообразный продукт	
		марка «Б»	марка «Д»	марка «Б»	марка «Д»
3.	Выход летучих на сухое беззолное состояние, V^{daf} , %	14,1/48,1*	нет данных		
4.	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	21,5/14,3*	26,7/27,9*	2,5/5,9**	3,0
5.	Содержание газов, об. %:				
6.	метан, CH_4			1,56/1,4**	4,04
7.	диоксид углерода, CO_2			19,56/9,12**	13,67
8.	водород, H_2			15,1/13,59**	13,76
9.	кислород, O_2			0,65/2,96**	0,94
10.	азот, N_2			52,25/53,0**	60,42
11.	окись углерода, CO			5,68/19,75**	6,37
* исходный уголь; ** при паровоздушной газификации.					

Третья серия экспериментов была проведена с целью возможности использования отходов углеобогащения и золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей.

Использование вышеуказанных отходов предлагается осуществить путем приготовления на их основе аглопоритовых материалов (аглощебень, аглопесок и др.). Учитывая значительную потребность данных материалов в строительной и других отраслях народного хозяйства, данная технология может найти практическое применение.

Для производства аглопоритовых материалов предлагается использовать автотермический способ обработки исходного сырья с применением агломашин ленточного типа.

Для оценки возможности получения аглопоритовых материалов на основе шихты высокозольных материалов (порода и зола-уноса) путем автотермического способа были проведены исследования на специально изготовленном реакторе цилиндрического типа. Породные пробы измельчались и смешивались с золой-уноса, которая представляет собой мелкодисперсный материал. Полученная смесь гранулировалась и загружалась в реактор. В реакторе было организовано горение и дутье, таким образом, что продувка воздухом осуществлялась в направлении распространения фронта горения. В реакторе было организовано течение воздуха сквозь засыпку из гранул и инициировано горение с поверхности слоя материала. При распространении горения в направлении фильтрации воздуха наблюдался перенос тепла вниз по потоку из зоны горения. Перед зоной горения распространялась зона про-

грева. При повышении температуры в зоне прогрева до значений, достаточных для протекания реакции горения. Лимитирующей стадией для процесса горения являлось поступление окислителя (кислорода).

В экспериментах были реализованы различные режимы протекания реакций. При ограниченном разогреве наблюдалось снижение содержания углерода до значений $0,4 \div 0,5$ % при исходном содержании углерода более 3 %. При повышенном разогреве получался существенно проплавленный материал с содержанием углерода свыше 1,5 %.

Как показали расчеты, температура в слое возрастает на $180-200^{\circ}\text{C}$ при реагировании одного процента углерода, содержащегося в материале. Таким образом, предварительный прогрев поверхности слоя материала до $900-1000^{\circ}\text{C}$ позволяет, используя автотермический способ агломерации, получить в обрабатываемой массе температуру до $1080-1200^{\circ}\text{C}$, при которой происходит спекание минеральных частиц.

На рисунке 4 представлено фото термически обработанного материала в реакторе.



Рисунок 4 - Фото термически обработанного в реакторе материала

Как видно из рисунка, на сломе видны как отдельные спекшиеся гранулы, так и область проплавленного материала.

Выводы

1. Предложена перспективная схема термической обработки углей различной степени метаморфизма: антрацитов, длиннопламенных, бурых, а также продуктов их переработки: отходов обогащения и золы.

2. Проведены эксперименты по термообработке антрацита ретортным методом и газификации углей низкой стадии метаморфизма на лабораторных образцах газификаторов проточного типа с получением термоантрацита, полукокса и генераторного газа.

3. Показана возможность реализации автотермического режима тер-

мообработки материалов с малым содержанием углерода с получением материалов, подобных аглопоритовым.

Библиографический список

1. Школлер М.Б. Современные энерготехнологические процессы. Учебное пособие. – Новокузнецк, 2011. 235 с.
2. Скрипченко Г. Б., Селезнёв А. Н., Пирогов В. И. Структура и свойства термоантрацитов, полученных в промышленных условиях. Химия твердого топлива, 2010, № 6, С. 11-16
3. Степанов С.Г., Михалев И.О., Евтушенко Е.М., Логинов Д.А., Деменчук С.В. Бездымное бытовое топливо: опыт применения в Красноярске. Уголь, 2020, №12, С. 56-62
4. Мурко В.И., Черникова О.П., Сентюрев С.А., Амлин М.С. Обоснование технологических решений энергогенерации путем переработки низкосортных углей на площадке разреза. В сборнике: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Новокузнецк, 2021. С. 166-174

УДК 620.9

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**Грибкова Е.О., Водолеев А.С., Гибадуллин Р.М., Конаков С.В.,
Корнилов Д.А., Макшанов Д.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, gribkovaelizaveta1@gmail.com*

***Аннотация.** В данной работе освещены вопросы современного состояния сферы возобновляемых источников энергии в России, и сделан акцент на экологических вопросах в этой сфере. Показано, что развитие технологий ВИЭ может выступить источником формирования низкоуглеродной («зеленой») экономики, характеризующейся высокой технологичностью, энергетической независимостью и минимальным воздействием на окружающую среду.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, зеленая энергетика, экология, альтернативная энергетика.*

RENEWABLE ENERGY SOURCES: PROBLEMS AND PROSPECTS

**Gribkova E.O., Vodoleev A.S., Gibadullin R.M., Konakov S.V.,
Kornilov D.A., Makshanov D.V.**

*Siberian state industrial university,
Novokuznetsk, Russia, gribkovaelizaveta1@gmail.com*

Abstract. *This paper highlights the issues of the current state of the renewable energy sector in Russia, and focuses on environmental issues in this area. It is shown that the development of renewable energy technologies can be a source of formation of a low-carbon ("green") economy characterized by high technological efficiency, energy independence and minimal impact on the environment.*

Keywords: *renewable energy sources, green energy, ecology, alternative energy.*

Возобновляемая энергия – это энергия, получаемая из природных источников, которая пополняется со скоростью, превышающей скорость ее потребления. Примерами таких постоянно пополняемых природных источников являются солнечный свет и ветер. Возобновляемые источники способны обеспечить огромным количеством энергии и окружают нас во многих областях жизни [1].

В противоположность им ископаемые виды топлива – уголь, нефть и газ – являются невозобновляемыми ресурсами, на формирование которых уходят сотни миллионов лет. При сжигании ископаемых видов топлива для производства энергии происходят выбросы вредных парниковых газов, таких как углекислый газ, метан и др.

Получение энергии из возобновляемых источников сопряжено с гораздо меньшими выбросами CO₂, чем сжигание ископаемого топлива. Переход от ископаемых видов топлива, на которые в настоящее время приходится львиная доля выбросов, к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) имеет ключевое значение для преодоления климатического кризиса.

На сегодняшний день возобновляемые источники энергии являются наиболее приемлемой альтернативой в большинстве стран и создают в три раза больше рабочих мест, чем ископаемые виды топлива.

Возобновляемыми источниками энергии являются:

1. *Солнечная энергия* – самая богатая из всех энергетических ресурсов и может использоваться даже в пасмурную погоду. Скорость, с которой солнечная энергия улавливается Землей, примерно в 10 тыс. раз превышает скорость, с которой человечество потребляет энергию.

2. *Энергия ветра.* Хотя средняя скорость ветра сильно варьируется в зависимости от местности, мировой технический потенциал ветроэнергетики превышает мировой объем производства электричества, а большинство регионов мира располагают достаточными возможностями для создания значительного количества ветроэлектростанций.

3. *Геотермальная энергия* использует доступную тепловую энергию недр Земли. Тепло получают из геотермальных резервуаров посредством бурения скважин или иными способами. Технология производства электроэнергии из гидротермальных резервуаров является отработанной и надежной и применяется уже более 100 лет.

4. *Гидроэнергия.* В настоящее время гидроэнергетика является крупнейшим источником возобновляемой энергии в электроэнергетическом секторе.

5. *Энергия океана.* Для получения энергии океана применяются техно-

логии, основанные на использовании кинетической и тепловой энергии морской воды – например, волн или течений – в целях производства электричества или тепла.

6. *Биоэнергия* – энергия, которую получают из разных органических материалов, называемых биомассой, таких как древесина, древесный уголь, навоз и другие органические удобрения, применяемые для производства тепла и электроэнергии, и сельскохозяйственные культуры, применяемые для производства жидких видов биотоплива [2].

Зеленая энергетика – сектор энергетики, использующий возобновляемые источники энергии: солнечный свет, водные потоки, ветер, приливы, геотермальную теплоту.

Такая энергетика называется также возобновляемой или регенеративной.

Сегодня зеленая энергетика является важным принципом развития многих промышленных компаний.

Кроме неисчерпаемости и экологичности, у ВИЭ есть еще один плюс – низкая стоимость. Единственный минус ВЭИ – нестабильность и зависимость от погодных условий. Чтобы компенсировать простои в ветреные и пасмурные дни, электрокомпаниям приходится восполнять нехватку энергии традиционными ресурсами и даже работать в убыток.

За последние несколько лет мощности ВИЭ (солнечная и ветровая энергетика) выросли в 21 раз, что объясняется развитием технологий, которые обеспечивают удешевление производства электроэнергии, и повышенным вниманием к вопросам экологии во многих государствах мира. По прогнозам специалистов данной области к 2050 году солнечная и ветряная энергетика будут совместно вырабатывать около половины используемого в мире электричества – 22 % будет произведено солнечными электростанциями, а 26 % – ветряными.

Россия также стремится к переходу на использование альтернативных источников энергии. Так, например, большим КПД обладают ветроустановки, расположенные в предгорных и горных районах Кавказа, Алтая, Урала. Специалисты рассматривают возможность возведения крупных ветропарков на побережьях Каспийского и Азовского морей, на юге. Камчатки и полуострове Кольском. Мощнейшие действующие ветропарки локализуются в Крыму, республике Башкортостан, Калининградской области и на Камчатке.

Малые водные потоки также хранят в себе энергию. Во многих частях России (на Кавказе, например) на горных реках были возведены небольшие ГЭС. Энергия горячих подземных вод развивается динамично. По общим данным, на территории России имеется 56 месторождений термальных вод, 20 из которых используются в промышленных целях. Все термальные ЭС расположены в зоне Камчатки и Курильских островов.

Огромные площадки, «усеянные» солнечными батареями, расположены в Крыму, республике Башкортостан, в Алтайском крае. Именно в этих районах гелиоэнергетика даёт самые большие доходы.

Применение ВИЭ в Кузбассе. В связи с глобальным изменением климата применение возобновляемых источников энергии становится более ак-

туальным. Во многих странах мира, в том числе и в России уже давно существует тренд на декарбонизацию – сокращение промышленного применения нефти, газа, угля.

Россия обладает достаточно хорошим экономическим потенциалом по возобновляемым источникам энергии [3]. Потенциал и его распределение по соседним для Кузбасса регионам России представлен в таблица 1.

Таблица 1 – Экономический потенциал по ВИЭ

Регионы	Биомасса	Солнечная энергия	Ветровая энергия	Геотермальная энергия
Урал	8,4	0,20	1,33	0,5
Западная Сибирь	3,9	0,59	3,53	35,0
Восточная Сибирь	2,4	1,03	3,74	1,0
Дальний Восток	2,2	1,58	6,7	40,0
Всего	13,9	2,81	15,3	76,5

Данные таблицы показывают, что Западная Сибирь обладает достаточно высоким экономическим потенциалом для развития ВИЭ.

Территория Кемеровской области – 95 725 квадратных километров и является самой густонаселенной в Сибири и азиатской части России. Плотность населения составляет 27, 76 человек на квадратный километр. Однако в области имеется достаточное количество территорий с низкой плотность населения [3].

Малонаселенные и отдаленные от развитой централизованной сети пункты Кузбасса находятся в труднодоступных местах и совпадают с потенциальной зоной местного наличия возобновляемой энергетики.

Электроснабжение данных территорий осуществляется децентрализованно. В большинстве случаев они получают электроэнергию от автономных дизельных генераторов небольшой мощности. Минусом такой централизации являются затраты на транспорт и потери энергии при транспортировке и передаче на расстояния. Кроме этого, к недостаточной надежности энерго-снабжения и высоким финансовым затратам приводит эксплуатация морально и физически устаревших автономных энергоисточников, их низкая экономичность (доходы не покрывают расходы). Устаревшее и изношенное оборудование, трудности доставки (горючее доставляется вертолётами) доводят стоимость киловатта электроэнергии до 80 рублей. Прокладывание электросетей к таким поселкам материально и финансово затратно (более 600 млн. рублей) [4].

Эти обстоятельства делают возобновляемые источники энергии одним из перспективных видов ресурсов. Максимальное применение данных источников и будет являться главным путём повышения их энергообеспечения.

Исходя из геологических и климатических условий, приемлемыми источниками возобновляемой энергии для Кузбасского региона являются

- гидроэнергетика;
- ветроэнергетика;
- солнечная энергетика;
- биоэнергетика.

Применение установок микрогидроэлектростанций в Кемеровской области может быть актуальным для развития различных сфер туризма, животноводства и сельского хозяйства. Наиболее подходящим для этого является горный рельеф восточной и южной частей области.

В летний период необходимо использовать установки небольшой мощности, до 10 кВт, позволяющие с наименьшими финансовыми затратами производить их установку и обслуживание. Сдерживающим фактором в гидроэнергетике являются ледостав рек (до семи месяцев в году), что практически исключает круглогодичное использование микроГЭС.

Солнечные источники энергии в Кузбассе применяются в основном для местных нужд, энергообеспечения частного сектора. В Единую энергетическую систему России включены всего 2 солнечные электростанции Сибири. Первую солнечную электростанцию мощностью 70 киловатт в Кузбассе ввели в эксплуатацию в 2015 году в поселке Эльбеца, расположенном в семидесяти километрах от Таштагола. За техническое состояние 84 российских литийионных элементов, накапливающих солнечную энергию, отвечают жители.

Согласно статистическим данным в Горной Шории имеется четыре десятка таежных поселков, которые удалены от магистральных энергосетей, газопроводов и путей доставки каменного угля, как основного источника топлива. По данным Энергостата, лишь в 16 поселках Таштагольского района имеются дизельные генераторы, которые вырабатывают энергию по 3 часа в сутки. В создавшихся условиях перспективным направлением будет развитие децентрализованной генерации с использованием возобновляемых источников электроэнергии [5].

Конечно, такие проекты следует решать на региональном уровне, так как это требует поддержки государства, для того чтобы обеспечивать энергоснабжение в конкретной децентрализованной зоне. Богатый опыт использования солнечной энергии накоплен в близлежащих регионах: Алтайском крае, Новосибирской области, Забайкалье. По мнению ученых и специалистов, локальное использование солнечной энергии приемлемо для Кузбасса. В ближайшем будущем планируется построить солнечные электростанции в 4 поселках Таштагольского района, не имеющих пока стационарных электростанций [6].

Другое важное направление возобновляемых источников энергии – ветроэнергетика. Решающим фактором для установки ветроэнергостанции является среднегодовая скорость ветра.

Таблица 2 – Среднегодовая скорость ветра в отдельных населенных пунктах Кузбасса

Населенный пункт Кемеровской области	Юрга Ново-вокуз-нецк	Тайга Ти-суль	Тя-жин	Яя Ма-риинс-к	Топ-ки	Бело-во Кисе-левск	Ке-ме-рово	Меж-дуре-ченск Таш-тагол	Усть-Кабы-рза
Среднего-довая ско-рость ветра, м/с	3,6	3,3	3,2	3,1	3	2,8	2,7	1,3	0,8

Таким образом, Белово, Киселевск, Кемерово, Междуреченск, Усть-Кабырза – относятся к бесперспективным районам для использования ветровой энергии, так как имеют среднегодовую скорость ветра менее 3 м/с. Населенные пункты: Яя, Тайга, Мариинск, Тяжин, Тисуль, Юрга, расположенные в северной части области, являются районами с малоперспективными условиями (среднегодовая скорость 3,0–3,5 м/с).

Решить эту проблему в настоящее время возможно, так как появились современные установки, работающие при малых скоростях ветра. Недостатком работы ветровой станции является невозможность точного прогноза количества полученной энергии, напрямую зависящего от наличия, скорости и силы ветра. Решение данной проблемы – использование гибридных ветро-солнечных систем. Это обеспечит более стабильное энергообеспечение. Таким образом, крупномасштабное применение ветровой электрической энергии нецелесообразно на территории Кемеровской области.

Кемеровская область имеет возможность широкого использования биоэнергетических ресурсов: регион обладает большими лесными запасами, занимающими около 2/3 всей площади. Можно предположить, современные технологии переработки древесных отходов представляют коммерческий интерес. Для этих целей должны использоваться отходы этого деревообрабатывающего производства, они составляют в среднем около 25 % от переработанной древесины и могут использоваться для производства топливных брикетов и древесных гранул. Такой опыт в Кузбассе имеется, хотя и этот ресурс активно не используется. В поселке Калары Таштагольского района в 2014 году открылся завод по производству топливных гранул – пеллет. Их производство первой в Кузбассе освоила местная компания как альтернативное топливо, производимое из опилок. Инвестиционный проект по производству пеллет был включен в перечень приоритетных региональных проектов нашей области. Это направление может обеспечить не только полную безотходность лесозаготовительного производства, но и решение некоторых важных задач: санитарная очистка леса, наличие экологически чистого топлива. Для Таштагольского района, горнолыжного комплекса

«Шерегеш», пеллеты – это современное решение его дальнейшего энергообеспечения.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что идеального источника энергии нет. Фактором, сдерживающим темпы внедрения возобновляемых источников не только у нас, но и во всем мире, являются технико-экономические проблемы, которые, как отмечалось ранее, существуют при любом производстве энергии (рисунок 1) [7].



Рисунок 1 - Проблемы внедрения ВИЭ

Сегодня в индустриальной энергетике Кемеровской области предпочтение отдается невозобновляемым энергетическим ресурсам. Это объяснимо. После открытия в Кузнецком бассейне каменного угля он стал основным источником тепловой, а впоследствии и электрической энергии. 60% российского угля добывается в Кузбассе, следовательно, потребность в электроэнергии покрывается за счет собственной регенерации, поэтому Кузбасская энергетика по-прежнему остается инертной.

Задача поиска альтернативной энергии в Кузбассе пока не является первостепенной, пока энергетические компании применяют возобновляемые источники энергии не активно. Проблемные моменты, которые необходимо будет учитывать при внедрении различных видов возобновляемой энергии в Кузбассе, заключаются в следующем.

1. Пропаганда и реклама возобновляемой энергетики как альтернативной, так как слабая осведомленность населения о достоинствах применения ВИЭ, не способствует появлению спроса на данные услуги, материалы и оборудование.

2. Вопросы материально - технического и кадрового обеспечения, которые возникнут с развитием возобновляемой энергетики.

3. Разработка финансово - хозяйственного механизма, развитие государственно – частного партнерства. Мировая практика показывает, что для успешного развития возобновляемой энергетики необходимо государственное стимулирование в виде необходимых подзаконных актов, субсидий на научные разработки, налоговые льготы, предоставления льготных кредитов

на финансирование работы предприятий, использующих энергию возобновляемых источников, и других форм поддержки.

4. Формирование нормативно - правовой и законодательной базы, регламентирующей работу в области возобновляемой энергетики [8].

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в ближайшее время переход на возобновляемые источники энергии в Кузбассе в крупных масштабах не является перспективным, несмотря на то, что правительством Российской Федерации заданы высокие темпы развития в этом направлении. Для Кузбасса ВИЭ пока затратный проект, но крайне необходимый в современных условиях. Внедрение в Кузбассе возобновляемой энергетики – реальная возможность перехода на более высокую ступень энергетической эффективности и безопасности.

Библиографический список

1. Горяев, А.А. Возобновляемые источники энергии: учебно-методическое пособие по решению контрольных задач по дисциплине «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»/ А.А. Горяев [и др.] – Архангельск: Издательство САФУ, 2015. – 100с.

2. Лукутин, Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие / Б.В. Лукутин. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008 – 187 с. 3. Альтернативные источники в России: современные реалии и потенциал России [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://www.energya.by/alternativnyie-istochniki-energii-v-rossii-sushhestvuyushhierealii-i-potentsial-razvitiya/>.

3. Общая информация//Администрация Кемеровской области [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://ako.ru/>

4. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области // Научная электронная библиотека «Киберленинка» [Электронный ресурс] //– Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vetroenergeticheskogo-potentsialakemerovskoy-oblasti>.

5. Аверьянов, В.К. Эффективность энергоснабжения населенных пунктов при использовании возобновляемых источников [Электронный ресурс] // Аверьянов В.К. [и др.] – Режим доступа: <http://lib.usue.ru/resource/free/12/s429.pdf>.

6. Капица П. Л. Доклад «Энергия и физика» на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР. Москва, 8 октября 1975 г. Вестник АН СССР. 1976;(1):34–43.

7. Сидорович В. Мировая энергетическая революция: как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. М.: Альпина Паблишер; 2015. 208 с.

8. Чубайс А. Б. Доклад «Возобновляемая энергетика в России: из прошлого в будущее» на Международном форуме «Российская энергетическая неделя», Москва, 05 октября 2018 г. URL: <http://www.rusnano.com/about/press-centre/first-person/274650>.

РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МЕТАЛЛУРГИИ

Волченкова О.А., Михайличенко Т.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, volga89043765591@mail.ru*

Аннотация. *Представлено описание направлений возможного применения атомной энергетики в металлургической отрасли. Описаны преимущества использования атомной энергетики, проблемы выбора охладителя атомного реактора, технология получения энергии за счет быстрых нейтронов. Строительство атомного реактора нового поколения позволит прийти к «естественной безопасности» получения энергии с помощью атомных электростанций, а также приблизиться к замкнутому циклу в энергетике, полностью исключая вредные выбросы в биосферу.*

Ключевые слова: *атомная металлургия, энергетика, быстрые нейтроны, естественная безопасность, замкнутый цикл, энергоресурсы.*

THE ROLE OF NUCLEAR POWER IN METALLURGY

Volchenkova O.A., Mikhailichenko T.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, volga89043765591@mail.ru*

Abstract. *A description of the directions of possible using of nuclear power in the metallurgical industry is presented. The advantages of using nuclear power, problems of choosing an atomic reactor cooler, the technology of obtaining energy due to fast neutrons are described. The construction of a new generation nuclear reactor will allow us to come to the "natural safety" of energy generation using nuclear power plants, as well as approach a closed cycle in energy, completely eliminating harmful emissions into the biosphere.*

Keywords: *nuclear metallurgy, energy, fast neutrons, natural safety, closed cycle, energy resources.*

Направление в металлургии, использующее производимую в атомных (ядерных) реакторах электрическую, тепловую и радиационную энергию для осуществления и интенсификации химико-технологических процессов, называется атомной металлургией (рисунок 1).

Мирное использование источников ядерной энергии является основой промышленного производства Франции, Японии, Германии и Великобритании, Соединенных Штатов Америки и России. И если две последние страны еще в состоянии заменить ядерные источники энергии на ТЭС, то для Франции, или Японии это исключено. Использование атомной энергии в металлургии – одно из перспективных направлений. Фактическая безграничность сы-

рьевой основы атомной энергетики в сочетании с многократно меньшим экологическим влиянием на окружающую среду (практическое неимение пылевидных выбросов, сернистых и азотистых газов, CO_2 канцерогенных органических веществ и т.д) разрешают рассматривать атомную электростанцию как возможный энергетический узел энерготехнологического комплекса. Увеличение рентабельности энерготехнологических комплексов на базе атомных реакторов может быть достигнуто созданием высокотемпературных реакторов из ТВЭЛов с газовым охлаждением, что позволяет получать наряду с электроэнергией тепло не только низкотемпературное для бытовых нужд, но и достаточное по температуре для использования в металлургии [1].

Вместе с сырьевой задачей приобретает большое значение энергообеспечение металлургических процессов. Существует научное мнение, что «узким местом» металлопроизводства является не природное сырье, а именно энергетическая энергия, направленная на обеспечение общества. Со временем при увеличении производства энергии и совершенствовании химической технологии меняется и представление о природе сырья. Наиболее значимые материалы в большом количестве возможно получить из обыкновенных горных пород. Академик Д.И. Щербаков, например, сделал предложение по металлургии базальтов, при котором экономия остается только при наличии значительного количества дешевой энергии.

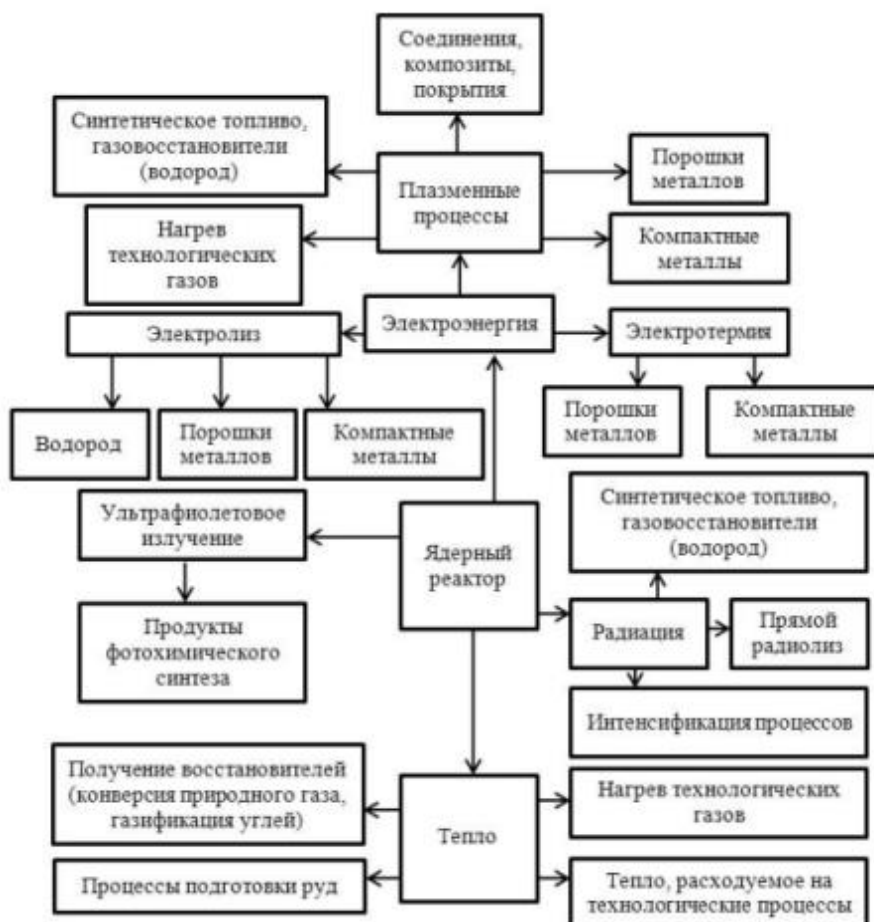


Рисунок 1 – Схема возможных вариантов использования энергии ядерных реакторов в металлургии

На Земле сильно растет потребность в большом количестве энергетических ресурсов, она увеличивается вдвое каждые 8-9 лет. Перспективой ядерной энергетики, у которой есть возможность удовлетворить требования, предъявляемые общим ростом производительных сил, является обеспечение неисчерпаемыми источниками энергии.

Преобразование тепловой энергии в электрическую, а затем обратно электрической в тепловую энергию в производстве металла приводит к потерям более половины первичной энергии. Это объясняет тенденцию прямо использовать энергию, выделяемую в ядерном реакторе, в ее изначальном виде. Преградой является то, что в газоохлаждаемом реакторе можно рассчитывать на температуру охладителя только в диапазоне от 500°C до 750°C, а это значительно ограничивает его использование в металлургической отрасли. Для восстановления железа температура газа требуется не ниже 1000°C.

В Германии был испытан небольшой экспериментальный реактор, в котором для охлаждения использовался гелий с давлением 3-4 МПа, а температура охладителя достигалась до 850°C. Была даже получена кратковременная предельная температура охладителя 1000°C, и есть вероятность, что можно ее поднять до 1200°C и даже до температур, выше температуры плавления чугуна и стали [2].

Теплоту охлаждающего газа реактора в металлургии можно применять для получения восстановительной газовой смеси с помощью газификации твердого топлива или изменения состава природного газа или жидкого топлива, а также в качестве источника тепла для производства окатышей, губчатого железа, агломерации руд, подогрева воздуха, обогащенного кислородом, для доменных печей. Электроэнергию, которая вырабатывается в реакторе, можно применять в электропечном производстве ферросплавов или в производстве стали из губчатого железа, в производстве кислорода и восстановителей.

В России, Германии, Японии и Англии (промышленно развитых странах) рассматривают два основных технологических комплекса с использованием ЯЭУ в разработанных проектах: доменная печь – конвертор; установка прямого восстановления железа – электропечь.

В одном из вариантов компоновки ядерного реактора с доменной печью для приготовления восстановительного газа рекомендуется применять доменный газ, который попадает в теплообменник и нагревается до 1300°C теплом гелия, остужающего ядерный реактор. Охлажденный гелий из теплообменника снова поступает в ядерный реактор, а высокотемпературный доменный газ отправляется в камеру подготовки восстановительного газа. Далее доменный газ проходит через слой некачественного угля. В итоге реакции получается восстановительный газ, который затем вдувается в доменную печь. Считается, что один реактор сможет обеспечить теплом до 3 доменных печей. Электроэнергию, выработанную реактором, можно применять на этом же металлургическом предприятии в прокатном производстве, в электропечах, для производства кислорода. Использование восстановительного газа, нагретого теплом ядерного реактора до высокой температуры, позволит, по предварительным расчетам, вдвое снизить удельный расход

кокса в доменной печи.

Сказанное вполне осуществимо в текущем столетии, а в будущем более вероятно использование атомных электростанций в производстве губчатого железа. При этом установки по производству губчатого железа и выработки электроэнергии, а также ядерный реактор будут представлять собой целостный промышленный комплекс. Температура гелия на выходе из реактора при восстановлении природным газом должна быть 900°C , а с твердым восстановителем, таким как кокс, уголь, бурый уголь - 1200°C . Для нагрева восстановительного газа, конверсии природного газа и производства пара применяется тепло от ядерного реактора. В этих проектах планируется плавить сталь в электропечах с использованием электроэнергии, получаемой в ядерном реакторе [3].

Возможность применения энергии ядерных реакторов в металлургической промышленности является довольно перспективной. Есть различные проекты и предложения, которые связаны с осуществлением данной идеи. В основном рассматриваются варианты применения тепла ядерных реакторов для операций твердофазной регенерации. Существуют предложения по использованию атомной энергии для разложения воды с последующим применением водорода для восстановления железа.

Под атомной металлургией мы считаем не только использование тепла ядерного реактора. Будущий атомно-металлургический комплекс мыслится как нечто современное во всех своих частях.

Современная технология получения черных металлов требует постоянных высоких температур: выплавка чугуна – 1600°C , нагрев – 1400°C , термическая обработка проката – 1250°C .

Такая температура присутствует только внутри активной зоны. Перенос тепла в зону, где относительно спокойно, требует специальных условий. Поэтому для прямого использования ядерных реакторов требуются металлические теплообменники из жаропрочных коррозионностойких сплавов, потому что им необходимо выдерживать одновременное воздействие больших механических нагрузок, радиации и высокой температуры. Следовательно, использование атомной энергии повлечет за собой коренное изменение всей технологии черной металлургии.

Существует иной путь – преобразование атомной энергии в электрическую, но все-таки основной путь развития черной металлургии с помощью атомной энергии другой. Необходимо изменить технологический цикл, что будет означать переход на прямое восстановление железа.

В настоящее время существует три принципиально различных типа технологических процессов такого рода с использованием ядерной энергии.

Первый это высокотемпературное восстановление. Процесс происходит при температуре 1600 градусов. Так как ядерные реакторы такой температуры не дают, то основным блоком является струйно-плазменный реактор, использующий ядерную энергию для генерации плазмы.

Восстановительный газ – водород, смешанный или без посторонних примесей, плавит железо и его сплавы, восстанавливает, и в виде распыле-

ния жидких капель металл поступает в плавильную печь, где проводятся операции легирования.

Существует схема среднетемпературного восстановления, когда процесс протекает при температуре 900 градусов. Восстановителем является водород либо в чистом виде, либо с примесью монооксида углерода. Железо находится в твердом состоянии, образуя при восстановлении своего рода губку.

Прием позволяет использовать АЭС совсем без переходных процессов. Большая часть восстановительного газа нагревается в теплообменнике ядерного реактора. Однако там низкая температура. Такой «холодный» газ можно смешать с более горячим, подогретым за счет электроэнергии ядерного реактора. Получается вполне пригодная по технологии смесь. Наконец, при низкотемпературной рекуперации тепло снабжается ядерным реактором. Можно предположить, что ядерная энергия здесь используется в чистом виде.

Это три типа технологических процессов, которые, по мнению многих специалистов, имеют право на существование.

Конечным продуктом во всех трех типах является железо, вода и углекислый газ, а воду можно далее снова применять для производства водорода и кислорода. Таким образом, есть реальные возможности реализовать замкнутый цикл извлечения железа, создать безотходное производство.

В России существует схема ядерно-металлургического комплекса (ЯМК). Как показали предварительные расчеты, применение тепла ядерных реакторов непосредственно для регенерации более эффективно, чем использование этого тепла на стадии получения восстановительных газов.

Разработанная схема ЯМК предусматривает: непрерывность процесса, высокую производительность агрегата, рециркуляцию восстановительных газов, так как агрегаты устанавливаются в непосредственной близости от ядерных реакторов. В качестве теплоносителя был выбран гелий из реакторной установки. Восстановитель представляет собой природный газ, преобразуемый теплом гелия, нагретого в ядерном реакторе.

Согласно схеме, железорудные материалы должны поступать в шахтную печь, где при температуре около 850 °С произойдет восстановление железа. Произведенный продукт предусмотрено использовать в качестве шихтового материала в сталеплавильных печах. По схеме ЯМК отходящие из шахтной печи газы должны очищаться от H_2O и CO_2 и многократно использоваться.

Несмотря на встретившиеся трудности, комплексное исследование проблемы использования ядерной энергетической установки в черной металлургии указывает, что разработка и увеличение видов технологии, которые могут быть переведены на ядерную энергию, являются одним из важнейших направлений научно-технического прогресса в металлургии на долгосрочную перспективу [4].

Летом 2021 года в сибирском городе Северск началось строительство свинцового атомного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300. Он станет одним из трех элементов проекта Росатома «Прорыв», который уже к концу десятилетия должен продемонстрировать то, о чем ядерщики мечтали с середины прошлого века, — возможность замыкания топливного цикла.

БРЕСТ (Быстрый Реактор Естественной безопасности или Быстрый Реактор Естественной безопасности со Свинцовым Теплоносителем) должен обладать свойствами «естественной безопасности»: — исключение аварий, требующих эвакуации (выселения населения), а также выводящих из хозяйственного использования значительные территории, за счёт конструктивных методов:

- абсолютное применение энергетического потенциала добываемого сырья;
- радиационно-эквивалентное обращение ядерных материалов в топливном цикле с сохранением природного радиационного баланса;
- технологическое усиление режима нераспространения ядерного оружия за счет исключения наработки и выделения в топливном цикле чистых U-235 и Pu оружейного качества, а также постепенного отказа от использования в ядерной энергетике технологий разделения (обогащения) изотопов урана;
- обеспечение конкурентоспособности ядерной энергетики по сравнению с другими видами энергогенерации.

Быстрые нейтроны. Работающий на АЭС уран-235, распадаясь, выбрасывает большое количество высокоэнергетических быстрых нейтронов. Они попадают в толщу воды, куда погружены топливные сборки. Жидкость замедляет нейтроны, позволяя тем взаимодействовать с новыми ядрами урана-235 и вовлекать их в цепную реакцию. Но большая доля выделяемой при делении энергии уходит на нагревание воды, которая играет еще и роль теплоносителя: отводит энергию, превращается в пар и вращает турбину электрогенератора. Водо-водяные реакторы – самые распространенные в мире, но для работы с плутонием они малопригодны. Такому топливу требуются быстрые нейтроны, а не замедленные тепловые, и это уже совсем другой уровень.

У быстрых нейтронов энергии гораздо больше, чем у тепловых. Это предъявляет совершенно иные требования к рабочей температуре, конструкционным материалам и теплоносителю [5].

Жидкий свинец. Использовать в реакторе в качестве теплоносителя воду, которая замедляет быстрые нейтроны, нельзя. Необходим другой материал, имеющий возможность обеспечить съем тепла, но не поглощающий высокоэнергетические частицы, позволяя тем самым продолжить цепь ядерных реакций. За последние десятилетия ученые испытали множество аналогов воды, включая жидкие литий, калий и даже ртуть. Лучшее из всех зарекомендовал себя свинец: температура его плавления составляет около 330 °С, а кипения – почти 1750 °С. Это обеспечивает очень широкий диапазон рабочих температур – от границы, начиная с которой свинец становится жидкостью, и до границы, за которой он закипит, сделавшись практически непригодным для охлаждения. Именно этим была вызвана авария на АЭС «Фукусима-1». Из-за остановки генераторов остановились насосы, которые качали теплоноситель; отвод тепла прекратился, вода закипела, произошел взрыв и расплавление активной зоны реактора. Для свинца с его очень высокой температурой кипения такое невозможно.

Свинец позволяет удерживать внутри корпуса практически любые процессы, связанные с локальным выделением большого количества тепла, а если аварии избежать невозможно, свинец сам по себе превратится в тяжелый

"саркофаг" для реактора и обеспечит его защиту. Известно, что свинец — прекрасный материал для экранирования радиации, включая гамма-лучи и нейтронное излучение.

БРЕСТ — прототип реактора на быстрых нейтронах БР-1200 также со свинцовым теплоносителем, который, в свою очередь, станет основой коммерческого энергоблока большой электрической мощности порядка 1200 МВт.

Сегодня Россия первой построила и ввела в эксплуатацию атомные энергоблоки с реакторами поколения 3+, и уже ведется работа по освоению технологий установок четвертого поколения.

Но дело не только в цифровом обозначении — с четвертым поколением ядерных энерготехнологий термин "реактор" заменяется более корректным словом "система", что включает в себя как непосредственно сам реактор, так и переработку (рециклирование) его ядерного топлива.

Согласно свежим условиям мирового атомного сообщества, подобные системы обязаны обладать более высокими рабочими показателями, чем предыдущие поколения, в области обеспечения стабильного развития, конкурентоспособности с иными вариантами генерации, безопасности и надежности, а также защиты от распространения, оправдывая применение в их отношении формулирования "технологический прорыв".

Сейчас развитие атомной энергетики в мире во многом еще сдерживается боязнью аварий, связанных с выбросами радиоактивных веществ. А различные комплексы безопасности, которыми обустроены современные энергоблоки, существенно увеличивают стоимость АЭС. И противоречивые требования экономики и безопасности полностью удовлетворить было бы нереально, если бы не реакторы на быстрых нейтронах с их уникальными ядерно-физическими свойствами (сейчас вся мировая атомная энергетика построена на реакторах на так называемых тепловых нейтронах, и только в России на Белоярской АЭС эксплуатируются два "быстрых" энергетических реактора).

Российским специалистам удалось показать, что можно так спроектировать ядерные реакторы на быстрых нейтронах, что их безопасность будет основываться на законах природы, а не на создании дополнительных инженерных барьеров и увеличении персонала. Это и есть принцип естественной безопасности, который лег в основу концепции БРЕСТа. Его конструкция исключает так называемый разгон на мгновенных нейтронах, ставший причиной аварии в Чернобыле. На БРЕСТе невозможен и фукусимский сценарий с потерей теплоносителя.

Что касается решения сырьевых задач атомной энергетики, то здесь не используется уран-235, которого в природном менее одного процента. А сочетание свойств плотного нитридного уран-плутониевого ядерного топлива и свинцового теплоносителя дает возможность работать БРЕСТу в так называемом равновесном топливном режиме: когда ядерного "горючего", плутония, нарабатывается столько, сколько "сгорает". Он в составе отработавшего ядерного топлива идет для изготовления новых партий свежего топлива для БРЕСТа, извне подпитываемых только отвальным (обедненным) ураном-238,

и так по кругу. Цикл замыкается.

Экологическая безопасность достигается использованием специфических технологий регенерации и переработки отработавшего горючего реактора, заключающихся в его обработке от продуктов деления, смешение к очищенной смеси обедненного урана при изготовлении нового топлива. В результате так называемые минорные актиниды, наиболее опасные радиоактивные вещества, в составе регенерированного топлива возвращаются в реактор, где происходит их "пережигание". Дополнительно также решается задача использования урана-238, который накапливается в результате обогащения природного урана для нужд современной атомной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах [6].

Оставшиеся выделенные продукты деления (радиоактивные отходы) направляются на длительную контролируемую выдержку в специальных хранилищах с последующим перемещением их в устойчивые композиции для окончательного захоронения без нарушения природного радиационного баланса Земли.

Укрепление режима нераспространения в рамках концепции реактора достигается тем, что в нем отсутствует "лишний" плутоний, годный для военных целей. В БРЕСТе нет и уранового blankets – зоны, в которой под действием нейтронов уран превращался бы в высококачественный оружейный плутоний. Более того, технологии переработки топлива без выделения радиоактивного металла делают конечный продукт полностью непригодным в качестве начинки для ядерных зарядов. Дополнительно, при получении топлива не требуется обогащать уран, что также исключает риски с точки зрения нераспространения.

Преимущества атомной энергетики. Потребление энергоресурсов в мире растет намного быстрее, чем ее производство, а промышленное использование новых современных технологий в энергетике по весомым причинам начнется не раньше 2030 года. Все острее выходит на первый план проблема нехватки ископаемых энергоресурсов. Возможности строительства новых гидроэлектростанций очень ограничены. Не следует забывать и о борьбе с парниковым эффектом, накладывающей ограничения на сжигание нефти, газа и угля на тепловых электроцентралях.

Решением проблемы является интенсивное развитие ядерной энергетики. На данный момент в мире обозначилось направление, получившее название «ядерный ренессанс». На эту тенденцию не смогла повлиять даже авария на АЭС «Фукусима». Даже самые сдержанные прогнозы МАГАТЭ говорят, что к 2030 году в мире может быть построено до 600 новых энергоблоков (сейчас их насчитывается более 444). На увеличении роли ядерной энергетики в мировой энергетике могут сказаться такие факторы, как надежность, низкий уровень финансовых вложений по сравнению с другими отраслями энергетики, сравнительно небольшой объем отходов, доступность ресурсов.

Если кратко сформулировать, плюсы ядерной энергетики, то получается следующий список:

Неисчерпаемая энергоемкость используемого топлива. Один килограмм урана, обогащенный до 4 %, при полном выгорании выдает энергию, равную сжиганию примерно 100 тонн высококачественного каменного угля или 60 тонн нефти.

Возможность повторного использования топлива (после регенерации). Расщепляющийся материал (уран-235) может быть использован снова (в отличие от золы и шлаков органического топлива). С развитием технологии реакторов на быстрых нейтронах в перспективе возможен переход на замкнутый топливный цикл, что приведет к полному исключению отходов.

Ядерная энергетика не создает парниковый эффект. Ежегодно атомные станции в Европе позволяют избежать выбросов 700 миллионов тонн углекислого газа. Действующие АЭС России каждый год предотвращают выброс в атмосферу более 210 млн. тонн углекислого газа. Таким образом, быстрое развитие ядерной энергетики является одним из методов борьбы с глобальным потеплением.

В атомной энергетике отсутствуют недостатки, имеющиеся у так называемых альтернативных источников энергии. Так, затраты на производство солнечной батареи выше всех доходов от получаемой с ее помощью энергии. А ветряные электростанции имеют невысокую мощность, дороговизну и экологические ограничения. Их установка сильно изменяет рельеф местности, а инфразвуковой шум, который они производят, опасен для людей и животных, поэтому ветряки не могут быть расположены возле населенных пунктов [7].

Четвертый энергоблок Белоярской АЭС впервые был выведен на 100%-й уровень мощности в конце сентября 2022 года. В нем находится реактор БН-800, который теперь будет работать на инновационном МОКС-топливе. Как сообщил Росатом, «это важный шаг в выстраивании двухкомпонентной атомной энергетики с замыканием ядерного топливного цикла». Таким образом, Россия теперь на пороге создания вечного ядерного реактора.

С помощью применения МОКС-топлива возможно в десятки раз увеличить количество топлива для атомной энергетики. А главное — в реакторе БН-800 можно повторно, после соответствующей переработки, использовать облученное ядерное топливо других АЭС [8].

Развитие этого научно-технологического направления позволит удовлетворить постоянно растущий спрос на источники энергии в мире, а также решить возникающие проблемы в сфере энергетике: уменьшение дешевых запасов традиционных углеводородов, ужесточение требований к безопасности и экологичности энергетических систем.

Библиографический список

1. Атомная металлургия. Электронный ресурс — [Режим доступа]: <https://helpiks.org/6-72116.html/> (Дата обращения 20.09.2022).
2. Новое слово в энергетике: зачем России нужен атомный реактор с замыканием топливного цикла. Электронный ресурс — [Режим доступа]: <https://www.techinsider.ru/technologies/800463-novoe-slovo-v-energetike->

zachem-rossii-nuzhen-atomnyy-reaktor-s-zamykaniem-toplivnogo-cikla/ (Дата обращения 17.09.2022).

3. "Росатом" начал строить уникальный реактор БРЕСТ в Томской области. Электронный ресурс – [Режим доступа]: <https://habr.com/ru/company/macloud/blog/563830/?ysclid=l82hqwcqda616141421> (Дата обращения 18.09.2022).

4. Реактор БРЕСТ-300 и замкнутый цикл в ядерной энергетике. Электронный ресурс – [Режим доступа]: <https://ria.ru/20210608/energoblok-1736090576.html?ysdesp=l82hl4d9y7591821665/> (Дата обращения 18.09.2022)

5. Роль ядерной энергетике в современном мире. Безопасность и стоимость. Электронный ресурс – [Режим доступа]: https://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/ (Дата обращения 16.09.2022).

6. Атомная» («ядерная») металлургия. Электронный ресурс – [Режим доступа]: https://studopedia.ru/12_63710_atomnaya-yadernaya-metallurgiya.html/ (Дата обращения 14.09.2022).

7. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика. Электронный ресурс – [Режим доступа]: <https://sudact.ru/law/prognoz-dolgosrochnogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiia-rossiiskoi-federatsii-na/prognoz/2/2.2/prognoznye-znachenii-obemov-rynkov-po/energoeffektivnost-energoberezhenie-iadernaia-energetika/?ysclid=l82gkwvdv0425752062/> (Дата обращения 25.09.2022).

8. Аргументы и Факты. «Сделали то, что не успели в СССР». В России запущен вечный ядерный реактор. Электронный ресурс – [Режим доступа]: https://aif.ru/society/science/sdelali_to_chno_ne_uspeli_v_rossii_zapushchen_vechnyy_yadernyy_reaktor (Дата обращения 20.10.2022).

УДК 669. 1. 054. 83

ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАМОВ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К АГЛОШИХТЕ

Урусов Д.Н., Михайличенко Т.А.

***Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, Urusov.1975@mail.ru***

Аннотация. В данной статье содержится материал о технологии использования шламов. Подробно рассмотрено использование шламов на разных металлургических комбинатах. Описан перечень основного технологического оборудования для производства техногенного железоконцентрата. Представлена схема процесса переработки отходов шламонакопителя. Разработана технологическая схема переработки отходов, накопленных в теле шламонакопителя.

Ключевые слова: шламы, доменное производство, аглошихта, агло-

TECHNOLOGIES FOR THE USE OF SLUDGE AS AN ADDITIVE TO SINTER

Urusov D.N., Mikhailichenko T.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, Urusov.1975@mail.ru*

Abstract. *This article contains material about the technology of using sludge. The use of slurries at various metallurgical plants is considered in more detail. The list of the main technological equipment for the production of technogenic iron concentrate is described, the scheme of the process of processing sludge accumulator waste is presented. A technological scheme for processing waste accumulated in the body of the sludge accumulator has been developed.*

Keywords: *Sludge, blast furnace production, sinter, sinter factories, sludge accumulator, charge.*

Основными характеристиками шламов являются химический и гранулометрический состав, однако при подготовке шламов к утилизации необходимо знать такие параметры, как плотность, влажность. Шламы пылеулавливающих устройств доменной печи образуются при очистке газов, выходящих из нее, обычно в скрубберах или трубах Вентури. Перед ними устанавливаются радиальные или тангенциальные сухие пылеуловители, в которых улавливается наиболее крупная, так называемая колошниковая, пыль, которая возвращается в аглопроизводство как компонент шихты. Химический состав шламов по основным компонентам, %: Feобщ от 30 % до 50 %, CaO от 5,0 % до 8,5 %, SiO₂ от 6,0 % до 12 %; Al₂O₃ от 1,2 % до 3,0 %; MgO от 1,5% до 2,0 %; P от 0,015 % до 0,05 %; Sобщ от 0,2 % до 0,9 %; Cобщ от 2,5 % до 30,0 %; Zn от 0,05 % до 5,3 %. Плотность их колеблется в пределах от 2,7 до 3,8 г/см³. Коэффициент использования этих шламов изменяется (для разных предприятий) довольно значительно – от 0,1 до 0,8. Это довольно тонкодисперсный материал: фракции размером более 0,063 мм от 10 % до 13 %, фракции размером от 0,016 до 0,032 мм – от 16 % до 50 % и фракции размером < 0,008 мм от 10% до 18 % [1].

Шламы подбункерных помещений доменных печей образуются при гидравлической уборке просыпи с полов подбункерных помещений, их составной частью является также пыль аспирационных установок этих помещений. По химическому составу эти шламы подобны шламам аглофабрик: в них имеются почти все компоненты аглошихты : Feобщ до 35 %; SiO₂ до 11 %; Al₂O₃ до 3 %; CaO до 28 %; MgO до 3 %; MnO до 1,5 %; P₂O₅ до 0,2 %; Sобщ до 0,40 %; Cобщ < 15,0 %; Zn - до 0,02 %.

Шламы подбункерных помещений по гранулометрическому составу являются материалами средней крупности (частиц размером до 0,1 мм содержится от 20 % до 40 %). Плотность шламов подбункерных помещений

колеблется в пределах от 3,5 до 4,5 г/см³.

В целом, шламы, относятся к ценному техногенному сырью. Основным методом использования железосодержащих металлургических шламов (агломерационные, доменные, конвертерные) является их добавка к агломерационной шихте.

Многочисленными исследованиями установлено, что добавка пылей и шламов в количестве от 10 % до 15 % (по массе) шихты (при отсутствии в них вредных веществ) улучшает механическую прочность агломерата, не снижая при этом производительности агломашин[2]. Основными критериями пригодности железосодержащих отходов к применению в аглопроизводстве являются также их сыпучесть, транспортабельность, возможность дозирования и перегрузок в технологическом цикле аглофабрики, способность равномерно распределяться в массе аглошихты.

В Японии на большинстве заводов железосодержащую пыль используют в агломерации [3]. В Аньшане конвертерную пыль используют при производстве агломерата.

Используемая на Челябинском металлургическом комбинате технология переработки шламов доменного и конвертерного производств заключается в следующем: шламы из радиальных отстойников после сгущения до 600 г/л поступают в вакуум - фильтры, а после них (с влажностью 36%) в сушильные барабаны; затем шламы с влажностью 10% подаются на аглофабрику.

Институтом "Уралмеханобр" совместно с Карагандинским металлургическим комбинатом разработана новая технология утилизации железосодержащих шламов в аглопроизводстве. По существующей схеме шламы аглофабрик, подбункерных помещений доменных печей, тракта шихтоподачи дробильно - сортировочной фабрики сгущают и обезвоживают (крупнозернистую фракцию на ленточных, тонкозернистую - на дисковых вакуум - фильтрах). Обезвоженные продукты объединяют и подают в шихтовое отделение аглофабрики. По новой технологии шламы после двустадийного сгущения с содержанием твердого от 40% до 50% подают в распыленном виде в первичные смесители аглошихты вместо технической воды. В результате шлам достаточно равномерно распределяется в объеме аглошихты, а вся шихта увлажняется до необходимого уровня при значительном сокращении расхода технической воды.

В промышленных условиях смесь доменных, агломерационных и конвертерных шламов текущих производств и из накопителей в больших количествах (от 150 до 800 кг/т агломерата) используют на трех аглофабриках Украины [4-6]. На комбинате "Криворожсталь" освоена технология агломерации при удельном расходе шламов от 130 до 150 кг/т агломерата. На аглофабрику, производительность которой составляет 4 млн.т/год, в сутки доставляют до 1000 т шлама с участка подготовки шламов. На участке готовят смесь шламов текущего производства и из накопителей с исходной влажностью от 10 % до 20%. В составе смеси периодически утилизируют известковую пыль газоочисток цеха обжига извести. Соотношение известковая пыль-шлам примерно (от 1,0 до 0,5) - (от 9,0 до 9,5). Однако часто

используют шлам без добавления извести.

На аглофабрике Мариупольского металлургического комбината производительностью 11 млн. т/год используют смесь агломерационных и доменных шламов из хранилища влажностью от 10% до 16%. На площадке открытого склада шлам экскаватором смешивают с агломератом в пропорции 1 к (от 0,5 до 1). Такая схема обеспечивает достаточное усреднение с отсевом агломерата и аглорудой, что позволило увеличить расход шлама от 3 до 200 кг/т агломерата, в отдельные периоды до 400 кг/т агломерата.

На аглофабрике Енакиевского металлургического завода производительностью 3 млн. т/год используют смесь шламов доменного и конвертерного производств из накопителя. Влажность шлама от 14% до 19%. Шлам доставляют на заводской перегрузочный узел, а затем на рудный двор, где укладывают непосредственно в штабель железорудного концентрата. Туда же подают известь. Ежесуточно используют от 800 до 1500 т шлама. Исследованы показатели агломерации при расходе шлама от 30 до 800 кг/т агломерата. На основании лабораторных и промышленных опытов сделан вывод о возможности применения шлама в количестве до 250 кг/т агломерата без существенных ухудшений показателей агломерации.

На Орско-Халиловском металлургическом комбинате доменные железосодержащие шламы перерабатываются во вращающейся печи с получением окускованного материала, который пригоден для использования в доменной шихте. Основной агрегат - обжиговая печь с противоточным движением газов, в которую исходный материал с влажностью от 30% до 70 % поступает через разбрызгивающие форсунки. При работе вращающейся печи происходит повышенный вынос пыли (до 20 %), которая улавливается в газоочистке и возвращается на спекание. Содержание Fe(общ) в спеченном продукте составляет 55,9 %.

На зарубежных предприятиях железосодержащие отходы перерабатываются большей частью в аглопроизводстве, а также в доменном производстве в подготовленном виде, главным образом, в виде безобжиговых окатышей или брикетов [7]. Для возврата отходов в агломерацию получают окатыши небольшого размера диаметром до 3 мм. В качестве связующего используют, главным образом, известь с получением окатышей влажностью от 7 % до 12 %.

Автором работы [8] на основании результатов проведенных исследований разработана технологическая схема переработки отходов, накопленных в теле шламонакопителя, включающая предварительные стадии сухой магнитной сепарации и магнетизирующего обжига для отходов углеобогащения, измельчение до крупности менее 1 мм и мокрую магнитную сепарацию для всех видов отходов (рисунок 1). В таблице 1 представлены перечень и технические характеристики оборудования для реализации предложенной технологической схемы.

Основная масса получаемого при обогащении отходов шламонакопителя техногенного железоконцентрата может быть использована в агломерационном производстве. Ограничением может являться лишь содержание

цинка и свинца, которые могут превышать допустимые значения в железосшлаках.

Особенностью шламов доменных газоочисток является повышенное содержание в них цинка. Повышенное содержание цинка в исходном сырье приводит к снижению стойкости футеровки, к образованию настывлей в доменной печи и разрушению агломерата, из-за чего резко ухудшаются газодинамические условия доменного процесса, и уменьшается производительность доменных печей. При утилизации таких пылей присадкой их в агломерационную шихту происходит накопление цинка в получаемом агломерате.

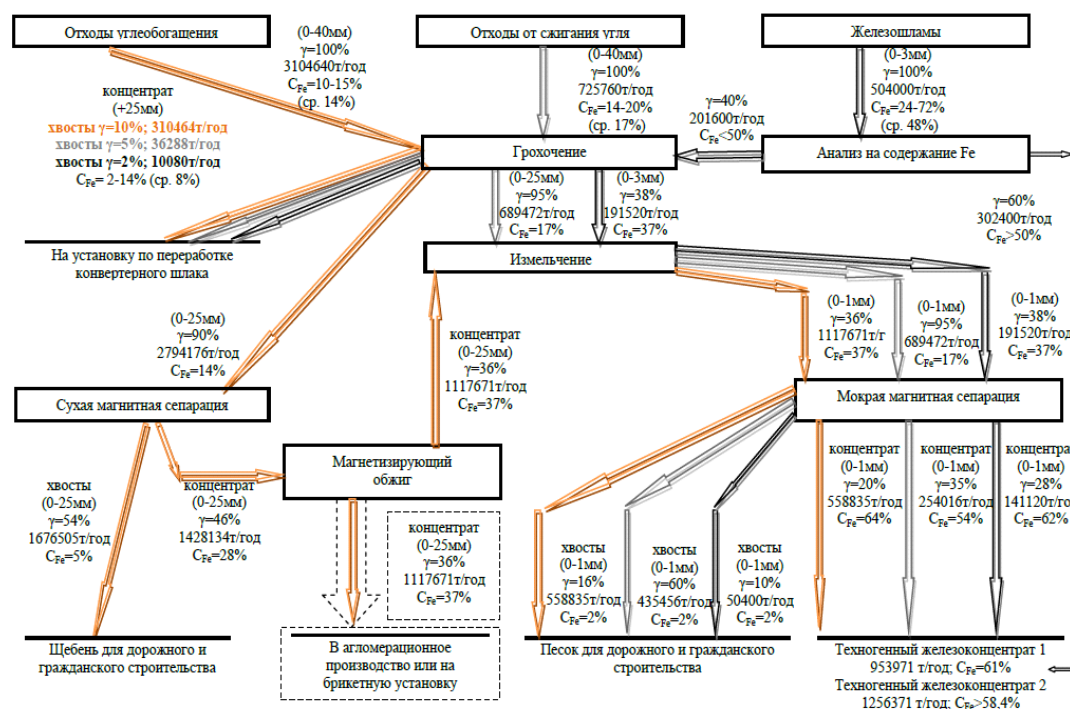


Рисунок 1– Схема процесса переработки отходов шламонакопителя

Таблица 1 – Перечень основного технологического оборудования для реализации технологии производства техногенного железоконцентрата из отходов шламонакопителя

Наименование оборудования	Производительность, т/ч
Грохот ГИТ-51М, УГМК «Рудгормаш»	1000
Сухой магнитный барабанный сепаратор 2ПБС-90/250А, ЗАО «Горные машины»	800
Вращающаяся печь для обжига JOYAL, ООО «Шанхайская машиностроительная компания «Ciros»	333
Мельница стержневая МВ3040, ООО «Шанхайская машиностроительная компания «Ciros»	206
Мокрый магнитный барабанный сепаратор ПБМ-ПП-150/200, ООО НПК «ИНТТЕХТЭКС»	200-275
Вакуумный дисковый фильтр ДОО-100-2,5-1У, ЗАО «РГМ-Центр»	150

Вследствие этого при подготовке их к использованию в качестве компонента агломерационной шихты необходимо проводить обесцинкование. Последняя может проводиться пиро- и гидрометаллургическими способами. При содержании в шламах цинка более 12 % они могут использоваться как сырье для его получения. Общая схема переработки шламов доменных газоочисток приведена на рисунке 2.

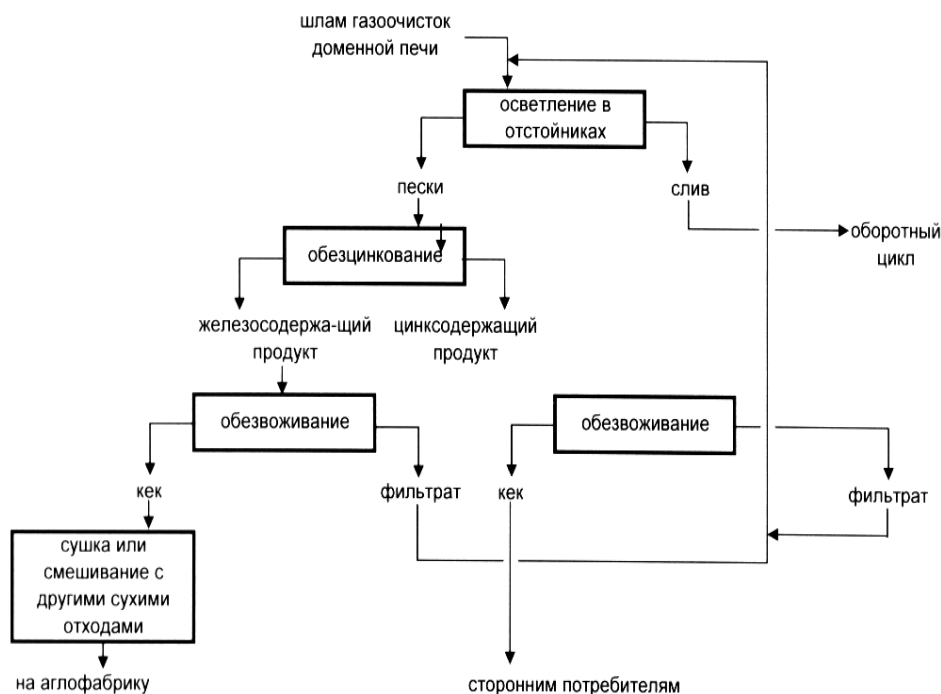


Рисунок 2 – Схема переработки шламов газоочисток доменного производства

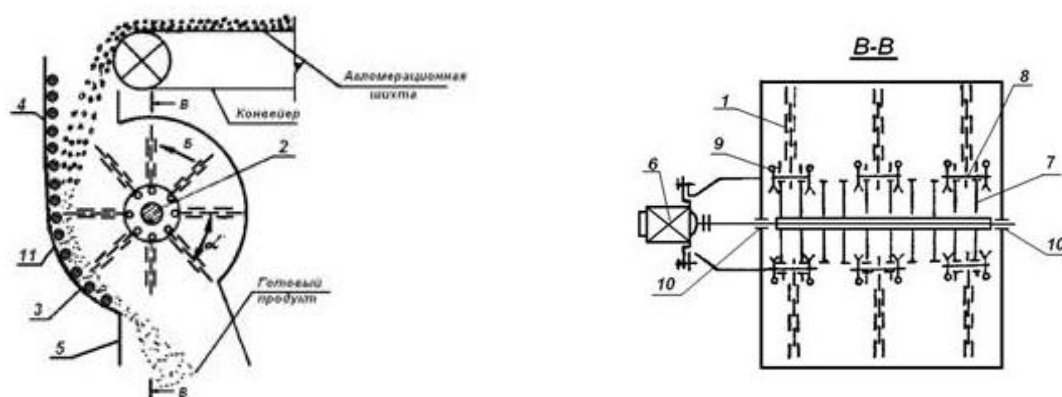
В черной металлургии применяется, в основном, пирометаллургический способ извлечения цинка, основой которого является восстановительный обжиг сырья чаще всего во вращающихся (трубчатых) печах, восстановитель кокс, а в последние годы энергетический уголь. В последние годы на таких установках вместе с вращающейся печью работает устройство типа аглоленты, на которой осуществляются сушка и предварительный нагрев окатышей теплом дыма, уходящего из трубчатой печи решетка – трубчатая печь.

Для повышения эффективности подготовки аглошихт с повышенным содержанием заскладрованных шламов авторами исследования [8] разработана и испытана в промышленных условиях конструкция цепного роторного дезинтегратора-смесителя (рисунок 3). Производительность агрегата составляет до 400 т/ч. Одним из факторов, обуславливающих выбор места установки дезинтегратора-смесителя в технологическом потоке конкретной аглофабрики, является способ ввода извести в аглошихту. При известковании железорудных материалов в штабеле на рудном дворе и подаче известкованного материала для приготовления шихты дезинтегратор-смеситель предлагается устанавливать после приемных бункеров. Это позволит повысить однородность шихты не только за счет равномерного распределения в ней заскладрованных шламов, но и за счет разрушения комьев извести до круп-

ности менее 10 мм и дополнительного перемешивания извести с железорудными материалами.

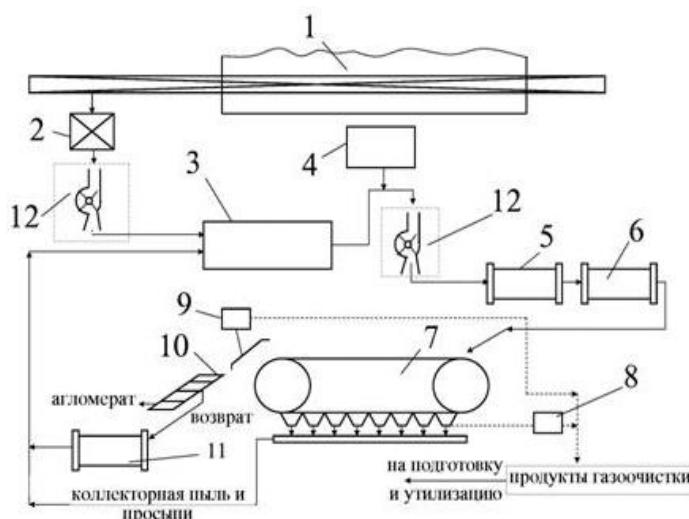
При подаче извести в свежееобожженном (раскаленном) состоянии непосредственно в поток шихты перед смешиванием дезинтегратор-смеситель целесообразно устанавливать после шихтового отделения перед смесительными барабанами. Такой вариант установки даст возможность увеличить поверхность контакта извести с железорудным сырьем и продолжительность самого контакта. В любом случае гомогенизация всей массы аглошихты более предпочтительна.

Схемы установки дезинтегратора-смесителя в технологическом потоке аглофабрик приведены на рисунках 3 и 4.



- 1 – отрезки цепей, 2 – ротор, 3 – горизонтальный цилиндрический корпус,
4 – загрузочный патрубок, 5 – разгрузочный патрубок, 6 – электродвигатель,
7 – диски, 8 – штифты, 9 – шпильки, 10 – подшипниковые опоры,
11 – футеровка корпуса из металлических прутков

Рисунок 3 – Схема цепного роторного дезинтегратора-смесителя



- 1 – рудный двор; 2 – приемные бункера; 3- шихтовое отделение; 4 – корпус обжига извести; 5 – барабан-смеситель; 6 – барабан-окомкователь; 7 – агломашина; 8 – газоочистка зоны спекания; 9 – газоочистка зоны аспирации; 10 – грохот; 11 - барабан-охладитель возврата; 12 – место установки дезинтегратора-смесителя

Рисунок 4 – Схема установки дезинтегратора-смесителя

При повышенном содержании в шихте железорудных концентратов и мелкодисперсных металлургических шламов целесообразно организовать дополнительно их озернение при раздельной шихтоподготовке. Несмотря на большую влажность озерненной смеси, общая влажность аглошихты с использованием этой смеси ниже, что положительно влияет на аглопроцесс. В процессе смешивания и окомковывания озернённой смеси совместно с другими компонентами аглошихты происходит накатывание мелкодисперсных частиц материалов. Аглошихта после окомкования хорошо озернена и имеет более высокую объёмную массу [9]. Спекание такой аглошихты увеличивает производительность агломерационной установки и улучшает качество агломерата. На производительность установки оказывает положительное влияние газопроницаемость шихты и выход агломерата. Улучшение газопроницаемости шихты с использованием озерненной смеси отходов, даже с отсутствием в аглошихте извести (основного интенсификатора аглопроцесса), создаёт предпосылки увеличения высоты спекаемого слоя аглошихты, что в свою очередь будет способствовать улучшению качества агломерата.

При организации дополнительной подготовки аглошихт путем предварительной гомогенизации и озернения содержание отходов как текущего производства, так и заскладированных возможно повысить до 1200 кг/т агломерата. Предлагаемая технология не требует больших инвестиций, а также хорошо вписывается в существующие на аглофабриках схемы подготовки шихты.

Библиографический список

1. Производство офлюсованного агломерата: технологическая инструкция ТИ-899-АФ-02-2015 [Текст]. – Новокузнецк, 2018. – 80 с.
2. Подготовка шихтовых материалов для агломерации: технологическая инструкция ТИ-899-АФ-01-2018 [Текст]. – Новокузнецк, 2020. – 56 с.
3. Зоря В.Н. Исследование техногенных отходов черной металлургии, в том числе отходов от обогащения и сжигания углей, и разработка технологий их переработки: дисс. канд. техн. наук [Текст] / «Сибирский государственный индустриальный университет». – Новокузнецк, 2015. – 207 с.
4. Корж А.Т. Организация подготовки железосодержащих отходов и использование их в производстве агломерата [Текст] / А.Т Корж, Ю.Г. Гердий // Металл и литье Украины. – 1996. – №9-10. – С. 38.
5. Дембицкий Ю.В. Технология использования в аглошихте частично подготовленных шламов металлургического производства [Текст] / Ю.В. Дембицкий, Н.Т. Демура, В.П. Падалка // Металл и литье Украины. – 1997. – № 6-7. – С. 9.
6. Мищенко М.И. Агломерация шихт с высоким содержанием шламов на фабриках Украины [Текст] / М.И Мищенко, Н.С. Хлопонин // Черная металлургия, бюлл. НТИ. – 1998. – Вып. 11-12. – С. 16.
7. Савицкая Л.И. Использование железосодержащих отходов при окусковании руд. Информационный обзор [Текст] / Л.И. Савицкая // БНТИ Черная металлургия. – 1984. – 36 с.
8. Лисин В.С. Ресурсо-экологические проблемы 21 века и металлургия

[Текст]/ В.С. Лисин, Ю.С. Юсфин. – Москва: Высшая школа. – 1998. – 447 с.

9. Голов Г.В. Технология извлечения металла из отвальных шлаков [Текст] / Г.В. Голов, С.М. Ситников, Е.Г. Калимулина // Сталь. – 2001. – №10. – С. 83.

УДК 66.074

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ ЗА ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ТЭЦ ФИЛИАЛА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Големинов С.П., Михайличенко Т.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия, goleminov.serega@yandex.ru*

Аннотация. В работе представлена краткая характеристика Западно-Сибирской ТЭЦ, проанализировано количество выбросов загрязняющих веществ, рассмотрено техническое описание золоулавливающей установки, приведены недостатки существующей системы газоочистки и приведена предлагаемая реконструкция золоулавливающей установки, а так же, описана сущность проблемы повышения экологической безопасности энергетического комплекса.

Ключевые слова: котел, дымовые газы, вредные выбросы, газоочистка, золоуловитель.

RECONSTRUCTION OF THE GAS CLEANING SYSTEM BEHIND THE STEAM GENERATORS OF THE WEST SIBERIAN CHPP BRANCH OF JSC EVRAZ ZSMK BY REPLACING GAS CLEANING EQUIPMENT

Goleminov S.P., Mikhailichenko T.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, goleminov.serega@yandex.ru*

Abstract. *The paper presents a brief description of the West Siberian thermal power Plant, analyzes the amount of pollutant emissions, considers the technical description of the ash-collecting plant, shows the shortcomings of the existing gas purification system and the proposed reconstruction of the ash-collecting plant, as well as describes the essence of the problem of improving the environmental safety of the energy complex.*

Keywords: *boiler, flue gases, harmful emissions, gas cleaning, ash collector.*

Западно-Сибирская ТЭЦ расположена в Кемеровской области на правом берегу реки Томь и предназначена для покрытия базисных нагрузок

Кузбасской энергосистемы. Установленная мощность электростанции 600 МВт.

Выбросы в атмосферу из дымовых труб ТЭЦ составляют: золы 279,32 г/с, SO₂ 483,1 г/с и 485,3 г/с NO_x. Годовой выброс золы от дымовых труб составляет 6178,2 т/год. Выброс по золе в летний период превышает ПДК по золе в 1,56 раза, в зимний период в 1,75 раза. Выбросы по SO₂ и NO_x ПДК не превышают.

На электростанции сооружены две дымовых трубы высотой 100 и 150 метров. В котельном цехе первой очереди установлено шесть котлоагрегатов БКЗ – 210. На каждый котел приходится по четыре мокрых золоуловителя. Мокрые золоуловители работают с недоработкой и поэтому запыленные газы очищаются недостаточно (конечная запыленность газа равна 0,53 г/м³) [1].

Основной целью исследования является увеличение эффективности пылеулавливания золоуловителей. Для этого предлагается сделать реконструкцию золоулавливающей установки, которая заключается в следующем:

- замена золоуловителей типа МВ-УО ОРГРЭС на золоуловители с вертикальными трубами Вентури;
- четыре горизонтальные ТВ с подводящими газоходами должны быть заменены на две круглые вертикальные ТВ;
- схему подвода дымовых газов к скрубберу, одна ТВ к одному скрубберу, заменить на схему – одна ТВ к двум каплеуловителям;
- для орошения трубы Вентури применить центробежно-струйную форсунку;
- на горловине ТВ смонтировать акустическую систему интенсификации золоулавливания.

Тем самым уменьшится запыленность дымовых газов до 0,19 г/м³.

Предлагается два способа по снижению концентрации оксидов азота:

- очистка дымовых газов от оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива,
- очистка дымовых газов от оксидов азота по технологии селективного некаталитического восстановления.

Для более эффективной работы газоочистных установок и для удобства работы котельщиков разработана функциональная схема системы автоматизации, контроля и регистрирования основных технологических параметров процесса газоочистки.

При расчете экономической эффективности природоохранных мероприятий был подсчитан предотвращенный ущерб, который после реконструкции золоулавливающей установки составит 6081,4 тыс.рублей, и дополнительные капитальные затраты, связанные с реконструкцией золоулавливающей установки, составят 6956,16 тыс. руб.. Таким образом срок окупаемости капитальных вложений составит 1,8 года.

На Западно-Сибирской ТЭЦ установлено 11 котельных агрегатов. Они являются основным источником загрязнения атмосферного воздуха,

дымовые газы от которых поступают в атмосферу через 2 источника организованных выбросов – дымовые трубы, а также имеется ряд вспомогательных участков, выбросы вредных веществ от которых попадают в атмосферу как организованным, так и неорганизованным путем. С продуктами сгорания топлива в атмосферу через дымовые трубы ЗС ТЭЦ выбрасываются летучая зола, сернистый ангидрид и диоксид азота [2].

Время работы источников выделения вредных веществ – круглосуточное, непрерывное.

Производственные участки ЗС ТЭЦ, вредные выбросы от которых попадают в атмосферу организованным путем:

- механический участок (металлообрабатывающие и заготовочные станки) и кузница;
- зарядка аккумуляторов в гараже и зарядка аккумуляторных батарей;
- заводка двигателей автотранспортной техники в гараже;
- пропитка обмоток двигателей;
- мазутное хозяйство и маслохозяйство;
- перекачка кислот и щелочей из цистерн;
- автозаправочная станция;
- деревообрабатывающие станки.

Источниками неорганизованных выбросов на ЗС ТЭЦ являются:

- сварочные посты;
- участок по отгрузке сухой золы;
- угольный склад и вагоноопрокидыватель;
- окрасочный участок.

Очистка дымовых газов от золы осуществляется в золоуловителях. В качестве золоуловителей на котлах первой очереди установлены мокрые золоуловители с трубами-коагуляторами Вентури, на котлах второй очереди – электрофильтры [1].

В таблице 1 приведены данные о выбросах в атмосферу из дымовых труб ЗС ТЭЦ.

Таблица 1 - Выбросы загрязняющих веществ за 2003 год

Наименование ингредиентов	Валовые выбросы, т/г
1. Зола твердого топлива	6178,156
2. Зола мазутная	0,141
3. Сернистый ангидрид	10685,406
4. Диоксид азота	9233,842
5. Моноокись азота	1500,502
6. Оксид углерода	618,080
Всего	28240,585
в т.ч. твердые	6178,297
в т.ч. газообразные	22037,83

Из таблицы 1 видно, что с продуктами сгорания топлива в атмосферу выбрасывается повышенное содержание золы твердого топлива, оксидов азота и сернистого ангидрида. Главная задача – снизить концентрацию данных веществ на выходе из дымовой трубы.

Так как присутствует большой расход дымовых газов, то за котлом установлено 4 золоуловителя МВ-УО ОРГРЭС – мокрого типа (ЗУ), предназначенных для чистки от золы уходящих дымовых газов при сжигании твердого топлива [3].

Золоулавливающая установка (ЗУУ) включена параллельно по ходу газа и объединена общей системой орошения, строительными конструкциями и контрольно-измерительными приборами.

Золоуловитель МВ-УО ОРГРЭС представляет собой сочетание двух основных элементов: трубы Вентури (ТВ) и каплеуловителя, последовательно соединенных по ходу очищаемых дымовых газов.

Внутренняя поверхность труб Вентури, входных патрубков и каплеуловителей во избежание эрозионного и коррозионного износа покрыта защитой, выполняемой на базе футеровочной кислотоупорной плитки. Швы между плитками разделяются замазкой арзамит.

Труба Вентури служит для улавливания и коагуляции (укрупнения) золовых частиц и состоит из трех основных частей: конфузора, горловины и диффузора. Труба Вентури, прямоугольного сечения, установлена горизонтально. Для орошения ТВ служит форсуночное устройство, основным элементом которого являются центробежные механические форсунки, установленная перед ТВ [4].

Каплеуловитель служит для выделения из потока дымовых газов капель с осевшими на них золовыми частицами, а также частичного улавливания из газа золовых частиц, не осевших на каплях в ТВ. Каплеуловитель с улиткообразным вводом газа и пленочным орошением внутренней поверхности.

Нижняя часть каплеуловителя заканчивается конусом с гидрозатвором. Гидрозатвор предназначен для непрерывного удаления из каплеуловителя образующейся в нем пульпы и обеспечения при этом воздушной плотности каплеуловителя.

Система орошения золоуловителя служит для бесперебойного питания аппарата необходимым количеством воды, очищенной от механических примесей. Система орошения труб Вентури не имеет индивидуального регулирования расхода воды по трубам Вентури и каплеуловителям. Основные показатели газоочистной установки приведена в таблице 2. Орошение центробежных скрубберов организовано на прямую, без напорного бака. Подводы воды к форсункам ТВ выполнены неразъемными.

Средства измерения служат для обеспечения непрерывного контроля работы и состояния золоуловителя и поддержания оптимального режима его эксплуатации.

Золоулавливание основано на улавливании скоагулированных золовых частиц на каплях орошающей воды, распыленной в ТВ, а также крупнофрак-

ционных несоагули-рованных золовых частиц в каплеуловителе [5].

Таблица 2 - Фактические эксплуатационные показатели работы газоочистной установки типа МВ-УО ОРГРЭС.

Наименование оптимальных параметров	Единица измерения	Показатели работы
1. Производительность по газу на входе на выходе	тыс. м ³ /ч	237,028 237,028
2. Гидравлическое сопротивление	мм.вод.ст	135
3. Температура очищенного газа на входе на выходе	°С °С	176 83
4. Расход воды: на орошение каплеуловителей, на орошение труб Вентури.	м ³ /ч м ³ /ч	14,7 – 15 38 – 42
5. Запыленность газа на входе на выходе	г/м ³ г/м ³	28,94 1,16
6. Степень очистки дымовых газов	%	95,5
7. Степень очистки оксида азота оксида серы	% %	52,3 70,6

Уловленные золовые частицы смываются с внутренней поверхности каплеуловителя орошающей водой в сливной патрубок и через гидрозатвор удаляются в канал гидрозолоудаления. Далее в шандорный приямок, откуда откачивается с помощью 4-ех багерных насосов ГРТ – 1250/71 по трем золопроводам диаметром 530 мм на шламохранилище ЗСМК [6].

В результате эксплуатации газоочистной установки и проведения испытаний было обнаружено:

- частые отложения золы на стенках труб Вентури, что приводит к временному приостановлению газоочистной установки и эколого-экономическому ущербу предприятия;
- большой расход орошающей воды на ТВ;
- концентрация пыли и вредных дымовых газов на выходе из трубы превышает рекомендуемую концентрацию.

Для того чтобы увеличить степень очистки газа от пыли и улучшить эксплуатационные характеристики ЗУУ, предлагается провести реконструкцию золоуловителя [7].

Суть предлагаемой реконструкции заключается в следующем:

1) замена золоуловителей типа МВ-УО ОРГРЭС на золоулавители с вертикальными трубами Вентури:

- четыре горизонтальные ТВ с подводящими газоходами должны быть заменены на две круглые вертикальные ТВ;
- схему подвода дымовых газов к скрубберу, одна ТВ к одному скруб-

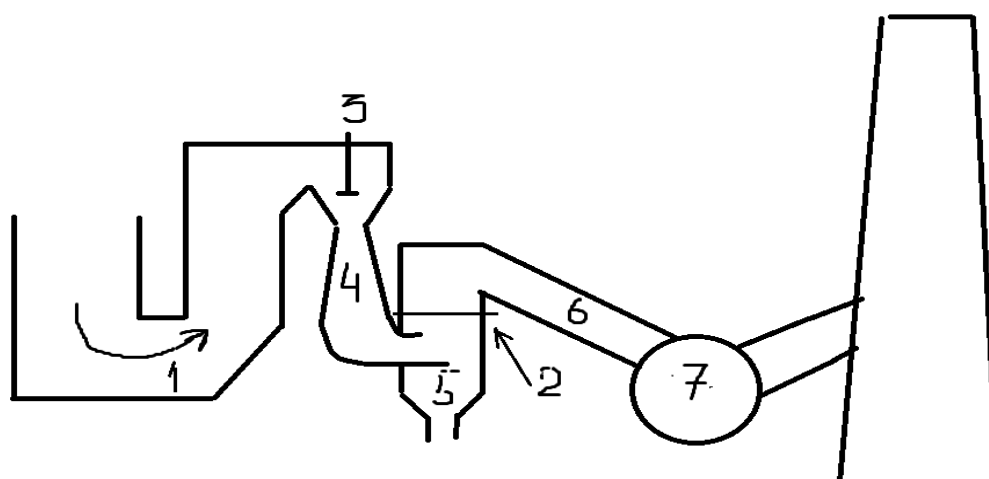
беру, заменить на схему – одна ТВ к двум каплеуловителям;

– для орошения трубы Вентури применить центробежно-струйную форсунку;

2) на горловине ТВ смонтировать акустическую систему интенсификации золоулавливания.

Таким образом, из котла по газоходу дымовые газы поступают в золоулавливающую установку, которая состоит из двух вертикальных труб Вентури круглого сечения и четырех каплеуловителей (разработка Кишневского энергетического института). Одна труба Вентури приходится на два каплеуловителя. За золоулавливающей установкой расположено два дымососа, поэтому вся установка находится под разрежением. По газоходу от дымососа очищенные дымовые газы поступают в боров и далее в дымовую трубу высотой 100 метров, для дальнейшего рассеивания (рисунок 1).

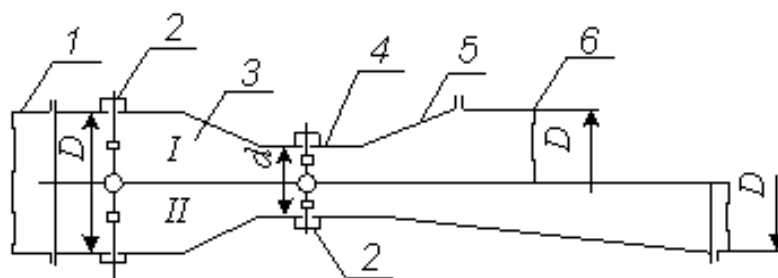
Для орошения каждой трубы Вентури можно применить центробежно-струйную форсунку производительностью 21-16 т/ч, форсунка установлена на расстоянии 800 мм от начала конфузора (в соответствии с результатами математического моделирования Кишневского энергетического института взаимодействия распыливаемой жидкости с газовым потоком во входных патрубках труб Вентури) [8].



1 – подводный газоход; 2 – пояс орошения каплеуловителя; 3 – форсунка орошения труб Вентури; 4 - труба Вентури; 5 – каплеуловитель;
6 – отводящий газоход; 7 – дымосос

Рисунок 1 – Схема золоулавливающей установки

На горловине трубы Вентури смонтирована акустическая система интенсификации золоулавливания. Технология акустической интенсификации базируется на концепции наложения турбулентного и акустического поля на процесс инерционной коагуляции аэрозолей в трубах Вентури. Принципиальная схема трубы Вентури, в которой происходит процесс инерционной коагуляции аэрозолей, приведена на рисунке 2.



1 – Входной патрубок; 2 – кольцевые камеры; 3 – входной конус;
4 – горловина; 5 – выходной конус; 6 – выходной патрубок

Рисунок 2 – Принципиальная схема трубы Вентури, в которой происходит процесс инерционной коагуляции аэрозолей

Рабочим телом аэроакустической системы служит холодный воздух, поданный с напорной части дутьевых вентиляторов котла. Расход воздуха на аэроакустическую систему составляет около $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Технология реализована путем взаимодействия аэроакустических турбулизаторов с основным газопылевым потоком. Принцип действия аэроакустических турбулизаторов основан на явлении возникновения акустического резонанса при протекании воздуха через каналы определенной геометрии.

Газоочистные тракты за котлами объединены в одну систему. Они выходят от шести котлов в два коллектора, которые подведены к железобетонной трубе высотой $H = 100 \text{ м}$ и диаметром устья трубы $d_{\text{уст}} = 7 \text{ м}$ с двух сторон симметрично [8].

На рисунке 3 приведена схема очистки дымовых газов за котлами.

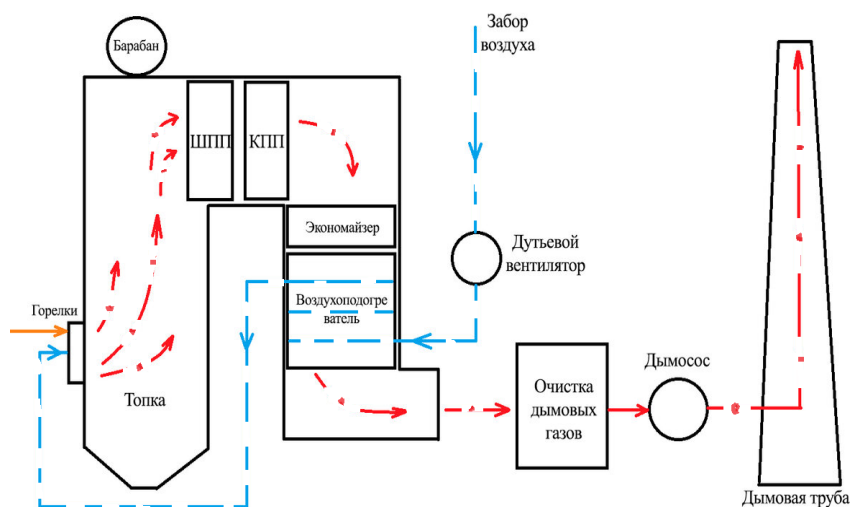


Рисунок 3 – Схема очистки дымовых газов от котлоагрегата
В настоящее время проблемы повышения экологической безопасности

энергетического комплекса выдвинуты в число высших приоритетов Российской Федерации. Поэтому одной из задач является разработка и внедрение новых технологий сжигания твердого топлива не только для вновь проектируемых, но и для действующих электростанций с целью уменьшения негативного влияния на окружающую среду.

Котлы БКЗ-210-140, установленные на 1-ой очереди Западно-Сибирской ТЭЦ, работают с высокими концентрациями вредных веществ в уходящих газах, значительно превышающих существующие нормы [9].

Существенным фактором, влияющим на экологичность и надежность работы указанных котлов является сжигание Кузнецких углей, имеющих высокое содержание связанного азота, что приводит к основному вкладу топливных оксидов азота в суммарный выброс загрязняющих веществ, а также совместное сжигание указанных углей с коксовым и доменным газами сопряжено с большими трудностями, так как возникают проблемы с устойчивостью зажигания факела при резком изменении соотношения топлив при малых нагрузках.

Поэтому, в свете жестких требований природоохранных органов к экологическим параметрам действующего оборудования, предлагается провести реконструкцию котельных агрегатов и газоочистной установки с целью повышения их экологичности и эксплуатационной надежности.

Библиографический список

1. Западно-Сибирская ТЭЦ – 50 лет. Кемерово, 2001. – 185 с.
2. Технический отчет по результатам режимно-наладочных и балансовых испытаний котлоагрегата БКЗ – 210 № 1 Западно-Сибирская ТЭЦ филиал «АО ЕВРАЗ ЗСМК». – Новокузнецк: 2020. – 34 с.
3. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – 2-е изд., перераб. и доп.- Ленинград: Недра, 1988. – 312с.: ил.
4. Приложение к докладу ВИТК: Москва, ГосКомГидромет, 1989.– 25с.
5. Снижение выбросов оксида азота. ВТИ. – М.: 2002
6. Паспорт газопылеулавливающей установки котла №1.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию. – 2-е изд., перераб. и доп./ Под. ред. А.А. Русанова. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
8. Расчетная записка к проекту реконструкции золоуловителей котельного агрегата ст. № 1 на Западно-Сибирской ТЭЦ. 381011.2202.РР. – Кишинев, 1996.- 22 с.
9. Наладка и испытания золоуловителей котлоагрегата № 1 на Западно-Сибирской ТЭЦ: Технический отчет. 381011.2202.ДОТ. – Кишинев, 1996. – 32 с.

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО
ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, pawlowets.victor@yandex.ru*

***Аннотация.** Сформулированы новые возможности применения ресурсо и энергозамещающих материалов в производстве окатышей. Обоснованы принципы принудительного зародышеобразования в технике окомкования и показаны его технологические и ресурсосберегающие возможности. Проанализированы технические показатели новой технологии производства окатышей и физические параметры влажных окатышей и показана ее роль в повышении металлургических свойств окучкованного металлургического сырья. Представлены базовые схемы, отражающие производственные возможности теплосилового напыления влажной шихты на комкуемые материалы и ограждающие поверхности окомкователя. Приведены технологические и структурообразующие возможности базовых схем теплосилового напыления влажной шихты, содержащей минеральные техногенные добавки различного технологического назначения.*

***Ключевые слова:** железорудное сырье, техника и технология окомкования, окучкованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, теплосиловое напыление влажной шихты, технологии ресурсо- и энергосбережения.*

**POSSIBILITIES OF FORCED NUCLEATION IN THE PRODUCTION OF
IRON ORE PELLETS IN RESOURCE SAVING TECHNOLOGIES**

Pavlovets V.M.

*Siberian state industrial University,
Novokuznetsk, Russia, pawlowets.victor@yandex.ru*

***Abstract.** New possibilities of using resource and energy-substituting materials in the production of pellets are formulated. The principles of forced nucleation in the pelletizing technique are substantiated and its technological and resource-saving possibilities are shown. The technical indicators of the new pellet production technology and the physical parameters of wet pellets are analyzed, and its role in improving the metallurgical properties of agglomerated metallurgical raw materials is shown. Basic schemes are presented that reflect the production capabilities of thermal power spraying of wet charge on lumpy materials and enclosing surfaces of the pelletizer. The technological and structure-forming ca-*

pabilities of the basic schemes of thermal power spraying of a wet charge containing mineral technogenic additives for various technological purposes are given.

Keywords: *iron ore raw materials, technique and technology of pelletizing, pelletized metallurgical raw materials, iron ore pellets, thermal power spraying of wet charge, resource and energy saving technologies.*

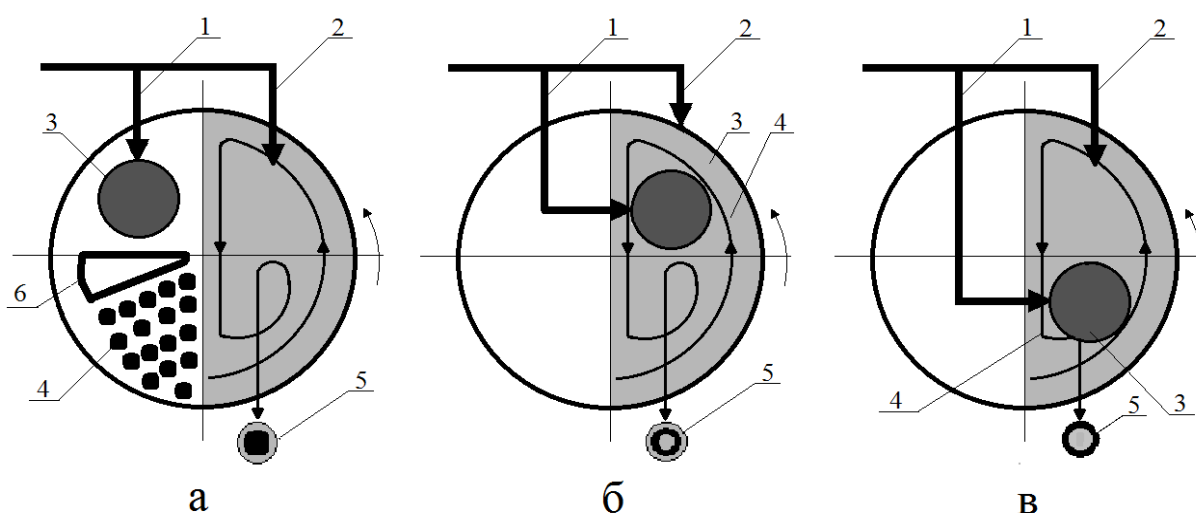
Технологии ресурсо- и энергосбережения, реализуемые в промышленности, в основном опираются на процессы переработки и утилизации промышленных отходов [1-2]. Частичная замена минерального железорудного сырья на железосодержащие отходы металлургического производства (шламы, пыли, просыпи, окалина и др.) позволяет снизить себестоимость первичного металла и металлопродукции. Основным требованием к железосодержащим материалам в производстве железорудных окатышей является регламентированный минеральный состав и предельный размер частиц, который, как правило, не должен превышать 0,1 мм. Введение в шихту материалов с более высокими размерами частиц приводят к нарушению стабильности процесса окомкования [1-2]. Задачей окомкования является получение округлой формы у окатышей и формирование максимально возможной прочности, позволяющей выполнять транспортные операции с влажными окатышами без разрушения. Процесс формообразования влажной шихты в производстве окатышей начинается с зародышеобразования и заканчивается доокомкованием зародышей [3]. В последнее время предложено расширить функциональные возможности участка окомкования с помощью теплосилового напыления влажной шихты на комкуемые материалы и ограждающие поверхности окомкователя, придав ему дополнительные формо- и структурообразующие функции при формировании окатышей [4-7].

Одним из способов производства окатышей с расширенными функциональными возможностями является получение окатышей по двухступенчатой технологии, одна из ступеней которой позволяет формировать значительную часть объема окатышей теплосиловым напылением влажной шихты на стадии окомкования [1-3]. В качестве структуро- и формообразующего энергоносителя в этой технологии используется холодный или нагретый до 100-150 °С сжатый воздух, который позволяет сформировать зародышеобразующий напыленный слой (НС) шихты практически на любой шихтовой или металлической поверхности [8-9]. В технологию производства сырых окатышей на основе теплосилового напыления (Н) шихты включены операции окомкования шихты (О) и доокомкования (Д) зародышей (З). Разработанные процессы легко внедряются на действующем производстве с минимальным уровнем реконструкции, позволяющие при необходимости легко вернуться к традиционной технологии (ЗО), основанной на капельном зародышеобразовании и доокомковании в режиме переката. Техника напыления сжатыми газами широко применяется в различных производственных процессах [2, 3, 8]. Технологии на основе напыления обладают рядом технологических преимуществ и имеют широкий спектр управляющих воздействий, как в самом производстве, так и в процессе улучшения и расширения потребительских

свойств обрабатываемых изделий. Это в полной мере относится к производству окатышей, где использование метода напыления влажной шихты воздушно-шихтовой струей (ВСШ) открывает большие возможности для воздействия на структуру зародышей и окатышей с помощью разнообразных технологических добавок.

Целью работы явился сравнительный анализ технологий теплосилового напыления влажной шихты на комкуемые материалы и ограждающие поверхности окомкователя и применения их в технике ресурсо- и энергосбережения.

Базовые схемы производства окатышей на основе технологий теплосилового напыления влажной шихты на стадии окомкования показаны на рисунке 1. Опытным путем отработаны многочисленные полупромышленные технологии, которые успешно исследованы в лабораторных условиях и показали высокую практическую эффективность.



1, 2 – самостоятельные потоки загружаемой шихты; 3 – напыленный слой (позиция а), область напыления в слое комкуемых материалов (позиции б, в); 4 – зародыши; 5 – годные окатыши ; 6 – делитель НС

Рисунок 1 – Схемы получения окатышей на основе теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж тарельчатого окомкователя (технология ЗНД) – а и комкуемые материалы – б, в (технологии ЗОН, ЗОНД)

Основные технические показатели указанных технологий в сравнении с традиционной технологией (ЗО) приведены в таблице 1 [8-10].

Подавляющее количество технических решений на основе теплосилового метода напыления имеют охранные документы [8-9].

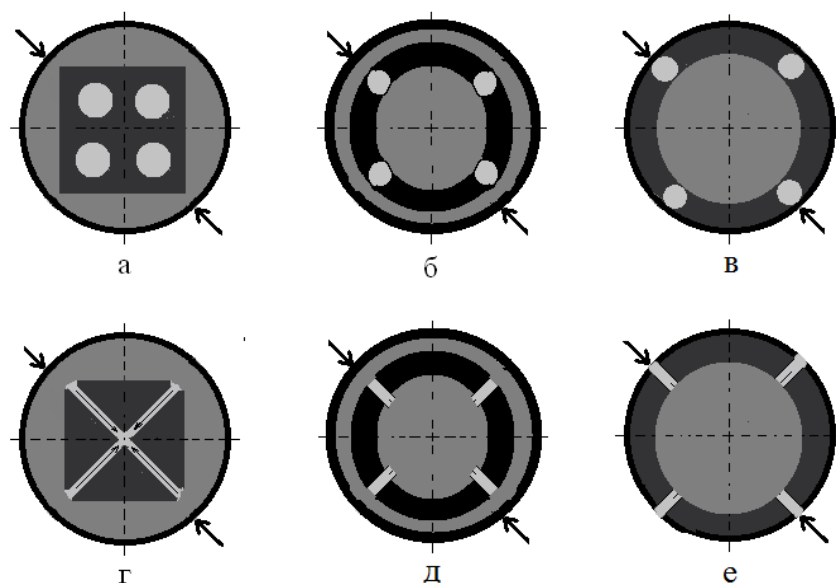
Вероятные структурные схемы двухслойных окатышей и схема взаимодействия технологического газа с рудным каркасом железорудных окатышей, полученных по технологиям ЗНД, показаны на рисунке 2 а, г, ЗОНД – б, д и ЗОН – в, е. Структурные схемы окатышей с преобладанием закрытых пор приведены в позициях а, б, в (рисунок 2). В позициях с; г, д, е (рисунок 2) приведены структурные схемы окатышей с преобладанием открытых пор.

Таблица 1 – Технические показатели технологий получения окатышей на основе теплосилового напыления шихты

Технические показатели	Технологии получения окатышей			
	ЗО	ЗНД	ЗОНД	ЗОН
Площадь напыления, % от площади тарели	-	30-40	20-30	15-25
Площадь, занятая комкуемыми материалами, %	40-50	70-90	40-50	40-50
Относительная производительность, %	100	115-130	105-115	110-125
Массовая доля напыленного материала в структуре окатышей, %	-	до 60	до 30	до 50
Эффективность напыления, %	-	до 90	до 70	до 50
Скорость прироста массы окатышей, г/с	0,01-0,03	0,08-0,24	0,05-0,14	0,08-0,31
Снижение влажности окатышей после окомкования, %	-	0,4-1,2	0,4-1,0	0,5-0,9
Интенсивность влагоудаления в процессе формообразования зародышей, кг/(м ² · с)	-	(4-8) · 10 ⁻³	(5-10) · 10 ⁻³	(5-10) · 10 ⁻³
Температура трещинообразования, 0С	550-580	600-740	580-650	580-620
Общая пористость окатышей, %	23-28	28-35	26-32	28-34
Количество открытых пор, %	20-25	25-30	22-26	24-28
Относительная прочность окатышей, %	100	90-110	90-100	85-95

В технологиях ЗОН и ЗОНД зародышами являются полусформованные окатыши размером от 4 до 12 мм. По технологии ЗОНД на поверхности зародышей размером 4-7 мм в процессе напыления создается промежуточный напыленный слой шихты, масса которого может достигать 50 % (рисунок 1, б). Причем для формирования напыленного слоя шихты можно организовать несколько проходов окатышей через отдельную зону напыления, либо расширить последнюю, используя многоструйное или циклическое напыление [2-3]. При этом площадь, занятая комкуемыми материалами на гарнисаже окомкователя, и расстояние, пройденное зародышами при формообразовании в режиме переката на тарели окомкователя, способны возрасти на 5–10 % за счет искривления траектории движения, деформации и выдавливания слоя окатышей в холостую зону агрегата. В процессе ЗОН на поверхности гранул размером 8–12 мм, сгруппированных в циркуляционной зоне окомкователя, на комкуемых материалах напылением влажного материала формируется шихтовая оболочка. В этой технологии напыление является заключительной стадией, после которой окатыши достигают кондиционных размеров (14–16 мм) (рисунок 1, в). Прочность поверхностной оболочки можно повысить на 5–15 % по сравнению с технологией ЗО, исполь-

зую более высокие параметры напыления. В этих технологиях отсутствуют механические элементы сопровождения, но эффективность напыления, массовая доля напыленного слоя в окатышах и часть технологических характеристик имеют более низкие значения, чем в процессе ЗНД.



В позиции: а, б, в – схема окатышей с закрытыми порами;

г, д, е – схема окатышей с открытыми порами.

На рисунках: черное – область окатыша, полученная теплосиловым напылением влажной шихты, серое – область окатыша, полученная окомкованием влажной шихты в режиме переката, белое – поры окатыша

Рисунок 2 – Структурные схемы двухслойных окатышей и схема взаимодействия технологических газов с рудным каркасом железорудных окатышей, полученных по технологиям ЗНД – а, г, ЗОНД – б, д и ЗОН – в

Наиболее изучен и успешно реализован в лабораторных условиях процесс получения окатышей на основе технологии принудительного зародышеобразования (ЗНД), в котором зародышевая часть окатышей и ее структура формируются теплосиловым напылением влажной шихты на шихтовый гарнисаж в холостой зоне окомкователя. В этой технологии у зародышей формируется пониженная влажность и благоприятная поровая структура с повышенным количеством открытых пор, для которой можно допустить некоторое снижение прочности центральной части окатыша. Относительно низкую прочность зародышей можно компенсировать более высокой прочностью оболочки окатыша. В этой части технологии для получения зародышей можно использовать железосодержащие материалы, имеющие частицы с более крупными размерами (до 0,2-0,3 мм), труднокомкуемые и гидрофобные добавки, использовать разнообразные жидкие и сыпучие технологические отходы, играющие роль восстановителей, поро- и структурообразующих, и энерго- и ресурссберегающих и топливных добавок. Эти материалы практически невозможно сформовать при окатывании многокомпонентной массы в режиме переката. Эти добавки имеют разнообразное функциональ-

ное назначение, часть из которых представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Особенности структуры и назначение технологических добавок в шихте окатышей

№	Наименование добавок	Особенности структуры добавок	Назначение добавок
	Грубодисперсные железосодержащие	Размер частиц более 0,2 мм	Ресурсозамещение
	Сыпучие углеродсодержащие	Гидрофобность по отношению к воде и водным растворам	Ресурсо- и энергозамещение, восстановители
	Жидкие углеводороды и смеси	Повышенная вязкость по отношению к воде и водным растворам	Ресурсо- и энергозамещение, восстановители
	Древесные частицы растительного и технологического происхождения	Анизотропия поверхностных свойств древесины	Поро- и структурообразование, ресурсо- и энергозамещение, восстановители
	Твердожидкостные растворы различного технологического происхождения	Различная вязкость по отношению к воде и водным растворам и анизотропия поверхностных свойств	Офлюсование и формирование вяжущих свойств у комкуемой массы

Для получения кондиционных окатышей предусмотрены операции механического деления НС на зародыши, сфероидизации зародышей и их доокомкования в режиме переката. Технические показатели технологии ЗНД и окатышей имеют максимальные величины (таблица 1). У зародышеобразующего слоя в широких пределах можно менять прочность, общую пористость, влажность и его структуру. Специфическое силовое поле, формируемое ВШС на поверхности напыленного слоя, позволяет повысить количество открытых пор и уменьшить их извилистость. Причем указанный характер пористости сохраняется и после высокотемпературного обжига [9]. Преимущественное формирование открытых и малоизвилистых пор (до 35–40 % у зародышей) благоприятно сказывается на повышении реакционной способности окускованного сырья и предполагает при металлизации сырья более высокую скорость восстановления [9-10]. Предложенная технология обладает широким набором методов воздействия на структурные свойства получаемых окатышей и производственные параметры окомкователя, включая использование ресурсо- и энергозамещающих материалов с дифференциальным распределением размеров частиц.

Выводы. Проанализированы новые возможности технологии принудительного зародышеобразования в производстве окатышей на основе ресурсо и энергозамещающих материалов. Обоснованы принципы теплосилового напыления влажной шихты в технике окомкования и показаны его техноло-

гические и ресурсосберегающие возможности.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
3. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
4. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ8 С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020; Оpubл. 28.06.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.
5. Патент № 2768073 Российская Федерация, МКИ8 С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2021130684/02, Заявл. 20.10.2021; Оpubл. 23.03.2022. Бюл. №9 //Изобретения. Полезные модели. 2022. – №9.
6. Патент № 2698000; Российская Федерация, МКИ8 С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2019117140/02, Заявл. 03.06.2019; Оpubл. 21.08.2019. Бюл. №24 //Изобретения. Полезные модели. 2019. – №24.
7. Патент № 2743435 Российская Федерация, МКИ8 С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020104648/02, Заявл. 31.01.2020; Оpubл. 18.02.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2020. – №5.
8. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
9. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин [и др.]. – Москва: Металлургия, 1994.– 240 с.
10. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В.В. Ожогин. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – 442 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ДОБАВКИ

Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, pawlowets.victor@yandex.ru*

***Аннотация.** Сформулированы новые возможности процесса окомкования в производстве окатышей. Обоснованы принципы принудительного зародышеобразования в технике окомкования и показаны его технологические возможности. Разработаны технические показатели новой технологии производства окатышей и физические параметры влажных окатышей и показана ее роль в повышении металлургических свойств окучкованного металлургического сырья. Проанализирована работа технических схем, отражающих производственные возможности принудительного зародышеобразования в процессах формирования напыленного слоя (НС) шихты и его деления различными техническими устройствами. Представлены опытные данные по изменению относительных величин прочности, массы и влажности в ходе окомкования влажной железорудной шихты для разработанных технических схем. Обоснована кинетика изменения этих параметров в ходе загрузки шихты, ее напыления на шихтовый гарнисаж окомкователя, деления напыленного слоя шихты на зародыши и доокомкования зародышей с формированием оболочки окатышей. Проведена оценка указанных технологических схем и выбраны наиболее эффективные решения на основе теплосилового напыления влажной шихты с учетом процесса налипания шихты, материалоемкости и сложности конструктивного оформления оборудования. Для практического использования рекомендована комбинированная технологическая схема получения окатышей по технологии принудительного зародышеобразования. В ходе экспериментов установлено, что технология предварительного зародышеобразования обладает высокой надежностью и универсальностью, легко внедряется в действующее производство.*

***Ключевые слова:** железорудное сырье, техника и технология окомкования, окучкованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, теплосиловое напыление влажной шихты, технология принудительного зародышеобразования, ресурсосберегающие добавки.*

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF PELLETIZING IRON ORE CHARGE IN THE PRODUCTION OF PELLETS CONTAINING RESOURCE-SAVING ADDITIVES

Pavlovets V.M.

Siberian state industrial University,

Abstract. *New possibilities of the pelletizing process in the production of pellets are formulated. The principles of forced nucleation in the pelletizing technique are substantiated and its technological capabilities are shown. The technical indicators of the new pellet production technology and the physical parameters of wet pellets have been developed, and its role in improving the metallurgical properties of agglomerated metallurgical raw materials has been shown. The work of technical schemes reflecting the production possibilities of forced nucleation in the processes of formation of a deposited layer (SS) of the charge and its division by various technical devices is analyzed. Experimental data are presented on the change in the relative values of strength, mass and moisture content during the pelletization of a wet iron ore charge for the developed technical schemes. The kinetics of changes in these parameters in the course of charge loading, its spraying onto the pelletizer charge scull, division of the sprayed charge layer into nuclei, and further pelletization of the nuclei with the formation of a pellet shell is substantiated. The above technological schemes have been evaluated and the most effective solutions based on the heat and power spraying of a wet charge have been selected, taking into account the process of charge sticking, material consumption and the complexity of the design of the equipment. For practical use, a combined technological scheme for obtaining pellets using the technology of forced nucleation is recommended. During the experiments, it was found that the technology of preliminary nucleation has high reliability and versatility, and is easily introduced into existing production.*

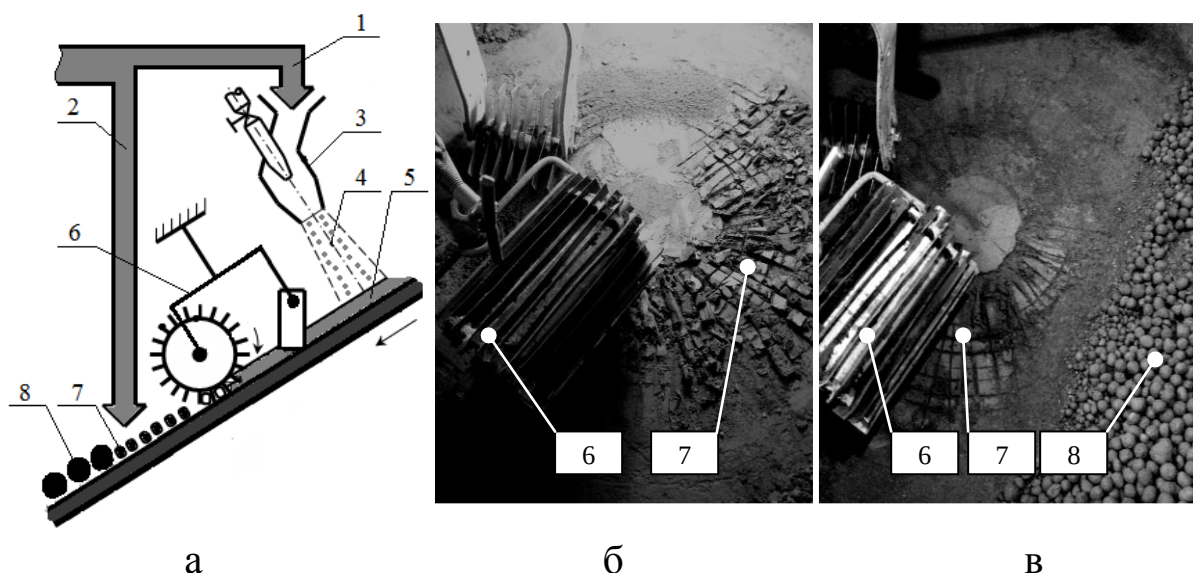
Keywords: *iron ore raw materials, equipment and technology of pelletizing, pelletized metallurgical raw materials, iron ore pellets, thermal power spraying of wet charge, forced nucleation technology, resource-saving additives.*

Окомкование железорудной шихты в производстве окатышей является начальной стадией окускования железорудного сырья, которое позволяет осуществить формообразование влажной сыпучей массы, ее первичное структурообразование и упрочнение [1-2]. Этот процесс является достаточно сложным, поскольку имеет технологические ограничения по минеральному и гранулометрическому составу компонентов. В частности, введение в состав гидрофобных или грубодисперсных добавок способно нарушить процесс формообразования. Процесс формообразования влажной шихты в производстве окатышей начинается с зародышеобразования и заканчивается доокомкованием зародышей. В традиционной технологии производства окатышей воздействовать на процесс зародышеобразования существующими техническими средствами без привлечения вспомогательных физических полей достаточно затруднительно [3]. Частично снять технологические ограничения по минеральному и гранулометрическому составу компонентов шихты можно с помощью технологии теплосилового напыления влажной шихты на гарнисаж окомкователя, придав ему дополнительные формо – и структурообразующие функции в производстве ока-

тышей [2, 3]. Предложенная технология принудительного зародышеобразования ЗНД (ЗНД – зародышеобразование напылением и доокомкование зародышей) позволяет существенно изменить процессы зародышеобразования и окомкования железорудной шихты. Она обладает широким набором инструментария для воздействия на структурные свойства окатышей и производственные параметры окомкователя. Согласно этой технологии на первом этапе получения сырых окатышей в холостой зоне вращающегося тарельчатого окомкователя проводят формирование плотного напыленного слоя (НС) шихты воздушно-шихтовой струей (ВШС), который механически делят на прочные зародыши, имеющие форму, близкую по форме сферокубу или сферопараллелепипеду. На этой стадии производства практически снимаются ограничения по минеральному и гранулометрическому составу компонентов, вводимых в шихту с различными технологическими целями. К ним относится возможность использования железосодержащих материалов, имеющих частицы с более крупными размерами (до 0,2-0,3 мм), труднокомкуемых и гидрофобных добавок, разнообразных жидких и сыпучих технологических отходов, играющих роль восстановителей, поро- и структурообразующих, энерго- и ресурсосберегающих и других добавок. На последующем этапе формообразования происходит доокомкование зародышей в смеси с увлажненной шихтой в режиме переката и формируется оболочка окатышей. Центральная часть кондиционных окатышей имеет пониженную влажность и в ней формируется более высокая пористость с подавляющим количеством открытых пор. Такое структурное построение окатышей позволяет снизить диффузионные ограничения при термообработке и повысить реакционную способность окускованного сырья. Технологическая схема производства достаточно легко может быть реализована на действующем производстве, для чего существуют свободные производственные площади и технические возможности. На основе технологии ЗНД разработаны многочисленные технические решения [4-7], позволяющие управлять процессами формирования зародышей и окатышей и их физическими свойствами, анализ технологической работы которых дает возможность сформулировать общие принципы зародышеобразования и структурообразования комкуемой массы для этой технологии.

Целью работы являлся анализ технических решений, направленных на развитие технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей, содержащей ресурсосберегающие добавки.

Схематичное представление технологии ЗНД и макроструктуры материалов, участвующих в формообразовании влажной шихты, показано на рисунке 1. В качестве базового устройства, на котором выполнены эксперименты, использовали лабораторный полупромышленный тарельчатый окомкователь (диам. 0,62 м, угол наклона тарели $\gamma = 45^\circ$, число оборотов $n = 12$ об/мин), снабженный струйным аппаратом (СА) (диаметр $d_{\text{СА}} = 0,02$ м, расход шихты $G_{\text{ш}} = 0,03 - 0,04$ кг/с, давление $P_{\text{в}} = 0,2$ МПа, расход сжатого воздуха $V_{\text{в}} = 0,6$ м³/мин) и устройствами различной конструкции для деления НС на зародыши



1 – поток шихты для зародышеобразования; 2 – тоже для доокомкования зародышей; 3 – струйный аппарат; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; 6 – делитель НС, состоящий из продольного (пластинчатые ножи) и поперечного (вращающийся барабан с ребрами) делителей; 7 – зародыши; 8 – окатыши

Рисунок 1 – Схема формообразования влажной шихты в зародыши и окатыши – а и внешний вид экспериментальной установки на основе тарельчатого окомкователя для получения окатышей по технологии ЗНД – б, в

. Подробное описание конструкции устройства и его технические особенности приведены в источниках [2, 3]. Для реализации многоструйных технических схем использовали три СА диам. 0,02 м при том же расходе шихты и первоначальных условиях. Тарельчатый окомкователь работал на влажной шихте, состоящей из железорудного концентрата Тейского месторождения ($d_q = 0,068$ мм) и 1 % бентонита. Шихта массой 5 кг напылялась в течение 60 с на ШГ толщиной 30 мм ($\rho_{шг} = 2230$ кг/м³, $W_{шг} = 8,14$ %) в холостой зоне тарели при $\Theta_L = 25$ ($\Theta_L = L/d_{CA}$, $L = 0,5$ м). Для доокомкования зародышей и формирования кондиционных окатышей в рабочую зону окомкователя дополнительно подавали 5 кг влажной шихты. Для всех сформованных материалов определяли среднюю прочность, влажность. У НС измеряли размеры НС (диаметр – $d_{НС}$, м, и высоту НС на его оси – h_o , м.). Зародышевую массу и массив окатышей рассеивали на ситах. Методика отбора проб подробно изложена в источниках [2-3].

Для технических схем, реализующих различные способы формирования НС определяли коэффициент напыления – $K_{НС}$, %, :

$$K_{НС} = (M_{ш} - M_m) / M_{ш},$$

где: $M_{ш}$ – масса напыляемой шихты, кг;

M_m – масса шихты, оставшейся после формирования НС, кг.

Для технических схем, реализующих различные способы деления НС

на зародыши, определяли фракционный состав зародышевой массы и коэффициент зародышеобразования – $K_{зр}$, %:

$$K_{зр} = M_{зр} / M_{ш} = (M_{ш} - M_{м} - M_{н}) / M_{ш},$$

где: $M_{зр}$ – масса зародышей размером 2-10 мм, кг;

$M_{н}$ – масса зародышевой мелочи размером менее 2 мм, кг;

Относительную прочность сформованных материалов $\Theta_{п}$ определяли по выражению:

$$\Theta_{п} = P_{ср} / P_{ок},$$

где: $P_{ср}$ – средняя прочность образцов НС, зародышей и окатышей, кПа;

P_0 – средняя прочность окатышей размером 12-16 мм, кПа; $P_0 = 280$ кПа.

Относительную массу сформованных материалов (НС, зародышей и окатышей) $\Theta_{м}$ вычисляли по формуле:

$$\Theta_{м} = M_{м} / M_0,$$

где: $M_{м}$ – средняя масса сформованных материалов (НС, зародышей и окатышей), кг.

M_0 – общая массы шихты, используемой для получения окатышей, включая подачу шихты на доокомкование зародышей в рабочую зону окомкователя, кг; $M_0 = 10$ кг.

Относительную влажность сформованных материалов Θ_{w} определяли по выражению:

$$\Theta_{w} = W_{ср} / W_{ш},$$

где: $W_{ср}$ – средняя влажность образцов НС, зародышей и окатышей, %;

$W_{ш}$ – влажность напыляемой шихты, %; $W_{ш} = 8,20$ %.

Относительную длительность процессов загрузки, напыления шихты, деления НС и доокомкования зародышей Θ_{τ} определяли по выражению:

$$\Theta_{\tau} = \tau_i / \tau_{ок},$$

где: τ_i – длительность процессов загрузки, напыления шихты, деления НС и доокомкования зародышей, с; Длительности напыления, деления и доокомкования составляли 15, 5 и 300 с соответственно.

$\tau_{ок}$ – общая длительность процесса формирования окатышей, с; $\tau_{ок} = 380$ с.

Для сравнительного анализа показателей этих технических схем использовали базовую схему для сравнения, которая опиралась на работу одиночного СА, напыляющего влажную шихту на неподготовленный ШГ. Типичное изменение параметров $\Theta_{м}$, $\Theta_{п}$, Θ_{w} в процессе формообразования шихты (напыление шихты с образованием НС и его деления на зародыши) и формирования окатышей для базовой схемы напыления приведено на рисунке 2. Результаты экспериментов представлены в таблицах 1 и 2.

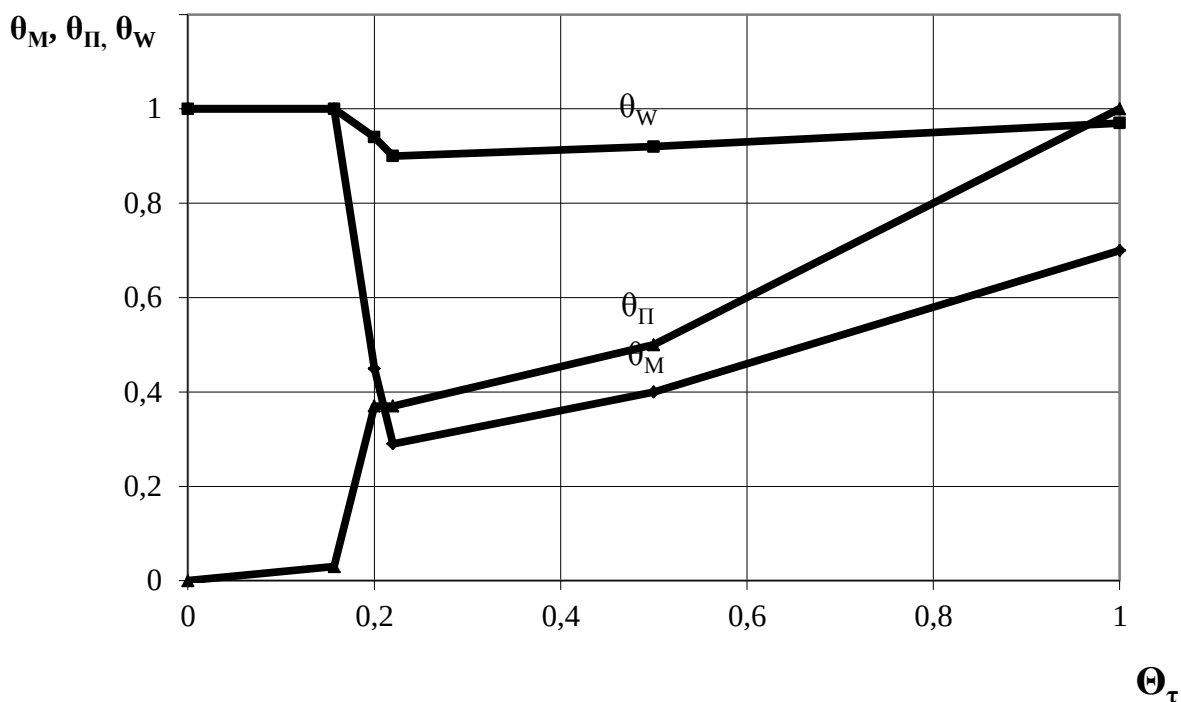


Рисунок 2 – Кинетика изменения относительной прочности $\Theta_{\text{П}}$, массы $\Theta_{\text{М}}$ и влажности $\Theta_{\text{В}}$ материалов в процессе формообразования шихты и формирования окатышей

Таблица 1 – Показатели технических схем, реализующих различные способы формирования НС

Конструктивные особенности технологической схемы	Показатели технических схем, реализующих различные способы формирования НС					
	$K_{\text{НС}}$	$d_{\text{НС}} / d_{\text{СА}}$	$d_{\text{НС}} / h_o$	$\Theta_{\text{М}}$	$\Theta_{\text{П}}$	$\Theta_{\text{В}}$
Формирование НС: одной ВШС	0,88	10,5	20,5	0,44	0,39	0,96
То же с увлажнением зоны напыления	0,95	11,5	21,5	0,46	0,41	0,99
Увлажнение ШГ	0,92	11,5	21,5	0,46	0,42	0,97
Несколькими ВШС с наложением НС по радиусу	0,92	29,0	94,0	0,46	0,40	0,96
То же с наложением НС по дуге	0,91	11,5	21,5	0,46	0,45	0,94
Одной ВШС с вспомогательным потоком воздуха	0,88	14,5	59,0	0,43	0,36	0,96
Одной ВШС с отклоняющими насадками на пути ВШС	0,86	15,0	60,0	0,43	0,35	0,96

Продолжение таблицы 1

Конструктивные особенности технологической схемы	Показатели технических схем, реализующих различные способы формирования НС					
	$K_{НС}$	$d_{НС} / d_{СА}$	$d_{НС} / h_o$	Θ_M	$\Theta_{П}$	Θ_W
Одной ВШС с упрочняющими и структурообразующими добавками в шихте	0,86	10,5	20,5	0,45	0,48	0,96
Дополнительное уплотнение НС барабанами	0,88	11,5	23,5	0,44	0,45	0,95

Таблица 2 – Показатели технических схем, реализующих различные способы деления НС на зародыши

Конструктивные особенности технологической схемы	Показатели технических схем, реализующих различные способы деления НС на зародыши								
	Фракционный состав зародышей, мм						$K_{ЗР}$	Θ_M	$\Theta_{П}$
	0-2	2-4	4-6	6-10	>10	$A_{ЗР}, мм$			
а	34,1	18,8	18,2	28,1	0,8	4,34	0,58	0,29	0,42
б	32,5	18,5	20,2	28,4	0,4	4,21	0,61	0,30	0,42
в	33,2	19,5	20,5	26,2	0,6	4,09	0,61	0,30	0,51
г	43,4	22,6	15,4	10,4	8,2	2,71	0,45	0,22	0,41
д	26,1	18,6	24,6	30,2	0,5	4,51	0,69	0,35	0,43
е	25,4	19,3	25,4	29,9	0,0	4,49	0,58	0,29	0,42
ж	15,2	21,3	30,6	32,9	0,0	5,67	0,62	0,31	0,42
з	12,3	22,2	31,9	33,6	0,0	6,22	0,67	0,38	0,42
и	32,1	19,8	20,2	26,1	0,8	4,15	0,58	0,29	0,38

В таблице 2 позиция а соответствует конструктивному оформлению технологической схемы, в которой организовано деление НС на зародыши продольными пластинчатыми ножами и барабаном с поперечными ребрами, б – то же с составными вращающимися барабанами, в – деление НС продольными пластинчатыми ножами и вращающимся барабаном с поперечными ребрами на выходе из слоя комкуемых материалов, г – плужковыми делителями, д – коническим барабаном, снабженным металлическими струнами, е – барабаном, снабженным ребрами с полукруглыми ячейками, ж – с профилированием НС по ширине и высоте, з – с профилированием ШГ, и – барабаном с поперечными ребрами и системой стержней.

Общим для всех технических схем (таблицы 1 и 2) является быстрое формообразование влажной шихты со средней скоростью роста массы зародышей более 3,0 г/с, сопровождаемое ростом прочности ($\Theta_{П} > 0,39$) и незначительной потерей массы сформованных материалов в процессе напыления шихты (до $\Theta_M = 0,44$) и деления НС (до $\Theta_M = 0,29$) на зародыши (рисунок 2). Напылением шихты можно сформировать прочность НС, близкую к прочности всего окатыша ($\Theta_{П} > 0,8 - 0,9$), но в таком режиме снижается пори-

стость и доля открытых пор в зародышевой части окатыша, что противоречит принципам структурообразования технологии ЗНД. Незначительный рост прочности зародышей при делении НС объясняется механическим уплотнением влажной массы делителями или вспомогательными устройствами. В процессе доокомкования зародышей происходит рост массы и прочности окатышей за счет формирования оболочки окатышей в режиме переката. Процесс обезвоживания НС связан с бародиффузионным переносом влаги ВШС, в которую при напылении попадает НС и зародышевая масса. Процесс доокомкования зародышей сопровождается ростом параметров Θ_M , Θ_P , Θ_W , имеет несколько стадий и протекает в течение значительно большего времени (300 с), что существенно снижает скорость роста массы (до 0,11 г/с) и прочности. Рост влажности формируемых окатышей при доокомковании зародышей происходит за счет переувлажнения оболочки окатышей. На заключительном этапе производства окатышей для большинства технических схем, реализующих технологию ЗНД, формируется максимальное количество окатышей размером 12-16 мм ($\Theta_M > 0,7$) со средней скоростью роста массы (более 0,3 г/с), необходимой прочности ($\Theta_P = 1,0$) с пониженным количеством влаги в их структуре ($\Theta_W < 1$). В центральной зародышевой части окатышей это снижение еще больше ($\Theta_W < 0,95$).

Учитывая характеристики НС и зародышевой массы (Θ_M , Θ_P , Θ_W , таблицы 1 и 2), полученные при реализации исследуемых технических схем, и технологичность устройств (уровень налипаемости шихты, материалоемкость дополнительного оборудования, сложность конструктивного оформления, надежность и стабильность работы) для практического использования рекомендуется комбинированная технологическая схема получения окатышей. Она включает технологию принудительного зародышеобразования ЗНД на основе формирования НС одиночной ВШС (схема а, таблица 1), позволяющей использовать упрочняющие и структурообразующие добавки в напыляемой шихте (схема з, таблица 1). Напыление материала в этой схеме организуют на предварительно профилированный шихтовый гарнисаж (схема ж, таблица 2), а деление НС на зародыши выполняют коническим барабаном, снабженным металлической струной (схема д, таблица 2). Реализация технологии ЗНД на основе этих элементов позволяет получать окатыши с пониженной влажностью ($\Theta_W = 0,97$), ее рациональным распределением по сечению, необходимой и достаточной прочностью ($\Theta_P \geq 1,0$), благоприятной поровой структурой и максимальным выходом окатышей размером 12 – 16 мм ($\Theta_M = 0,72$). В традиционной технологии ЗО эти параметры существенно ниже ($\Theta_W = 1,1$, $\Theta_M = 0,33$) [1–3]. По этим результатам можно прогнозировать более высокую производительность окомкователя, а при последующей термообработке окатыши потребуют меньших энергозатрат на термическую сушку [8].

Выводы. Проанализированы результаты исследований работоспособности технических схем на основе технологии ЗНД, позволяющих управлять процессом формирования зародышей и окатышей, и сформулированы общие принципы зародышеобразования и структурообразования комкуемой

массы на основе труднокомкуемых добавок различного технологического назначения. Получено типичное изменение параметров Θ_M , Θ_{II} , Θ_W в процессе формообразования шихты и формирования окатышей для базовых и ряда исследуемых технических схем. На основе показателей технологии ЗНД и технологичности процесса (уровень налипаемости шихты, материалоемкость дополнительного оборудования, сложность конструктивного оформления, надежность и стабильность работы) проведена оценка указанных технических схем и выбраны наиболее эффективные решения. Для практического использования рекомендована комбинированная схема получения окатышей по технологии ЗНД на основе формирования НС одиночной ВШС, позволяющей использовать упрочняющие и структурообразующие добавки. Напыление материала в этой схеме организуют на предварительно профилированный шихтовый гарнисаж, а деление НС на зародыши выполняют коническим барабаном, снабженным металлической струной. Реализация технологии ЗНД на основе этих элементов позволяет получать окатыши с пониженной влажностью ($\Theta_W = 0,97$), с ее рациональным распределением по сечению, необходимой и достаточной прочностью ($\Theta_{II} \geq 1,0$) и максимальным выходом окатышей размером 12 – 16 мм ($\Theta_M = 0,72$). По этим результатам исследований прогнозируется более высокая производительность окомкователя и меньшие энергозатраты на последующую термообработку окатышей.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
3. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва : Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
4. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020; Оpubл. 28.06.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.
5. Патент № 2768073 Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2021130684/02, Заявл. 20.10.2021; Оpubл. 23.03.2022. Бюл. №9 //Изобретения. Полезные модели. 2022. – №9.
6. Патент № 2698000; Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2019117140/02, Заявл. 03.06.2019; Оpubл. 21.08.2019. Бюл. №24 //Изобретения. Полезные модели. 2019. – №24.
7. Патент № 2743435 Российская Федерация, МКИ⁸ C22B 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020104648/02, Заявл. 31.01.2020; Оpubл. 18.02.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2020. – №5.
8. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин [и др.]. – Москва: Металлургия, 1994.– 240 с.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Романова В.А., Дробышев В.К.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, romanovaviktoria2908@gmail.com*

Аннотация: Представлены проведения анализа в отрасли черной металлургии о случаях аварийности, травматизма, смертности и текучести кадров в 2019 - 2020 гг. Оценка состояний промышленной безопасности на металлургических предприятиях. Выявлены причины возникновения несчастных случаев на производственных предприятиях в отраслях черной металлургии. Мероприятия по предотвращению несчастных случаев на производстве. Решение проблем в области промышленной безопасности металлургических предприятий.

Ключевые слова: металлургия, производственный травматизм, охрана труда, производственная безопасность, несчастный случай, промышленная безопасность, аварии.

ANALYSIS OF PROBLEMS IN THE FIELD OF LABOR PROTECTION AT FERROUS METALLURGY ENTERPRISES

Romanova V.A., Drobyshev V.K.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, romanovaviktoria2908@gmail.com*

Abstract. The article presents the analysis in the ferrous metallurgy industry of accidents, injuries, mortality and staff turnover in 2019-2020. Assessment of industrial safety conditions at metallurgical enterprises. The causes of accidents at industrial enterprises in the ferrous metallurgy industries have been identified. Measures to prevent accidents at work. Solving problems in the field of industrial safety of metallurgical enterprises.

Key words: metallurgy, industrial injuries, occupational safety, industrial safety, accident, industrial safety, accidents.

Черная металлургия является важнейшей отраслью тяжелой промышленности, которая охватывает весь процесс от добычи и подготовки сырья до выпуска готовой продукции. Продукция черной металлургии имеет экспертное значение и служит основой для развития машиностроения, мостостроения, строительства [1].

Из 1,5 тыс. предприятий, входящих в структуру черной металлургии, больше половины являются градообразующими [2].

Черная металлургия имеет множество межотраслевых связей и являет-

ся фундаментом для развития экономики страны, поэтому стратегические планы государственного уровня активно нацелены на повышение конкурентоспособности этой отрасли. Предприятия отрасли постоянно модернизируются, применяют инновации преимущественно в таких направлениях производства как доменное, сталеплавильное, прокатное.

Отметим также важный факт, что черная металлургия считается одной из самых опасных отраслей.

На начало 2020 года зарегистрировано 1293 опасных производственных объектов металлургических и коксохимических производств, 20 из которых относятся к первому классу опасности, а 328 – ко второму классу. Общее число работников металлургической отрасли составляет около 590 тыс. человек [4].

Поэтому главенствующим вопросом на сегодняшний день является повышение эффективности наряду с решением проблем в области охраны здоровья и безопасности труда.

Усиление внимания к проблеме охраны труда связано, прежде всего, с результатами проведения анализа отрасли черной металлургии по таким факторам как аварийность, травматизм, смертность, текучесть кадров. В 2020 году в сравнении с 2019 годом уменьшилось количество случаев смертельного и группового производственного травматизма, о чем свидетельствуют данные таблице 1 [4].

Таблица 1 – Сведения о случаях аварийности и травматизма в 2017 – 2018 гг.

Наименование	2019 год	2020 год	Изменение
Аварии	2	3	+1
Смертельный травматизм	11	9	-2
Групповой травматизм	7	2	+5
Ущерб от аварий, млн. руб.	21,875 млн.руб	2,09 млн.руб	-19,785

Исходя из данных табл. 1, наглядно видно, что число аварий за анализируемый период изменилось, почти в одиннадцать раз уменьшились затраты на возмещение ущерба. Это говорит об уменьшении тяжести последствий и о числах пострадавших и смертельно травмированных. К наиболее тяжелым последствиям от аварий, несущими за собой материальный ущерб и групповые несчастные случаи, приводят взрывы и пожары на производствах. Черная металлургия значительно превышает статистику случаев таких аварий по другим отраслям и находится на втором месте, уступая только объектам химии и нефтепереработки [5].

Основные причины возникновения несчастных случаев на производственных предприятиях отрасли черной металлургии:

1. неисправность механизмов агрегатов и оборудования в металлургических цехах;
2. широкое применение горючих газов;
3. эксплуатация неисправного подъемно-транспортных устройств;

4. обвалы руды, штабелей слитков, изложниц и готового металла, падение транспортируемого металла и т. п;

5. падение людей с высоты во время выгрузки шихтовых материалов на эстакадах, бункерах и бункерных ямах, а также падение с подножек вагонов, платформ, кранов и подкрановых путей;

6. прогар фурм в металлургических агрегатах, прогар гона, воздухопроводов доменных печей;

7. поражение электрическим током;

8. взрывы при переплавке взрывоопасного металлолома и при производстве взрывных работ.

Все факторы возникновения несчастных случаев и аварийности на металлургических и коксохимических предприятиях можно разделить на внутренние и внешние. На внешние факторы, например, природного типа, такие как стихийные бедствия, массовые эпидемии, повлиять металлургическим компаниям практически невозможно, равно также, как и прогнозировать [6]. Однако факторы такого типа редко становятся угрозами безопасности деятельности производственных предприятий. Гораздо большее влияние на безопасность работы сотрудников оказывают внутренние факторы, с которыми все промышленные предприятия могут и должны бороться. Таким образом, возникновение производственных травм на предприятии зависит от состояния рабочего места сотрудника, вида его трудовых обязанностей, условий труда, а также психологического и физического состояния работника.

Единой общепринятой классификации факторов производственного травматизма на сегодняшний день не существует, однако формальное разделение причин возникновения несчастных случаев позволяет корректнее оценить сложившуюся ситуацию, принять необходимые меры по её исправлению и выявить способы снижения травм опасных и аварийных ситуаций. В то же время, используемые способы снижения производственного травматизма и чрезвычайных ситуаций должны воздействовать не только на отдельно взятую группу факторов или причину, но и на все аспекты обеспечения безопасности сотрудников предприятия.

Оценивая общее состояние промышленной безопасности на металлургических и коксохимических предприятиях и производствах, необходимо отметить технические и организационные проблемы, понижающие промышленную безопасность, основными из которых для большинства этих предприятий являются:

1. физический и моральный износ основного технологического оборудования;

2. использование оборудования, отработавшего нормативный срок эксплуатации;

3. несвоевременность проведения экспертизы промышленной безопасности технических устройств, зданий и сооружений;

4. низкий уровень производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности;

5. снижение качества профессиональной подготовки производственно-

го и ремонтного персонала;

6. нарушение технологической дисциплины;
7. неиспользование средств индивидуальной защиты;
8. необеспеченность средствами индивидуальной защиты;
9. неудовлетворительная организация производственных работ;
10. недостаточный контроль за проведением работ.

Для снижения уровня производственного травматизма, защиты здоровья и жизни людей предусмотрены специальные мероприятия по предотвращению несчастных случаев на производстве.

Меры организационного характера включают: профессиональное обучение и инструктаж новых работников принятым на производстве техникам и приемам безопасной работы; разъяснение правил обращения со средствами безопасности; подготовка и реализация распорядка труда и отдыха.

Мероприятия технического свойства:

1. выполнение предварительных работ по расчету, проектировке, производству и планированию расстановки оборудования с целью обеспечения безопасности и удобства осуществления технологического процесса;
2. монтаж защитных ограждений и предохранительных приспособлений;
3. сборка и установка сигнализаторов опасности и размещение предупредительной разметки;
4. обеспечение работников средствами индивидуальной защиты;
5. тестирование оборудования, подъемников, электрической аппаратуры на предмет перегрузок;
6. замена потенциально опасных технических устройств на более безопасные, конструкционно исключающие угрозу травмирования человека;
7. автоматизация процессов загрузки и выгрузки производимой продукции.

Санитарно-гигиенические:

1. эргономичная организация освещения зданий и рабочих мест;
2. обустройство вентиляции и кондиционирования;
3. понижение уровня вибрации и шумов;
4. смена небезопасного сырья на безопасное;
5. поддержание чистоты в помещениях и на рабочих местах и т.д.

Организационные:

1. строгое соблюдение требований НПАОТ и законодательной базы;
2. обслуживание и выполнение ремонтных работ оборудования;
3. исследование получения травм и возникновения профессиональных заболеваний;
4. периодические осмотры цехов;
5. проведение соответствующего инструктажа;
6. обучение сотрудников;
7. создание уголков охраны труда;
8. лекции и показ фильмов соответствующей тематики;
9. регулярное проведение семинаров и консультаций;
10. размещение знаков, оповещений и изображений предупреждающе-

го характера.

Для проведения максимально эффективных организационных и технических мер по охране труда целесообразно привлекать персонал инженерного профиля с фундаментальными знаниями и высшим образованием.

Таким образом, несмотря на обширный перечень мер и способов снижения несчастных случаев на предприятиях черной металлургии, пробелы в обеспечении безопасности сотрудников все же существуют.

Для улучшения методов снижения рисков предлагается сместить акценты в этой области, а именно, сделать упор на работу с персоналом. Создать такую культуру безопасности, в которой необходимость надзора за обеспечением безопасности деятельности отступит на второй план и наступит момент личной приверженности, усиления личной ответственности каждого сотрудника за свою жизнь и свое здоровье.

Следует не только создать безопасные условия труда, но и вовлечь в работу по снижению рисков всех сотрудников, от простых рабочих до высшего руководства, так как сотрудники – главная ценность предприятия сохранив их жизни и здоровья является фактором долгосрочной конкурентоспособности и эффективности текущей деятельности.

Решение проблем в области промышленной безопасности должно обеспечивать выполнение ряда задач:

- 1) предупреждение единичных и групповых несчастных случаев на производстве, в том числе и со смертельным исходом;
- 2) сокращение чрезвычайных ситуаций;
- 3) сокращение производственного травматизма;
- 4) сокращение рисков в области безопасности;
- 5) повышение дисциплины и эффективности рабочего времени.

В качестве предложений для обеспечения принципов охраны труда и промышленной безопасности металлургическим предприятиям рекомендуется следующее:

1. Повысить мотивацию персонала промышленных предприятий к соблюдению принципов охраны труда и промышленной безопасности. Казалось бы, какой человек не заинтересован в сохранении своей жизни и здоровья? Однако длительное нахождение в опасных условиях притупляет инстинкт самосохранения и приводит к неправильной оценке серьезности ситуации;

2. Внедрить систему позиционирования персонала в условиях производственного объекта. Применение этих систем возможно во многих отраслях промышленности, в том числе и в черной металлургии. Система, представляющая собой два типа оборудования – переносные теги и стационарные анкеры, путем беспроводной передачи данных, отслеживает передвижения сотрудников по производственным площадям. Такая система позволит нивелировать угрозы безопасности со стороны всех внешних факторов производственного травматизма;

3. Увеличить инновационную активность предприятий черной металлургии. Крупные металлургические комплексы представляют собой пред-

приятия с полным циклом производства, которые характеризуются использованием сложного комплекса технологий по добыче сырья, производству чугуна, стали, стальных труб, слябов, прокатов, метизов, огнеупоров, а также переработке вторичного сырья и отходов производства. Повысить эффективность и безопасность таких трудоёмких процессов можно только с помощью повышения инновационной активности предприятий черной металлургии.

Исходя из этого, повышение инновационной активности становится проблемой не только самого предприятия, но и проблемой государства. Государство должно поддерживать внедрение инноваций и для этого необходимо принять следующие меры:

- 1) оказать финансовую поддержку промышленным предприятиям;
- 2) оказать информационную поддержку промышленным предприятиям;
- 3) наладить инновационную инфраструктуру;
- 4) наладить нормативно-правовую базу инновационной деятельности предприятий [7-10].

Вывод: В результате анализа можно сделать вывод, что металлургические предприятия уделяют большое внимание проблеме охраны труда и промышленной безопасности. Предприятия реализуют огромный перечень мероприятий, но несмотря на это число травм растет, как и степень тяжести последствий. Металлургическим предприятиям необходимо внедрять новую культуру безопасности, чтобы перейти от надзора к личной приверженности. Подход к вопросам безопасности должен действовать непрерывно со стороны руководства и каждого рядового работника. Наряду с этим следует отметить, что реализацию некоторых мероприятий по охране труда было бы проще осуществить при активной государственной поддержке.

Роль государственного регулирования в столь важной отрасли должна быть более значимой, чем в настоящее время. Только при его участии можно реально воздействовать на работодателей, на ситуацию в целом.

Библиографический список

1. Всемирная ассоциация стали (WorldSteelAssociation, WSA) // Мировое производство стали [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://mashprom.ru/press/news/mirovoe-proizvodstvo-stali-v-2016>.
2. Экономика России, цифры и факты. Часть 8. Металлургия - 2015. [Электронный ресурс]. URL:<http://utmagazine.ru>.
3. Городникова Н.В., Гохберг Л.М., Дитковский К.А. и др. Индикаторы инновационной деятельности: 2018: статистический сборник /.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2018. – 344 с.
4. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году, Москва, -2021. -- С 410 [Электронный ресурс] URL:<http://www.gosnadzor.ru>.
5. Павлова Г.А. Статистический анализ аварий и травматизма на металлургических предприятиях // Технологии трансферной безопасности. 2011. № 2(36). с. 18-25.

6. Характеристика основных видов опасности и создание безопасных условий труда в металлургии 2016 — [Электронный ресурс] URL:<https://metallurgist.pro/harakteristika-osnovnyh-vidov-opasnosti-v-chnojmetallurgii>.

7. Чернова А. С. Сущность инновационной активности предприятий // Молодой ученый. — 2015. — №1. — С. 311-312. [Электронный ресурс] URL: <https://moluch.ru/archive/81/14627/>.

8. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент: Учебник для вузов. 6-е изд. - СПб.: Питер, 2011. -448 с.

9. Трифилова А. А. Оценка инновационной активности предприятий// - 2011 - Режим доступа: <http://www.domino.innov.ru>.

10. Мельников, О.Н., Шувалов В. Н. Инновационная активность как фактор повышения конкурентоспособности предприятия//Российское предпринимательство. -2009. -№ 9.

УДК 620.9

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ВЗАИМОВОСТРЕБОВАННЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА НА СТАДИИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЁРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Филиппов В.А.

**ПСК «ЭНЕРГОМОНТАЖ»,
Москва, Россия, 00vadim-filippov@mail.ru**

***Аннотация.** В данном исследовании показана возможность использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) с помощью комплекса взаимовостребованных установок (КВВУ) в металлургической промышленности на стадии доменного производства с целью экономии топлива. Приведены принципиальная структурная и технологическая схемы КВВУ, а также для иллюстрации эффективности использования КВВУ был осуществлён расчёт для реальных расходов природного газа и воздуха.*

***Ключевые слова:** взаимовостребованные установки, экономия топлива, одноступенчатый компрессор, одноступенчатый детандер-генераторный агрегат, охлаждение воздуха перед секцией компрессора, подогрев газа в детандер-генераторном агрегате.*

THE USE OF A COMPLEX OF MUTUALLY DEMANDED INSTALLATIONS IN ORDER TO SAVE FUEL AT THE STAGE OF BLAST FURNACE PRODUCTION OF A FERROUS METALLURGY ENTERPRISE

Filippov V.A.

**PSC «ENERGOMONTAZH»,
Moscow, Russia, 00vadim-filippov@mail.ru**

Abstract. *This study shows the possibility of using secondary energy resources (VER) with the help of a complex of mutually demanded installations (KVVU) in the metallurgical industry at the stage of blast furnace production in order to save fuel. The basic structural and technological schemes of the KVVU are given, and also to illustrate the efficiency of the use of KVVU, a calculation was carried out for the real costs of natural gas and air.*

Keywords: *mutually demanded installations, fuel economy, single-stage compressor, single-stage expander-generator unit, air cooling in front of the compressor section, gas heating in the expander-generator unit.*

Проблема полезного использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) промышленных предприятий занимает существенную роль в эффективном функционировании российской экономики и промышленности. Как известно, при определённых условиях возможно организовать эффективное использование ВЭР в промышленных комплексах, что в итоге создаёт предпосылки к уменьшению расхода потребляемых первичных энергоресурсов.

В некоторых случаях может возникнуть ситуация, когда в составе промышленного комплекса существуют установки, каждая из которых производит свои ВЭР. При должной организации работы этих установок происходит «взаимопользование» вторичными энергетическими ресурсами между различными установками данного промышленного комплекса, что в результате ведёт к уменьшению расхода первичных энергоресурсов, и, следовательно, снижается вредное воздействие на окружающую среду и уменьшается себестоимость производимой продукции. Установки такого типа получили название взаимовостребованные установки (ВВУ), а их совокупность – комплекс взаимовостребованных установок (КВВУ).

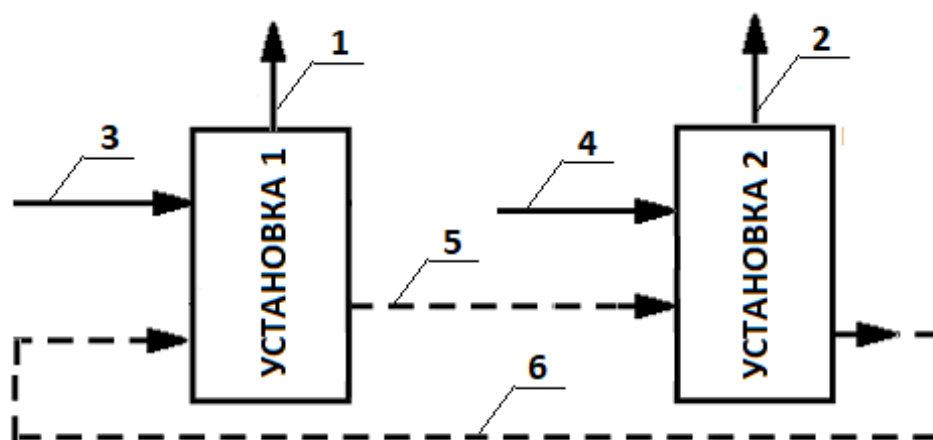
Структурная схема комплекса взаимовостребованных установок, состоящий из двух взаимовостребованных установок (ВВУ-1 и ВВУ-2), показана на рисунке 1.

Изначально выбрасываемые в окружающую среду вторичные энергетические ресурсы установки 1 (линия 5) поступают в установку 2, где полезно используются для повышения энергетической эффективности её работы, а изначально теряемые в окружающую среду энергетические выбросы установки 2 (линия 6), полезно используются для повышения энергетической эффективности работы установки 1. При этом расход первичных энергетических ресурсов, поступающих в эти установки по линиям 3 и 4, может быть уменьшен, а в некоторых случаях даже и прекращён, когда вторичных энергетических ресурсов, поступающих в установку, достаточно для обеспечения её работоспособности [1].

Количество взаимовостребованных установок, образующих КВВУ, может составлять и более двух. При этом исследования для таких КВВУ особых отличий не имеют.

Безусловно, предприятия чёрной металлургии являются достаточно энергоёмкими, обладают потребностью в различных произведённых энергоносителях, при этом производя огромное количество вторичных энергоре-

сурсов, зачастую полезно неиспользуемых. Поэтому применение КВВУ на предприятиях чёрной металлургии является достаточно актуальным. Особенно это касается такой энергозатратной стадии производства металлургического комбината, как доменное производство.



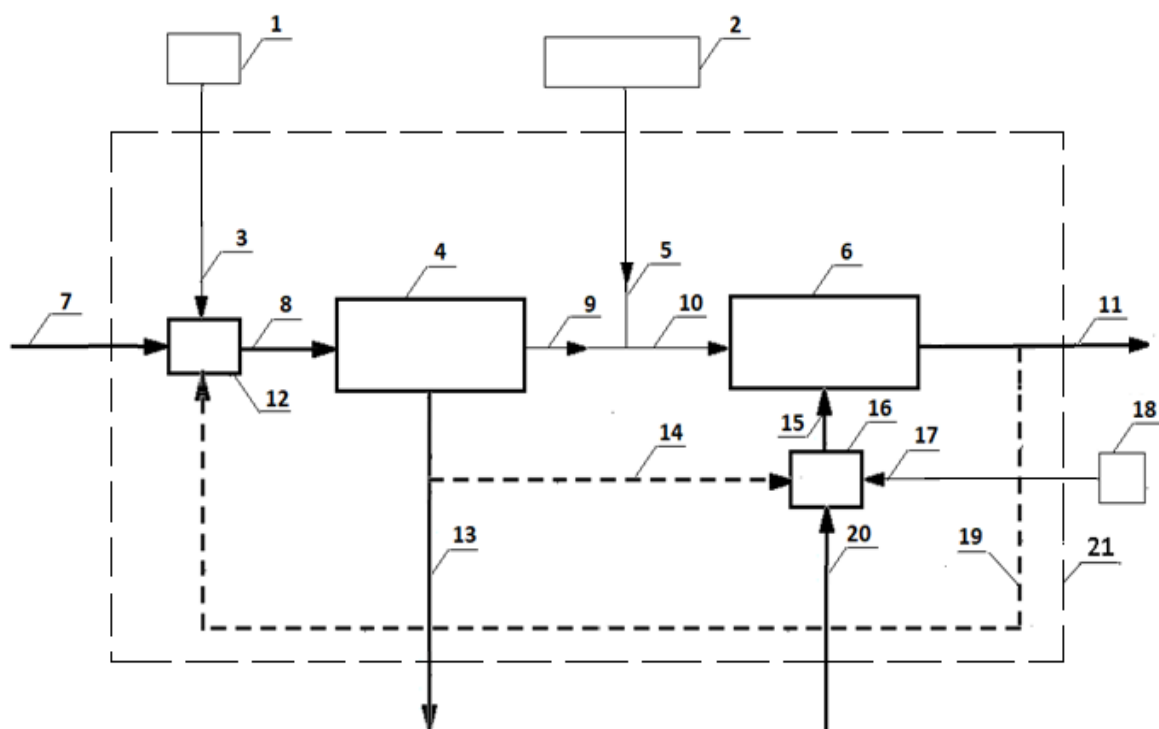
- 1 – продукция установки 1; 2 – продукция установки 2;
 3 – первичная энергия установки 1; 4 – первичная энергия установки 2;
 5 – линия подачи ВЭР1 из установки 1 в установку 2; 6 – линия подачи ВЭР2 из установки 2 в установку 1

Рисунок 1 – Структурная схема комплекса двух взаимовостребованных установок [1]

Как известно, потребление природного газа, сжатого воздуха и электроэнергии в доменном производстве занимает не последнее место. Авторами статьи [1] была разработана структурная схема КВВУ, состоящая из двух ВВУ. В качестве ВВУ-1 выступает одноступенчатый детандер-генераторный агрегат (ДГА), используемый для уменьшения давления транспортируемого природного газа, который применяется для технологических нужд в доменном производстве. ВВУ-2 представляет собой одноступенчатую компрессорную установку (КУ) с электроприводом, служащую для увеличения давления сжатого воздуха, который также используется для технологических нужд в доменном производстве.

Структурная схема КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатой КУ с электроприводом представлена на рисунке 2.

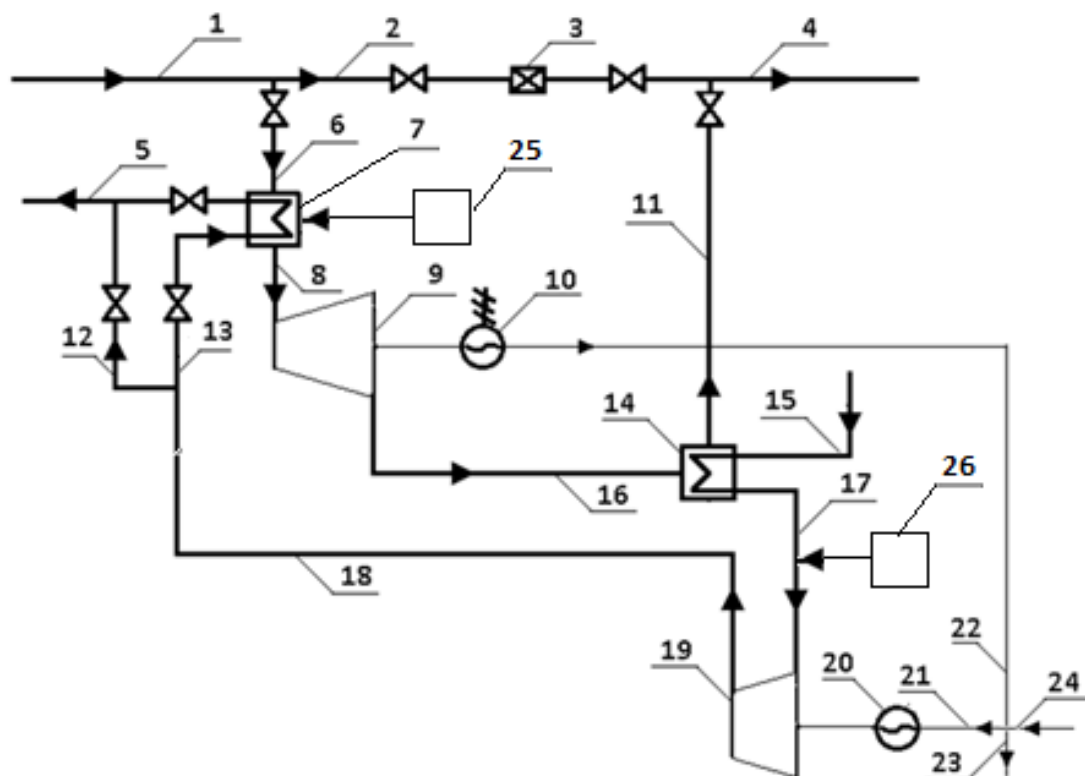
Из рисунка 2 нетрудно заметить, что поток холода 14 газа низкого давления 13 используется для охлаждения потока воздуха низкого давления 20 в теплообменнике 16 перед компрессором, что повышает эффективность работы компрессора. При этом поток тепла от сжатого воздуха 19 после компрессора используется для подогрева газа высокого давления 7 в теплообменнике 12, что позволяет получать в теплообменнике необходимую по технологическим требованиям температуру газа на выходе из детандера ДГА [1]. Данная организация работы ДГА и КУ позволяет назвать совокупность этих установок как комплекс взаимовостребованных установок.



1 – внешний источник тепла для подогрева газа высокого давления перед детандером; 2 – внешний источник электроэнергии для привода компрессора (электрическая сеть); 3 – линия подачи теплоносителя для подогрева газа высокого давления перед детандером; 4 – комплекс, включающий детандер и электрогенератор ДГА; 5 – линия подачи электроэнергии от электрической сети на компрессор; 6 – компрессор; 7 – линия подачи газа высокого давления в теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 8 – линия подачи газа высокого давления в детандер ДГА; 9 – линия отвода электроэнергии от электрогенератора ДГА; 10 – линия подачи электроэнергии на электродвигатель компрессора; 11 – линия отвода сжатого воздуха от компрессора потребителю; 12 – теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 13 – линия отвода газа низкого давления потребителю; 14 – поток холода от газа низкого давления в теплообменник охлаждения потока воздуха низкого давления перед компрессором; 15 – линия подачи воздуха в компрессор; 16 – теплообменник охлаждения воздуха перед компрессором; 17 – линия подачи хладагента из источника холода в теплообменник охлаждения воздуха перед компрессором; 18 – внешний источник холода для охлаждения воздуха перед компрессором; 19 – поток тепла сжатого воздуха после компрессора; 20 – линия подачи воздуха низкого давления в теплообменник охлаждения воздуха перед компрессором; 21 – контрольная поверхность

Рисунок 2 Структурная схема КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатой КУ с электроприводом [1]

В [1] авторами статьи была предложена также технологическая схема КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатого компрессора с электроприводом, которая изображена на рисунке 3.



1 – линия подвода газа высокого давления на входе на ГРП; 2 – линия подвода газа высокого давления к дросселирующему устройству ГРП; 3 – дросселирующее устройство ГРП; 4 – линия отвода газа низкого давления из ГРП потребителям; 5 – линия подачи сжатого воздуха потребителям; 6 – линия подачи газа высокого давления в теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 7 – теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА и охлаждения воздуха после компрессора; 8 – линия подачи газа высокого давления в детандер ДГА; 9 – детандер ДГА; 10 – электрический генератор ДГА; 11 – линия подачи газа низкого давления в газопровод низкого давления на выходе из ГРП; 12 – линия подачи сжатого воздуха после компрессора в линию подачи сжатого воздуха потребителям в обход теплообменника подогрева газа перед детандером ДГА; 13 – линия подачи сжатого воздуха после компрессора в теплообменник подогрева газа перед детандером ДГА; 14 – теплообменник подогрева газа после детандера ДГА и охлаждения воздуха перед компрессором; 15 – линия подвода воздуха в теплообменник подогрева газа после детандера ДГА и охлаждения воздуха перед компрессором; 16 – линия отвода газа из детандера ДГА; 17 – линия подачи воздуха в компрессор; 18 – линия отвода воздуха из компрессора; 19 – компрессор; 20 – электродвигатель; 21 – линия подачи электроэнергии на электродвигатель; 22 – линия отвода электроэнергии от электрогенератора ДГА; 23 – линия подачи электроэнергии потребителям; 24 – линия подачи электроэнергии из сети; 25 – внешний источник тепла; 26 – внешний источник холода.

Рисунок 3 – Технологическая схема КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатого компрессора с электроприводом [1]

Основными элементами установки являются компрессор, ДГА и объединяющие их в единый комплекс два теплообменника. В состав ДГА входят детандер 9 и электрогенератор 10. В состав компрессорной установки входят

компрессор 19 и электродвигатель 20. Оба теплообменника являются составными элементами как ДГА, так и компрессорной установки. Один из теплообменников (позиция 7) предназначен для подогрева газа перед детандером ДГА и охлаждения сжатого воздуха, подаваемого потребителю. Вторым теплообменником (позиция 14) предназначен для охлаждения воздуха перед компрессором с одновременным нагревом газа, направляемого потребителю.

Принцип действия установки заключается в следующем.

Поток газа высокого давления, поступающий на станцию технологического уменьшения давления (СТУД) транспортируемого газа по линии 1, разделяется на две части. Одна из частей потока газа по линии 2 направляется к дросселирующему устройству 3, где его давление уменьшается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, после чего поступает в линию 4 отвода газа низкого давления из СТУД потребителям. Вторая часть газа высокого давления по линии 6 поступает в теплообменник 7, где производится подогрев этого потока газа за счет тепла воздуха высокого давления, направляемого в этот теплообменник из компрессора 19 по линии 13. После подогрева в теплообменнике 7 газ по линии 8 направляется в детандер 9 ДГА, а отдавший часть тепла воздух по линии 5 отводится потребителям.

Поток газа, часть энергии которого в детандере 9 преобразуется в механическую работу, в результате чего его давление снижается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, а температура уменьшается, отводится из детандера 9 по линии 16 в теплообменник 14. В этот же теплообменник 14 по линии 15 направляется поток воздуха из атмосферы с начальным давлением и температурой более высокой, чем температура потока газа на входе в теплообменник. В теплообменнике 14 происходит охлаждение потока воздуха, после чего этот поток поступает на сжатие в компрессор 19, а газ из теплообменника 14 по линии 11 направляется в линию 4 отвода газа низкого давления из ГРП потребителям.

Поток сжатого воздуха отводится из компрессора 19 по линии 18. В схеме установки предусмотрена возможность отвода части потока сжатого воздуха из линии 18 по линии 12 помимо теплообменника 7 непосредственно в линию 5 подачи сжатого воздуха потребителям, что позволяет при необходимости регулировать температуру подогрева газа в теплообменнике 7, а также и температуру воздуха в линии 5.

Механическая работа, произведенная потоком газа в детандере 9 ДГА, в генераторе 10 ДГА преобразуется в электроэнергию, которая отводится из него по линии 22. В тех случаях, когда электрическая мощность ДГА превышает необходимую для обеспечения работы компрессора, одна часть выработанной генератором 10 электроэнергии отводится из линии 22 по линии 21 на электродвигатель 20 компрессора 19, вторая часть отводится из линии 22 по линии 23 потребителям. В тех же случаях, когда электрическая мощность ДГА не достаточна для обеспечения работы компрессора, предусмотрен подвод дополнительной электрической мощности из сети по линии 24. В схеме предусмотрены также автономные источники тепла 25 и холода 26.

Они предназначены для обеспечения необходимых температур газа высокого давления и воздуха высокого давления соответственно в тех случаях, когда сделать это в теплообменнике 7 только за счёт тепла воздуха после компрессора и в теплообменнике 14 только за счёт холода газа после детандера оказывается невозможным [1].

Для демонстрации получаемого энергосберегающего эффекта от применения КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатого компрессора с электроприводом на стадии доменного производства предприятия чёрной металлургии был произведён расчёт для реальных расходов природного газа и сжатого воздуха при следующих условиях: в компрессоре производится сжатие воздуха от атмосферного давления до 5 бар; номинальная производительность компрессора составляет 84 кг/с; номинальная мощность электропривода компрессора, потребляемая из сети, составляет при этом 17,2 МВт. При установке ДГА, в котором осуществляется снижение давления газа от 9 до 3 бар, при расходе природного газа 28,2 кг/с может быть получена дополнительная электрическая мощность, равная 3,62 МВт. Таким образом, применение ВВУ в этом случае позволяет уменьшить расход электроэнергии, потребляемой из сети на привод компрессора, на 21 %.

При подогреве природного газа в теплообменнике перед детандером (позиция 7 рисунка 3) до 50 °С при заданных параметрах процесса его температура на выходе из детандера будет равна минус 9,6 °С. Полученный поток холода может использоваться для охлаждения воздуха перед его сжатием в компрессоре до температуры 5 °С. В этом случае плотность воздуха увеличится, приблизительно, в 1,033 раза, что при прочих равных параметрах процесса повысит массовую производительность компрессора на 3-4 %. При этом температура воздуха на выходе из компрессора будет достигать около 180 °С. Транспортируемый воздухом тепловой поток, составляющий при принятых параметрах процесса 3850 кВт, достаточен для подогрева газа перед детандером от 10 до 50 °С, для чего требуется 2590 кВт. Оставшаяся тепловая мощность потока воздуха, как и в предыдущем случае, может быть использована в дальнейшем для нужд предприятия [1].

Кроме вышеперечисленного стоит отметить, что при использовании КВВУ на базе одноступенчатого ДГА и одноступенчатого компрессора с электроприводом на стадии доменного производства металлургического предприятия достигается экономия топлива, которая равняется 1,222 т у.т./ч. При этом, экономия топлива, равная 0,96 т у.т./ч, осуществляется за счёт выработки электроэнергии в ДГА при принятом удельном расходе топлива на выработку электроэнергии на ТЭЦ, близкому к среднему по стране 0,265 г/кВт·ч [2] и при условии, что для подогрева транспортируемого природного газа используется только поток тепла сжимаемого воздуха. Остальная экономия топлива, которая составляет 0,262 т у.т./ч, происходит за счёт охлаждения сжимаемого воздуха перед секцией компрессора. При применении КВВУ на протяжении 7000 часов в год, годовая экономия топлива составит 8550 т у.т. в год.

Выводы

1. Комплекс взаимовостребованных установок является одним из возможных технических решений, позволяющих полезно использовать вторичные энергетические ресурсы, производимые при работе промышленных комплексов, частным случаем которых являются предприятия чёрной металлургии.

2. Применение комплекса взаимовостребованных установок на стадии доменного производства позволит:

- уменьшить расход первичных энергоресурсов, используемых для осуществления технологических процессов на стадии доменного производства;
- снизить цену на произведённые энергоносители и выпускаемую продукцию предприятий чёрной металлургии;
- уменьшить тепловое воздействие на окружающую среду;
- снизить выброс парниковых газов.

Доклад подготовлен при финансовой поддержке Российского научного фонда гранта на проведение фундаментальных научных исследований Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (№ Проекта 22-29-00096).

Библиографический список

1. Клименко А. В. Взаимовостребованные установки - частный случай использования вторичных энергетических ресурсов / А. В. Клименко, В. С. Агабабов, С.Н. Петин, В.А. Филиппов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 6, С. 2-8.

2. Клименко А.В. Использование детандер-генераторного агрегата на ТЭЦ металлургического комбината для производства электроэнергии и повышения эффективности работы компрессорной установки / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, С.Н. Петин, П.Н. Борисова // Чёрная металлургия. – 2019. – № 9 (62). – С. 698 – 704.

СЕКЦИЯ 5: АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 681.51; 621.365.51

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ МОНТАЖЕ ОБОЖЖЕННЫХ АНОДОВ

Немчинова Н.В., Тузов А.В., Геройменко А.В., Апончук И.И.

*Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
г. Иркутск, Россия, ninavn@yandex.ru*

Аннотация. Одним из основных технологических переделов по подготовке электролизера к работе в условиях электролиза криолит-глиноземных расплавов является качественный монтаж обожженного анода (ОА). Было показано, что при плавке чугуна в процессе приготовления расплава для заливки nipples в тело ОА алгоритм управления индукционной печью при помощи реостата в ручном режиме приводит к быстрому износу футеровки печи из-за неравномерности распределения температуры. Установлено, что при смене ручного управления печью на автоматическую работу стабилизируется режим работы по подаче электрического тока, что ведет к меньшему разрушению футеровки и, следовательно, увеличению срока службы индукционной печи.

Ключевые слова: производство первичного алюминия, обожженные аноды, индукционная печь, автоматическое управление.

AUTOMATIC CONTROL FOR CURRENT STABILIZING IN INDUCTION FURNACES USED AT PREBAKED ANODES MOUNTING

Nemchinova N.V., Tuzov A.V., Geroymenko A.V., Aponchuk I.I.

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia*

Abstract. Mounting an anode well, which is a procedure perform by the anode mounting unit of a facility, is a core part of the process of preparing an electrolysis cell to electrolyzing cryolite-alumina melts. Nipples are placed into sockets in the carbon block and then secured with cast iron. This cast-iron thimble is prepared in induction furnaces, the lifespan of which depends on how current is fed to melt the metal-containing charge. It was found out that when melting cast iron to prepare a melt, manual furnace control algorithm that uses a rheostat will

cause the lining to degrade rapidly, as temperatures are distributed unevenly. This paper shows that switching from manual to automatic furnace control stabilizes current feeding and results in less significant lining degradation, thus contributing to a longer induction furnace lifespan.

Keywords: *primary aluminium production, prebaked anodes, induction furnace, automatic control*

Введение

На сегодняшний день алюминий является одним из основных конструктивных материалов. Алюминий применяется во многих отраслях промышленности (транспорт, строительство, энергетика, пищевая промышленность и др.). Единственный промышленный способ получения алюминия – электролиз криолит-глиноземных расплавов в электролизерах [1-2].

В настоящее время используется два вида анодов – обожженные и самообжигающиеся. Ванны с ОА характеризуются более высокими технологическими (высокий выход по току, меньший расход электроэнергии и др. [3-5]) и экологическими показателями (отсутствуют выбросы смолистых веществ в атмосферу, уменьшение количества техногенных отходов [6-7]). ОА производятся из смеси 50-65 % нефтяного кокса, 14-17 % каменноугольного пека (в качестве связующего) и 15-30 % рециркулируемых анодных огарков. Из данной смеси формируются блоки, которые затем обжигаются в специализированных печах обжига анодов при температуре ~1100 °С [8]. Так как углерод, из которого состоит анод, является одним из компонентов, вступающих в реакции в процессе электролитического разложения глинозема и получения алюминия, расходуется с течением времени. В связи с этим ОА приходится регулярно заменять, как правило, через 22-26 дней. Отработанный анодный блок направляется в анодно-монтажное отделение (АМО) предприятия, где осуществляется сборка новых анодов для процесса электролиза. Остающиеся анодные огарки очищаются от электролита, измельчаются и используются в качестве сырья для производства новых ОА. Конечной продукцией цехов или участков АМО является полностью смонтированный анод, готовый к установке в электролизер. ОА состоит из алюминиевой штанги и стальной траверсы (кронштейна) с несколькими ниппелями.

Индукционная печь для расплавления чугуна

Основной целью АМО алюминиевого предприятия является снятие с анододержателей огарков и чугунной заливки, подготовка ниппелей к монтажу новых ОА, заливка ниппелей чугуном. Чугунная заливка используется для установления контакта между стальным кронштейном и «телом» анода, а также закреплению кронштейна обожженного анода [9, 10]. Заливка ниппельных гнезд является одной из основных операций монтажа ОА алюминиевых электролизеров, используемых на 5 серии ПАО «РУСАЛ Братск» филиал в г. Шелехов (Иркутском алюминиевом заводе – ИркаЗе).

На сегодняшний день в металлургической отрасли особое внимание уделяют печам индукционного нагрева, применяющимся для приготовления всевозможных сплавов, чугуна, алюминия, меди. Электромагнитное поле

способно проникать в ферромагнитные материалы, обладающие высокой электропроводностью. Взаимодействие первичной и вторичной цепи, подача энергии от одной к другой и является фундаментом индукционного нагрева. В качестве первичной цепи служит многовитковая катушка, изготовленная из медной трубки, охлаждаемой водой. К катушке (соленоиду) подводится переменный ток, что способствует созданию магнитного поля [11].

Работают тигельные печи при помощи электрического тока повышенной или высокой частоты на входном напряжении равном 575 В, имеются две группы трехфазного переменного тока. В индукционных печах тигель из огнеупорной смеси находится в полости индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рисунок 1).

Для работы печи необходимы высоковольтный распределительный щит, выпрямительный трансформатор (мощностью 1800 кВт·А), источник тока средней частоты (1500 кВт) и вспомогательное оборудование. В тигель загружается металлическая шихта, и, поглощая электроэнергию, плавится. Индуктор служит первичной обмоткой, а расплавленный металл в тигле – вторичной обмоткой. В качестве шихты в АМО используют отработанные секции газосборного колокола, выполненные из чугуна. Эксплуатационная надежность печи зависит от тигля. Он должен обеспечивать отсутствие тепловых потерь, обеспечив при этом максимальный КПД, и механическую прочность. Для соблюдения этих требований (согласно практическим данным) соотношение среднего внутреннего диаметра тигля d_0 и высоты тигля h должно составлять $d_0/h = 0,6...1,0$ при средней толщине стенки $\Delta m = (0,1...0,25) d_0$.

Для обеспечения механической прочности тигля, заполненного металлом, толщину его стенки по высоте делают переменной, а внутреннюю поверхность выполняют в виде конуса с углом наклона образующей $\alpha=2...4^\circ$. Сопряжение вертикальных стенок с дном выполняют под углом 45–50° либо с плавным переходом.

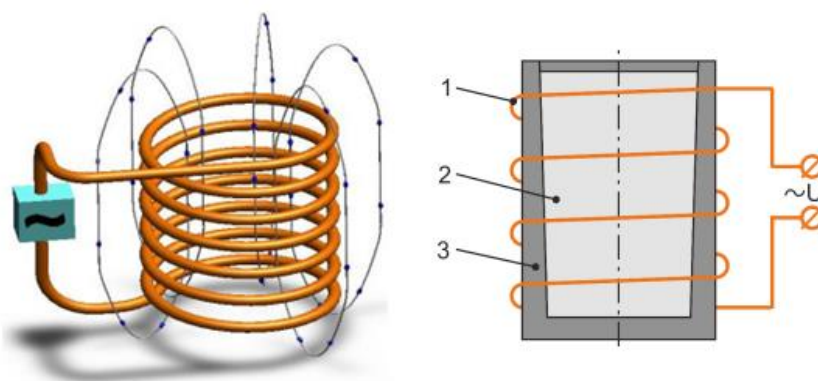


Рисунок 1 – Принцип индукционной тигельной плавки металлов:

1 – индуктор; 2 – шихта или расплав; 3 – огнеупорный тигель

Тигель должен выдерживать большие температурные напряжения, гидростатическое давление столба расплава и механические нагрузки, возникающие при загрузке и осаживании шихты. Тигель должен быть химически стоек по отношению к расплавленному металлу и шлаку и неэлектро-

проводен при рабочей температуре. Тигель должен иметь по возможности минимальную толщину стенки для получения высокого значения электрического КПД. Материал тигля должен иметь малый коэффициент линейного объемного расширения для исключения возникновения трещин в тигле в условиях высоких значений градиента температур в стенке (до $3 \cdot 10^4$ °С/м) и для снижения термических напряжений в тигле. Стойкость тигля определяется как длительность активной работы печи, т.е. общее время плавов до ремонта.

Проблемы эксплуатации индукционной печи и пути их решения

Индукционные печи представляют собой сложную электромагнитную систему при эксплуатации в технологических процессах. Многие исследователи работают над оптимизацией электрических характеристик данных печей [12-14].

Электрическая стабильность играет значительную роль при эксплуатации работы печей, используемых для расплавления металлов, на срок службы футеровки.

Футеровка индукционной печи в процессе эксплуатации испытывает термические, механические, химические воздействия со стороны шихты, расплавленного металла, а также в процессе электромагнитного перемешивания расплава. Изменение температуры расплава и градиента температур в стенке тигля создают многократные расширения и сжатия кремнеземсодержащих зерен, входящих в состав футеровки, что приводит к образованию трещин и ее разрушению. В процессе службы футеровки изменяется ее минеральный состав, снижается содержание кремнезема.

Для футеровки индукционных печей применяется кислая футеровка, состоящая из кремнеземистых огнеупорных материалов с содержанием оксида кремния в пределах от 93 до 98 %. По результатам исследований, приведенных в работе, оптимальным является содержание SiO₂ от 93,43 до 96,07 %. Связующим является борная кислота или борный ангидрид.

К недостаткам тигельных печей относятся относительно низкая температура шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки. Шлак в индукционной печи разогревается от металла, поэтому его температура всегда ниже. Также для печей характерны сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких температурах расплава и наличие теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла). Вследствие чего происходит вымывание футеровки в нижней части тигля. И основную роль при этом играет режим управления токовой нагрузки на печь.

В АМО ИркаЗа при приготовлении расплава чугуна до недавнего времени использовалось ручное управление печью с помощью реостата. При резком подъеме токовой нагрузки, необходимой для расплава шихты, при ручном управлении печью повышается интенсивная циркуляция расплава чугуна, что приводит к преждевременному износу футеровки печи (рисунки 2 и 3).

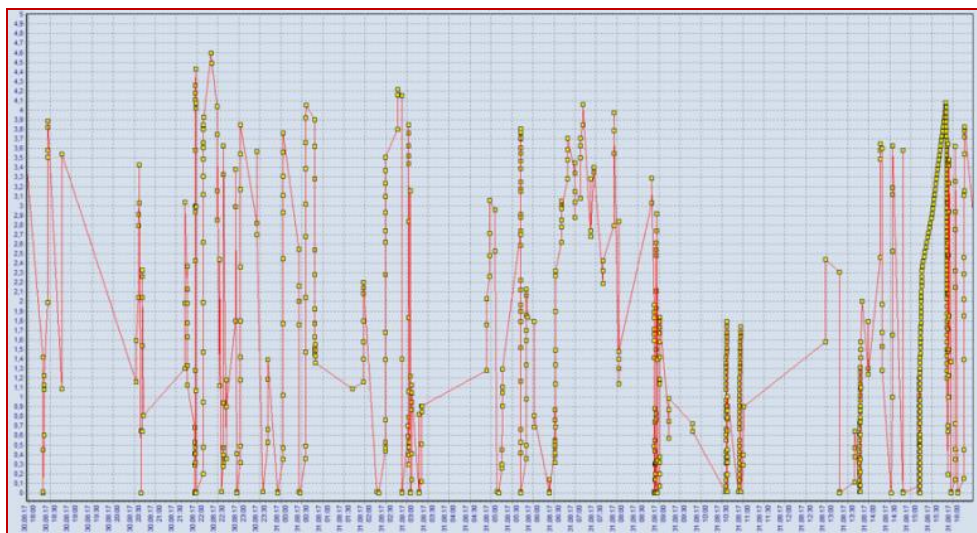
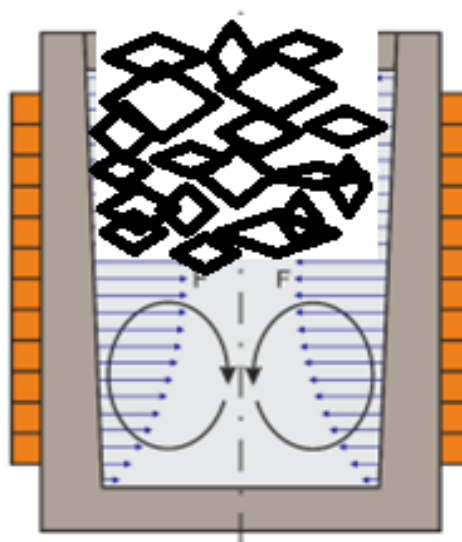


Рисунок 2 – График работы индукционной печи при ручном управлении токовой нагрузкой



а



б

Рисунок 3 – Фото ручного реостата (а) и схематичное изображение расположения загруженной шихты в печи (б)

Однако решение данной проблемы возможно за счет применения автоматического управлению индукционной печью. Для этого было разработано программное обеспечение процесса подачи токовой нагрузки на печь. Как видно из рисунка 4, отсутствует хаотичное распределение токовой нагрузки, что способствует равномерному распределению температуры в индукционной печи. И, таким образом, увеличивается срок службы индукционных печей благодаря более длительному сохранению целостности футеровки.

Заключение

Одним из основных технологических переделов по подготовке электролизера к работе в условиях электролиза криолит-глиноземных расплавов является качественный монтаж анода. Ниппеля заливаются чугуном в гнезда

в теле угольного блока. Подготовка данной чугунной заливки осуществляется в индукционных печах, срок службы которых зависит от способа подачи токовой нагрузки для расплавления металлсодержащей шихты. Было установлено, что при плавке чугуна в процессе приготовления расплава алгоритм управления печью при помощи реостата в ручном режиме приводит к быстрому износу футеровки печи из-за неравномерности распределения температуры. Показано, что при смене ручного управления печью на автоматическую работу стабилизируется режим работы по подаче тока, что ведет к меньшему разрушению футеровки.

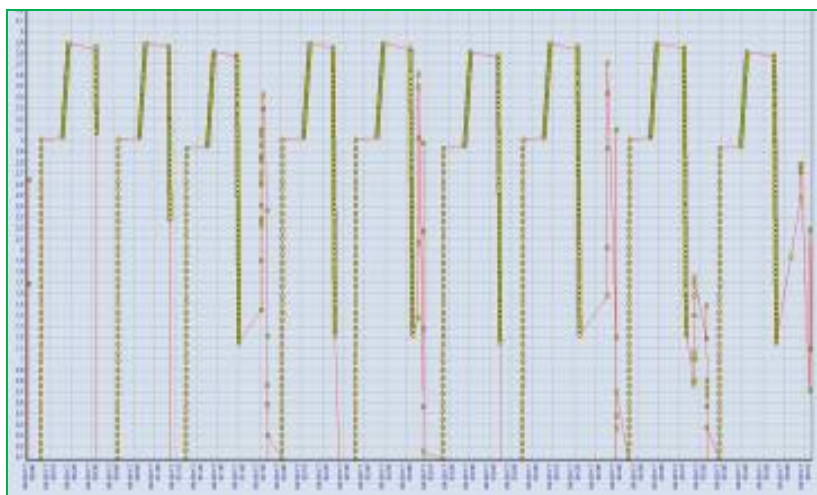


Рисунок 4 – График работы индукционной печи при автоматическом управлении токовой нагрузкой

Библиографический список

1. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
2. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
3. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014. Light Metals, 2015, pp. 757-762. DOI:10.1002/9781119093435.ch128.
4. Бажин В.Ю., Смольников А.Д., Петров П.А. Концепция энергоэффективного производства алюминия «Электролиз 600+» // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5. Ч. 3. С. 37-40. DOI:10.18454/IRJ.2016.47.113/
5. Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Володькина А.А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 906-918. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-906-918.
6. Белых Л., Максимова М. Эколого-технологическая модернизация Иркутского алюминиевого завода и ее влияние на канцерогенную опасность для города Шелехова // Экология и промышленность России. 2018 Т. 22. № 9. С. 8-13. DOI:10.18412/1816-0395-2018-9-8-13

7. Немчинова Н. В., Сомов В. В., Тютрин А. А. Определение оптимальных параметров выщелачивания фтора из угольной части отработанной футеровки демонтированных электролизеров производства алюминия // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 544–549. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.544.
8. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 670 с.
9. Бушма В.О. Дуговая сварка на подъем неподвижным плавящимся электродом // Сварочное производство. 2020. № 5. С. 3-7.
10. Кукарцев В.А. Выплавка чугуна и стали в индукционных тигельных печах промышленной частоты. Сталь. 2016. № 5. С. 26-28.
11. Карелов С.В., Матюхин В.И., Матюхин О.В., Сокунов Б.А., Грובה Л.С. Конструирование и расчет индукционных плавильных печей. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. 162 с.
12. Adetona S., Esenwa E.Ph., Omolola S.A. The Effects of Induction Furnace on Electric Distribution Network. IRE Journals, 2020, vol. 3, iss. 7, pp. 93-98.
13. Gbadamosi S.L., Melodi A.O. Harmonic distortion from induction furnace loads in a steel production plant. Network and Complex Systems. 2013, vol. 3, no. 10, pp. 8-16.
14. Saggu T.S., Singh L. Power Quality Improvement in Induction Furnace by Harmonic Reduction Using Dynamic Voltage Restorer. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 277-285. DOI: 10.1515/ijeeps-2015-0189.

УДК 681.5

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ЗАВИСИМЫМИ ОТ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ

**Свинцов М.М.¹, Скударнова Н.В.¹, Ивушкин К.А.²,
Макаров Г.В.³, Мышляев Л.П.³**

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, svintzovmax@yandex.ru*

²*ООО «Объединённая компания «Сибшахтострой»,
г. Новокузнецк, Россия*

³*Научно-исследовательский центр систем управления,
г. Новокузнецк, Россия*

***Аннотация.** В статье рассматривается проблема возникновения неопределённостей, обусловленных системным эффектом, которые необходимо учитывать при разработке систем автоматизированного управления.*

***Ключевые слова:** автоматизация, моделирование, эффективность управления, системный эффект.*

IDENTIFICATION AND MODELING OF OBJECTS WITH CONTROL EFFICIENCY-DEPENDENT PARAMETERS

Svintsov M.M.¹, Skudarnova N.V.¹, Ivushkin K.A.², Makarov G. V.³,
Myshlaev L.P.³

¹*Siberian State Industrial University,*

Novokuznetsk, Russia, svintzovmax@yandex.ru

²*United Company "Sibshakhtostroi" Ltd., Novokuznetsk, Russia*

³*Research Center of Control Systems LLC, Novokuznetsk, Russia*

Abstract. *The article considers the problem of uncertainties caused by the system effect, which must be taken into account in the development of automated control systems.*

Keywords: *automation, modeling, control efficiency, system effect.*

Общепринятая последовательность разработки систем автоматического управления представлена следующими этапами:

- разработка математической модели объекта;
- подбор закона управления;
- проведение имитационного эксперимента;
- техническая реализация системы;
- проведение натурного или полунатурного эксперимента;
- отладка системы.

Идентификация модели объекта проводится, в основном, на неуправляемом объекте, не охваченном прямыми и обратными управляющими связями [1]. При такой последовательности свойства объекта могут изменяться из-за ввода новых прямых и обратных управляющих связей, что приводит к проявлению системного эффекта и возникновению дополнительных неопределённостей в разработке системы [2].

Уменьшить влияние такого рода неопределенности можно за счет адаптации алгоритмов управления, но реализация данного решения зачастую требует значительных временных затрат, в то время как изменение свойств от эффективности управления - процесс непрерывный [3]. Отмеченные выше особенности требуют совершенствования методов разработки и настройки САУ и при корректной идентификации позволяют полностью устранить их влияние. Одним из возможных путей решения представленной задачи является реализация систем автоматизации управления с учётом изменений свойств объекта в зависимости от эффективности управления.

В реально действующих объектах диапазон изменения коэффициентов модели может быть довольно значительным, особенно сильно свойства объектов изменяются в периоды пусконаладочных испытаний и начальных стадий эксплуатации систем, поскольку именно тогда происходит замыкание контуров регулирования, корректировка технологических схем, поиск оптимальных технологических режимов.

Для уменьшения негативного влияния этих периодов необходимо непрерывно корректировать настроечные коэффициенты законов регулирования. Это можно делать на основе имитационного моделирования систем с именно физической моделью объекта. Последующий перенос полученных результатов моделирования на натурные системы правомерен с применением положений теории подобия систем управления [4, 5].

Известно, что замыкание объекта управления обратным связями – как отрицательными, так и положительными – ведет к изменению закона преобразования внешних воздействий без какого-либо вмешательства в структуру и параметры самого объекта [6]. Операторная зависимость выходного воздействия объекта от управляющих и возмущающих воздействий в этом случае принимает вид

$$y(s) = \frac{\varphi_u(s)}{1 + \varphi_u(s) \cdot f(s)} \cdot u(s) + \frac{\varphi_w(s)}{1 + \varphi_w(s) \cdot f(s)} \cdot w(s), \quad (1)$$

где $\varphi_u(s)$, $\varphi_w(s)$ – операторы преобразования управляющих и возмущающих воздействий,

$f(s)$ – оператор обратной связи (регулятора).

Использование этой зависимости для стабилизации объектов эффективно и дает большие возможности для объектов управления, в которых отсутствует связь между операторами $\varphi_u(s)$, $\varphi_w(s)$ [7]. Во многих технических объектах параметры (коэффициенты), а порой и структура объекта управления зависит от эффективности управляющих воздействий. Простым и достаточно наглядным примером этому может служить система управления уровнем жидкости в зумпфе со сложной геометрией (рисунок 1).

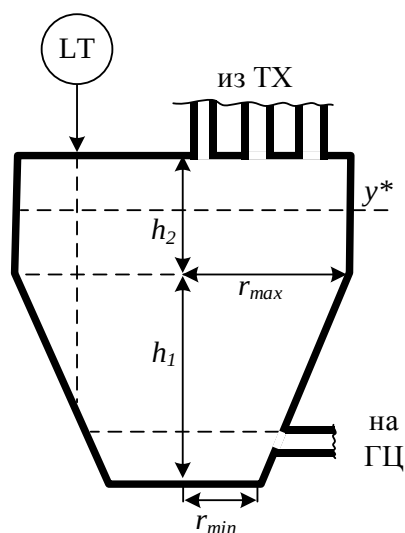


Рисунок 1 – Конструкция зумпфа

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

ЛТ - измеритель уровня;

ТХ - технологический процесс;

ГЦ - тяжелосредный гидроциклон;

y^* - заданный уровень материала;

$h_1, h_2, r_{\max}, r_{\min}$ — геометрические размеры.

Представленный на рисунке зумпф имеет форму цилиндра, переходящего в усечённый конус. При постоянной скорости изменения объёма жидкости уровень (высота) в зумпфе, такой формы будет изменяться нелинейно — с постоянной скоростью в цилиндрической части зумпфа и с возрастающей при уменьшении уровня в конусообразной (рисунок 2):

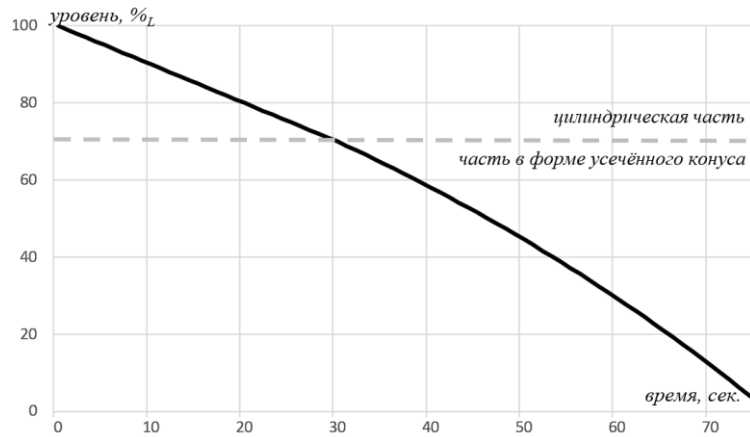


Рисунок 2 – Изменение уровня в зумпфе со сложной формой

При высокой точности регулирования, то есть поддержании заданного уровня y в небольшой окрестности y^* , коэффициент передачи k остается постоянным. При больших отклонениях y от y^* в сторону уменьшения уровня коэффициент передачи увеличивается (рисунок 3).

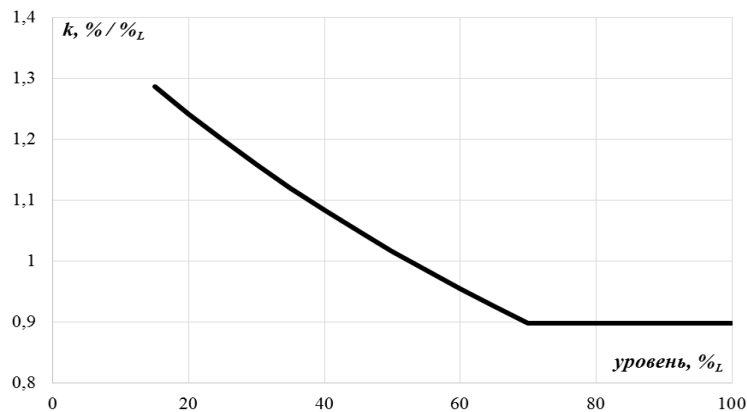


Рисунок 3 – Нелинейность коэффициента передачи k

Тогда операторы $\varphi_u(s)$, $\varphi_w(s)$ необходимо подстраивать в зависимости, например, от показателя:

$$q(t) = \frac{1}{\Theta} \int_{t-\Theta}^t \varepsilon(t) \cdot dt, \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } (y^* - y) \leq -\delta y; \\ (y^* - y) & \text{при } (y^* - y) > -\delta y. \end{cases}$$

где Θ — интервал усреднения ошибки регулирования,
 δ — допустимое ограничение.

Для подстройки операторов необходимо введение в систему управления дополнительного корректирующего элемента (закона) регулирования в зависимости от эффективности управления (рисунок 4):

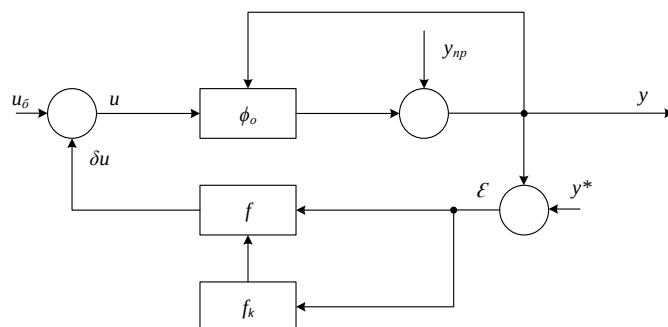


Рисунок 4 – Функциональная схема системы

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:

u — входное воздействие;

$u_{\text{б}}$ — базовое входное воздействие;

δu — управляющее входное воздействие;

y — выходное воздействие;

y^* — заданное выходное воздействие;

$y_{\text{нр}}$ — приведённые к выходу возмущения;

$\mathcal{E}$ — оценка эффективности управления;

ϕ_o — объект управления;

f — управляющая система;

f_k — корректирующий закон от эффективности управления.

При таком подходе к реализации контуров регулирования можно получить эффективность первичной настройки контура на 20-30% выше, чем традиционными методами, не учитывающими «системный эффект» [2]. Это позволяет сократить сроки пуско-наладочных работ системы, а также снизить износ основного технологического оборудования, уменьшить нагрузку на регулирующие органы запорной арматуры, снизить риск выхода параметров процессов из рабочих технологических режимов.

Библиографический список

1. Емельянов, С.В. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / Емельянов С.В., Коровин С.К., Мышляев Л.П. и др. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. — 307 с.
2. Мышляев, Л.П. Системные особенности настройки алгоритмов управления / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ивушкин К.А. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 333-336.
3. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. / В.Я. Ротач. — М.: Энергия, 1973. — 439 с
4. Емельянов, С.В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. / Емельянов, С.В., Коровин С.К. // М.: Наука. Физматлит, 1997. — 352 с.

5. Евтушенко В.Ф. Исследование систем управления с применением физических моделей / Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Макаров Г.В., Буркова Е.В. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве Труды X Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 2015. - С. 159-165

6. Евтушенко, В. Ф. Настройка систем автоматического регулирования технологических агрегатов углеобогачительных фабрик с применением многовариантных физико-математических моделей / В. Ф. Евтушенко, Л. П. Мышляев, Г. В. Макаров и др. // Научные технологии разработки и использования минеральных

7. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. Уч. пос. для вузов. М., «Высшая школа». 1973. – 296 с.

УДК 681.51

ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ СО СТРУКТУРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬЮ

Загидулин И.Р., Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Свинцов М.М.

**ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»,
г. Новокузнецк, Россия, ig.zagidulin2014@yandex.ru**

***Аннотация.** В статье рассмотрена задача прогнозирования в системах управления объектами со структурной нестационарностью и варианты ее решения. Приводится краткий обзор существующих методов прогнозирования. На примере модели объекта со структурной нестационарностью показывается необходимость решения задачи прогнозирования и предложена структура системы управления с прогнозирующей физической моделью.*

***Ключевые слова.** прогнозирование, теория подобия, автоматизация, моделирование.*

PREDICTION PROBLEM IN CONTROL SYSTEMS OBJECTS WITH STRUCTURAL NON-STATIONARITY

Zagidulin I.R., Myshlyayev L.P., Makarov G.V., Svintsov M.M.

**Research-Centre for Control Systems Ltd,
Novokuznetsk, Russian Federation, ig.zagidulin2014@yandex.ru**

***Abstract.** The paper considers the problem of forecasting in control systems of objects with structural non-stationarity and a variant of its solution. A brief review of existing prediction methods is given. On the example of a model of an object with structural non-stationarity the necessity of solving the prediction problem is shown and the structure of a control system with a predicting physical model is proposed.*

***Keywords.** prediction, similarity theory, automation, modelling.*

Существует множество методов прогнозирования явлений и процессов, которые представляют собой совокупность приемов и способов мышления, позволяющих на основе анализа ретроспективных данных, внешних и внутренних связей объекта прогнозирования, а также их измерения в рамках рассматриваемого явления или процесса вывести суждения определенной достоверности относительно будущего развития объекта [1].

Несмотря на широкое разнообразие методов прогнозирования частое применение в практике находит примерно 15–20 из них. Кроме того, существует мнение что все основные методы прогнозирования сводятся к следующим пяти, остальные же являются их различными сочетаниями и вариациями: экстраполяция, историческая аналогия, компьютерное моделирование, сценарии будущего, экспертные оценки. Подробное описание каждого из них, а также их классификация рассматриваются в [2].

Большая часть методов прогнозирования, рассматриваемых в литературе, предназначена для объектов, не охваченных прямыми и обратными управляющими связями. Другими словами, в традиционных задачах прогнозирования в явном виде не учитывается, является ли объект прогнозирования составной частью системы управления или нет. В [3] отмечается необходимость разделения объектов на два принципиально отличающихся друг от друга класса. К первому классу объектов относятся те, для которых результаты прогнозирования не оказывают никакого влияния на их свойства, состояния и значения выходных воздействий.

Ко второму классу объектов относятся те, для которых результат прогнозирования непосредственно используется при выработке воздействий управляющей системой, что, в свою очередь, через прямые и/или обратные управляющие связи приводит к изменению их свойств, состояний и фактических значений выходных воздействий. Для такого класса объектов должны использоваться другие, по сравнению с традиционными, схемы прогнозирования, которые учитывают все особенности прогнозирования управляемых объектов.

К таким решениям в системах управления относятся показавшие свою эффективность фильтры, идентификаторы [4] и прогнозаторы [5] представленные в виде замкнутых динамических систем, для которых подходит применение классических методов теории управления. Однако и эти методы не позволяют получить хорошие результаты прогнозирования для объектов, отличающихся структурной нестационарностью (переменной структурой).

Для иллюстрации задачи прогнозирования выходных переменных таких объектов рассмотрим простой пример на обогатительной фабрике ОФ «Барзасская» [6]. На рисунке 1 представлена структурная схема контура управления давлением, представленного в виде:

- бака со шламовым продуктом;
- насоса с регулируемой частотой;
- датчика давления;
- блока задвижек и гидроциклонов (ГЦ).

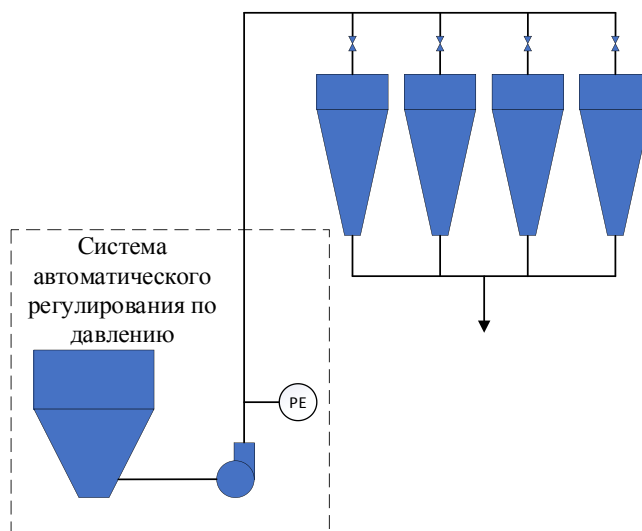


Рисунок 1 – Схема цепей агрегатов контура обогащения в тяжелосредних гидроциклонах

Задача системы автоматического регулирования состоит в поддержании постоянной величины давления на выходе насоса для обеспечения стабильной работы представленного участка технологического процесса.

Особенностью рассматриваемого контура является возможность изменения его структуры в зависимости от текущей нагрузки на обогатительной фабрике и уровне в питающем зумпфе. Т. е. в случае необходимости можно как перекрыть задвижки для части гидроциклонов, так и открыть их. В этом возникает так называемый «ударный» переход системы управления от одного значения управляющего воздействия к другому.

В виде объекта управления блок гидроциклонов представлен на рисунке 2.

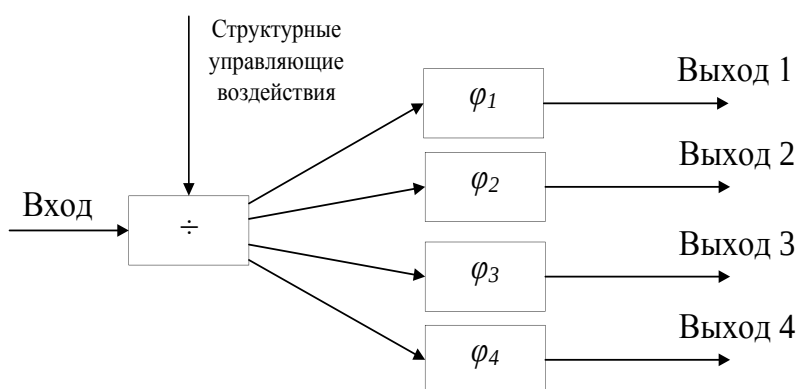


Рисунок 2 – Блок гидроциклонов как объект управления

Покажем поведение системы стабилизации давления при включении или выключении в контуре управления одного или нескольких гидроциклонов.

Передаточная функция объекта φ представлена в виде инерционного звена первого порядка и звена запаздывания, а коэффициент k_n изменяется в зависимости от количества одновременно включенных гидроциклонов в контуре, где n – число включенных ГЦ:

$$\varphi = \frac{k_n}{T_n s + 1} e^{-\tau s}$$

Система автоматического регулирования представлена пропорционально-интегральным законом, изначально настроенным при одновременной работе только двух гидроциклонов.

На рисунке 3 представлено поведение такой системы при различных сценариях.

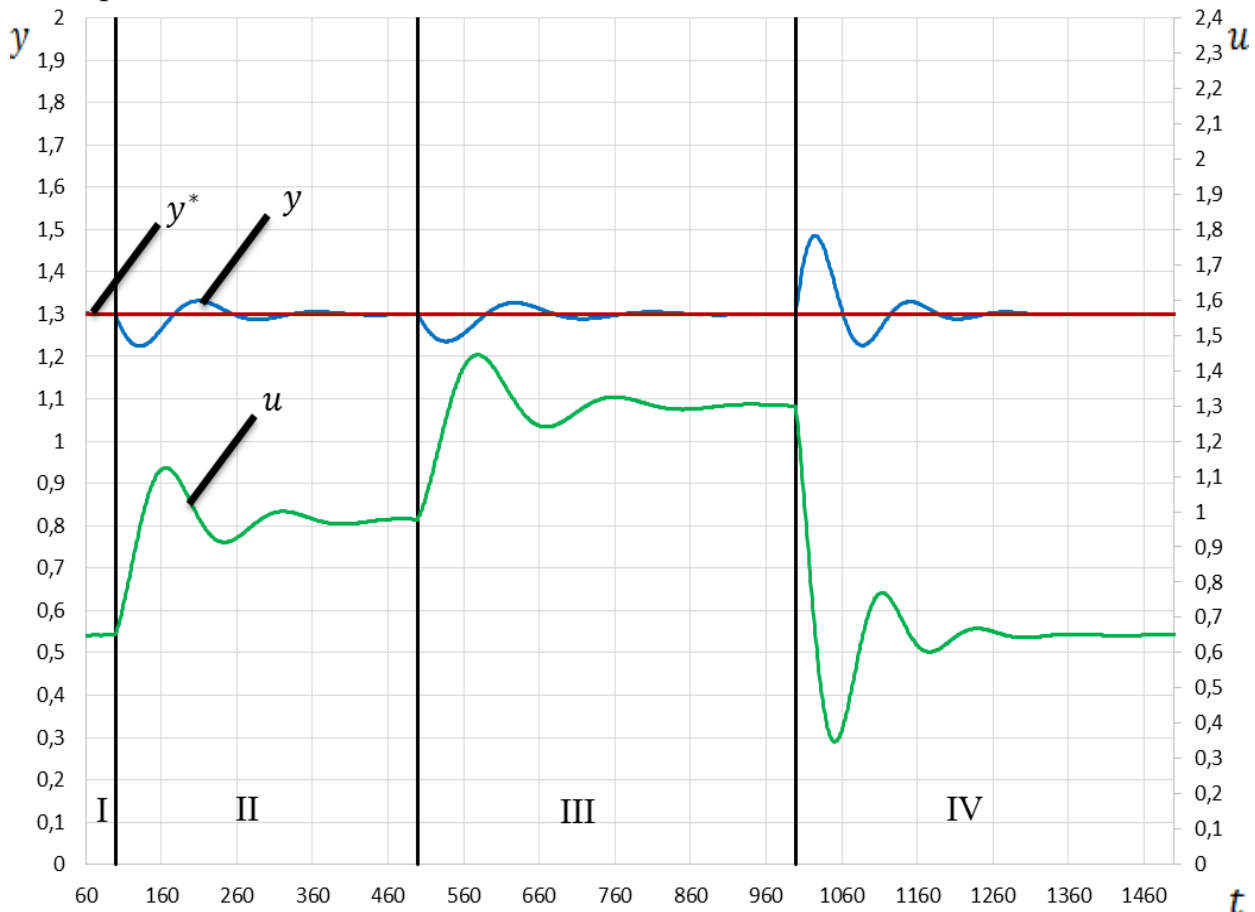


Рисунок 3 – Переходные процессы в различных ситуациях работы

I – поведение системы при нормальной работе в условиях, когда одновременно работают два гидроциклона.

II – включение в работу третьего гидроциклона, что приводит к понижению текущего давления и для компенсации регулятор повышает частоту вращения насоса и выводит её на постоянную величину. В этот момент перехода происходит потеря контроля над технологическим процессом.

III – подключение 4-го ГЦ.

IV – исключение из работы два до этого введенных гидроциклона в результате чего возникает избыток текущего давления и регулятор компенсирует это снижением частоты насоса до нового установившегося состояния.

Во всех рассмотренных ситуациях наблюдается общая картина перехода к новому режиму работы, а именно резкое повышение или понижение скорости вращения насоса для компенсации недостатка или избытка давления.

Давление, которое необходимо поддерживать для стабильной работы –

y^* , и текущее давление – y . Управляющее воздействие в виде скорости насоса – u .

Пример иллюстрирует, что возникающий эффект в системе управления от изменения структуры объекта довольно значительный и трудно прогнозируемый традиционными методами. В первую очередь это связано с различными нелинейностями и нестационарностями, которые присутствуют в объектах с переменной структурой и не позволяют предсказать эффект от изменения структуры и осуществить «безударный» переход в режиме работы.

Таким образом необходимо использовать отличающийся от традиционных методов прогнозирования способ. Как одно из решений предлагается рассмотреть вариант, при котором в натурную систему встраивается физическая модель системы [7] (рис.4.). В этом случае возможно учесть, в определенной степени, эффект от структурной нестационарности объекта посредством изучения его поведения в ускоренном времени [8] с проведением серий запланированных экспериментов на большом диапазоне изменений рабочих значений технологических переменных [9].

С точки зрения целесообразности применение такого рода решения гораздо выгоднее на любых более сложных и опасных системах по сравнению с приведенным примером т. к. влияние от понижения рисков производственных инцидентов и повышения эффективности управления за счет создания модельной системы управления в таких системах выше в связи с использованием дорогостоящего оборудования в опасных химических и физических процессах.

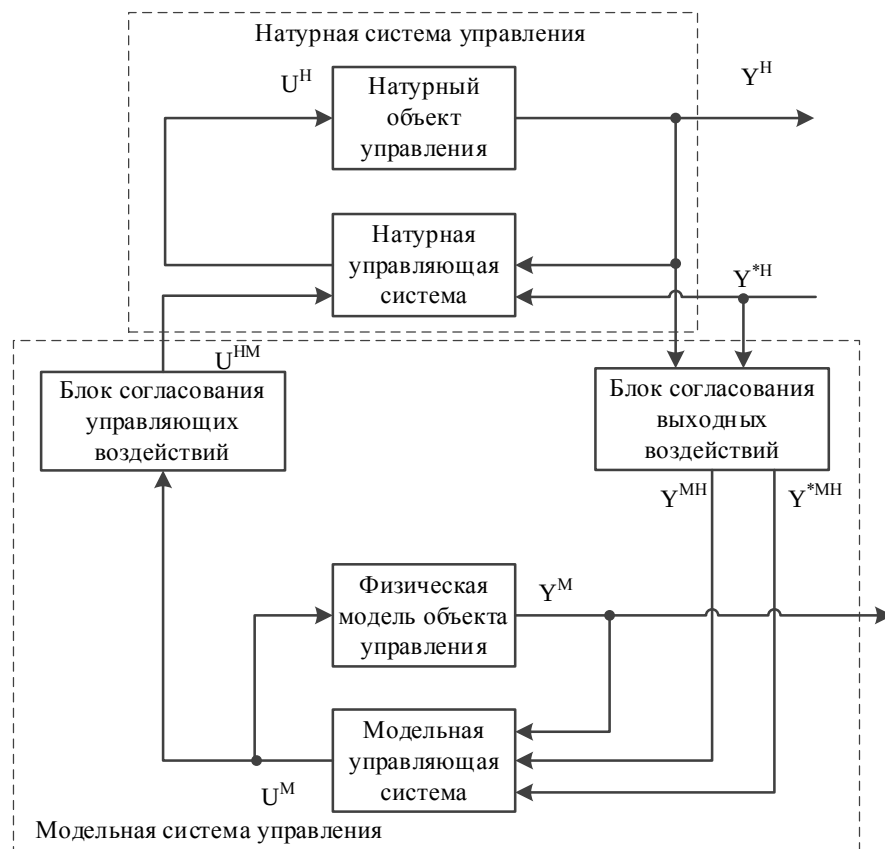


Рисунок 4 – Система со встроенной физической моделью

На рисунке 4 приняты следующие обозначения: U , Y – векторы управляющих и выходных воздействий; надстрочные индексы обозначают: «н» – натурное, «м» – модельное, * – задающее воздействия; «нм» – пересчитанное для натурального объекта модельное управляющее воздействие; «мн» – пересчитанное для физической модели натурное выходное воздействие.

Прогнозирование на предложенной структуре системы управления объектами со структурной нестационарностью связано с необходимостью применения методов теории подобия для систем управления [10], которые позволяют определить соотношения значений параметров модели и системы. В этом случае возможно на модельных значениях оценить необходимые управляющие воздействия для корректировки эффекта от изменения структуры и перенести эти воздействия согласно теории подобия в натурную систему с целью заблаговременного устранения влияния структурной нестационарности таким образом обеспечивая «безударный» переход в режиме работы системы.

Библиографический список

1. Лебедева И. М., Федорова А. Ю., Макроэкономическое планирование и прогнозирование / И. М. Лебедева, А. Ю. Федорова; под ред. А. Ю. Федоровой. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 54 с.
2. Гинис Л. А. Обзор методов научного прогнозирования / Л. А. Гинис // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. - №3(92). – С. 231–236.
3. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С. В. Емельянов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат-АСТШ; Москва: Российские университеты, 2008. – 486 с.
4. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С. В. Емельянов, С. К. Коровин, А. С. Рыков и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. – 307 с.
5. Мышляев Л. П. Прогнозирование в системах управления / Л. П. Мышляев, В. Ф. Евтушенко; СибГИУ. – Новокузнецк, 2002. – 358 с.
6. О расширении функциональных возможностей САУ ТК ОФ «Барзасская» / Л. П. Мышляев, Г. В. Макаров, А. С. Саламатин и др. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2020. – №6. – С. 225–229.
7. Развитие систем управления с прогнозирующими физическими моделями / Л. П. Мышляев, В. Ф. Евтушенко, В. Н. Бурков и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2016. – №3(17). – С. 47–55.
8. Красовский А. А. Оптимальное управление посредством физической прогнозирующей модели / А. А. Красовский // Автоматика и телемеханика. – 1979. - №2. – С. 156–162.
9. Евтушенко В. Ф. О натурно модельном подходе и теории подобия применительно к системам управления / В. Ф. Евтушенко, А. А. Ивушкин, К. Г. Венгер и др.// Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019: труды XII Всероссийской научно-практической конференции.

– Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. – С. 21–24.

10. Макаров Г.В. Развитие методов и алгоритмов теории подоби́я для систем управления. – Томск, 2021. – 26 с.

УДК 65.011.56:004.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Коровин Д.Е.^{1,2}, Грачев В.В.^{1,2}, Макаров Г.В.^{1,2},
Кулюшин Г.А.^{1,2}, Скударнова Н.В.¹.**

**¹Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия**

**²Научно-исследовательский центр систем управления,
Новокузнецк, Россия**

***Аннотация.** Статья посвящена особенностям применения технологии цифровых двойников в промышленности при обучении персонала. Приведено понятие цифрового двойника, представлено место цифрового двойника в автоматизированной системе управления технологическими процессами технологического предприятия. Приведены примеры применения технологии при обучении персонала на обогатительных фабриках.*

***Ключевые слова:** цифровой двойник, автоматизация, модель, моделирование, промышленность, угольная промышленность, имитационное моделирование.*

THE USE OF SIMULATION MODELING IN THE CREATION OF DIGITAL TWINS OF LARGE INDUSTRIAL ENTERPRISES

**Korovin D.E.^{1,2}, Grachev V.V.^{1,2}, Makarov G.V.^{1,2},
Kulyushin G.A.^{1,2}, Skudarnova N.V.¹**

***Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia***

Research Center of Control Systems LLC, Novokuznetsk, Russia

***Abstract.** The article is devoted to the peculiarities of the application of digital twin technology in industry in the training of personnel. The concept of a digital twin is given, the place of a digital twin in an automated control system of technological processes of the technological enterprise is presented. Examples of technology application in the training of personnel at concentrators are given.*

***Keywords:** digital twin, automation, model, simulation, industry, coal industry, simulation modeling.*

Введение

Историю человечества можно поделить на два неравных периода. Первый период – это общество до промышленной революции, «традиционное общество». Второй период – это период после промышленной революции, «индустриальное общество». В «индустриальном обществе» роль науки и техники более очевидна, чем в «традиционном».

Если обратиться к истории развития промышленных революций Industry (рисунок 1), то предпосылки к появлению и реализации цифровых двойников были заложены еще на этапе Industry 1.0, в тот момент, когда человек начал изучать существующие объекты и создавать новые материальные изделия с помощью технологий механизации производства. Начиная с Industry 1.0, в своей деятельности человек постоянно использовал виртуальные модели-двойники [1]. На ранних этапах (Industry 1.0, Industry 2.0) такие модели человек создавал в своем воображении, перенося их на бумагу. В настоящее время (Industry 4.0) цифровые двойники создаются с помощью компьютерной техники и специализированного программного обеспечения, используя современные методы моделирования, системного анализа, обучения, а также технологии получения данных через «умные» датчики, интернета вещей, искусственного интеллекта, больших данных [2].



Рисунок 1 – Процесс перехода от первой промышленной революции Industry 1.0 к четвертой промышленной революции Industry 4.0

Понятие «цифровой двойник». «Цифровой двойник» (digital twin) определяется как виртуальное представление физического объекта или системы на протяжении их жизненного цикла с использованием в реальном времени данных интеллектуальных датчиков [3].

Цифровой двойник в широком смысле можно рассматривать как цифровую копию (модель) физического (натурного) объекта или процесса, позволяющую решать различные задачи научного, исследовательского и прикладного характера. В узком смысле под цифровым двойником понимается цифровая (натурно-математическая, имитационная) модель отдельного технологического агрегата, установки или промышленного комплекса в целом,

создаваемая для задач изучения его поведения при различных условиях и воздействиях, оказываемых на него [4].

Ключевые отличия цифрового двойника от обычной информационной модели:

1) Цифровой двойник продолжает собирать данные с реального объекта на протяжении всего жизненного цикла физического объекта, а не только в процессе разработки и реализации.

2) Интерактивность, которая позволяет моделировать различные ситуации и проводить эксперименты над копией объекта без риска нанести ущерб оригиналу. При этом имеется возможность перенести результаты моделирования на реальный объект.

Построение, внедрение и эксплуатация цифровых двойников в производстве является одной из важных составляющих цифровой трансформации.

Цифровая трансформация качественно улучшает бизнес-процессы крупного промышленного предприятия за счёт внедрения инноваций. Также адаптируются бизнес-модели для удовлетворения условиям современной цифровой экономики. На рисунке 2 представлены основные особенности управления предприятием в условиях цифровизации.

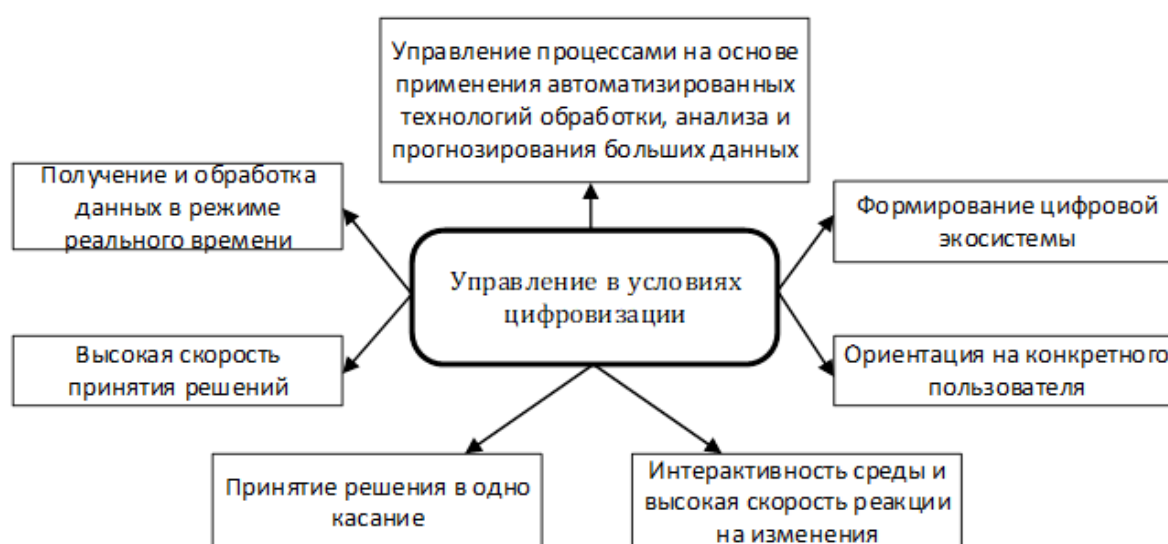


Рисунок 2 – Особенности управления крупным промышленным предприятием в условиях цифровизации

Существующие методы и инструменты не всегда позволяют снизить риски и решить проблему реорганизации бизнес-процессов компании на различных этапах.

Цифровые двойники в автоматизированной системе управления технологическими процессами крупных промышленных предприятий. Основной целью создания цифровых двойников является оптимизация производственных и бизнес-процессов, однако сфера применения этим не ограничивается – представляется возможным использовать цифровые двойники технологических процессов в том числе и для обучения персонала предприятий, в первую очередь операторов автоматизированных систем управления техно-

логическим процессом (АСУ ТП) [5].

Цифровой двойник для этих целей может получать данные о технологическом процессе напрямую от программируемого логического контроллера (рисунок 3):

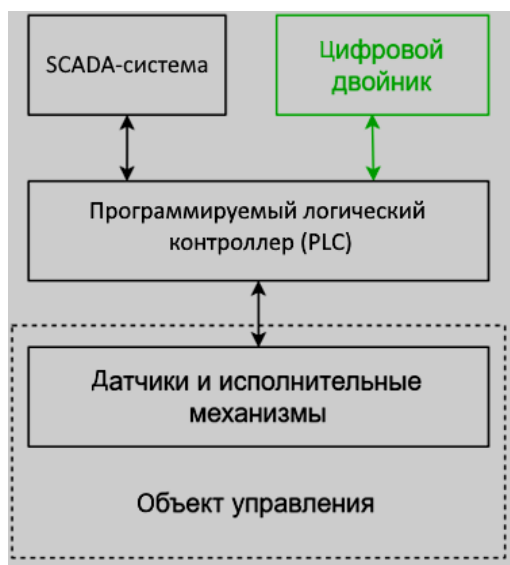


Рисунок 3 – Место цифрового двойника в структуре АСУ ТП

На текущий момент степень цифровизации промышленности достаточно высока – внедрены системы автоматизированного управления, предполагающие, в том числе, оперативный контроль и долгосрочное хранение контролируемых параметров технологических процессов и оборудования. Цифровые аналоги стандартных объектов были разработаны и отлажены в нескольких отраслях промышленности

Прохождение обучения оперативно-диспетчерского персонала на натуральных объектах связано с рядом сложностей. При обучении на натурном объекте может возникнуть опасность аварии на крупных промышленных предприятиях при некорректных действиях обучающихся: невозможно исключить потенциально неправильные (ошибочные) входные воздействия, формируемые обучающимся оперативно-диспетчерским персоналом, которые оказывают негативное влияние на выходные показатели натурального объекта [6].

Обучение на цифровых двойниках может осуществляться как в учебных лабораториях университета с использованием натурно-модельных данных, так и непосредственно на технологических объектах с использованием только натуральных данных, поступающих в модельный контур цифрового двойника. В последнем случае цифровой двойник будет получать входные данные с натурального объекта в режиме реального времени через физические датчики, при этом выходные данные с цифрового двойника в действующую систему не передаются.

Использование цифровых двойников при обучении персонала предприятий. Использование цифровых двойников в сочетании с методами имитационного моделирования при обучении персонала предприятий имеет большие преимущества перед традиционными формами их обучением на натуральных объектах.

Приведем пример обучения операторов АСУ ТП погрузки концентрата углеобогадательной фабрики «Антоновская» (г. Новокузнецк Кемеровской обл.).

При обучении операторов АСУ ТП погрузки для взаимодействия с цифровым двойником был использован интерфейс, максимально близко повторяющий операторский интерфейс SCADA-системы, с помощью которого производится управление погрузкой концентрата на углеобогадательной фабрике «Антоновская» (рисунок 4).

На первом, подготовительном этапе обучения операторы с помощью цифрового двойника знакомятся с интерфейсом SCADA-системы, отрабатывают на модели типовые задачи и ситуации, которые могут возникнуть в процессе работы комплекса, например, реализуют процедуру планового запуска/останова комплекса в различных режимах управления – режим «Автомат», режим «Дистанция», режим «Местный».

На втором, основном этапе обучения помимо штатных ситуаций на цифровом двойнике моделируются различные внештатные ситуации – сход ленты конвейера, переполнение бункера, отказы технологического оборудования и т.п.

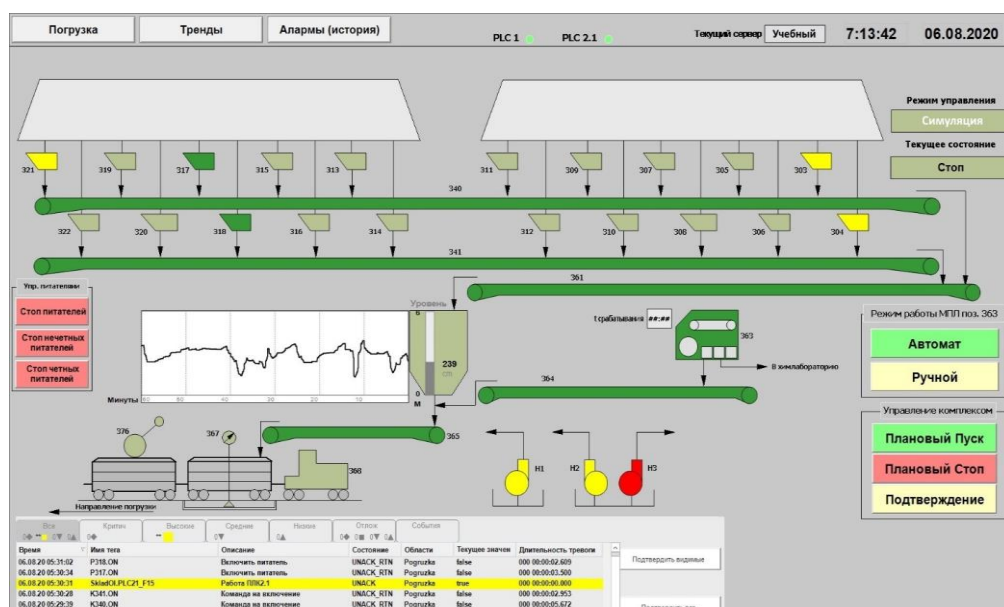


Рисунок 4 – Интерфейс цифрового двойника комплекса погрузки концентрата обогатительной фабрики «Антоновская»

Таким образом операторы комплекса погрузки имеют возможность отработать свои действия при наступлении различных ситуаций на цифровом двойнике и быть готовыми к их появлению на натурном объекте [7].

Такой вариант обучения с использованием цифрового двойника АПК погрузки показал свою эффективность как для начинающих операторов, не имеющих практических навыков управления, так и для опытных операторов погрузки.

Другим примером использования цифровых двойников может послужить ситуационный центр обогатительной фабрики «Шахта №12» (г. Киселевск Кемеровской обл.).

На данном объекте цифровой двойник служит не только цели обучения персонала, но также позволяет прогнозировать изменения в контуре как в краткосрочном, так и долгосрочном отрезке времени. На рисунке 5 показана имитационная модель питания гидроциклона 1. Помимо непосредственных параметров контура в данном примере отображены графики натурных (обозначается «Н») и имитационных данных (обозначается «НМ» – натурно-модельные).

На данный момент имитационные модели реализованы лишь для некоторых технологических контуров. Данное ограничение связано с отсутствием части ключевых натурных датчиков, показания которых, необходимы для построения имитационных моделей. На рисунке 6 показан пример различных технологических контуров, на которых реализованы имитационные модели.

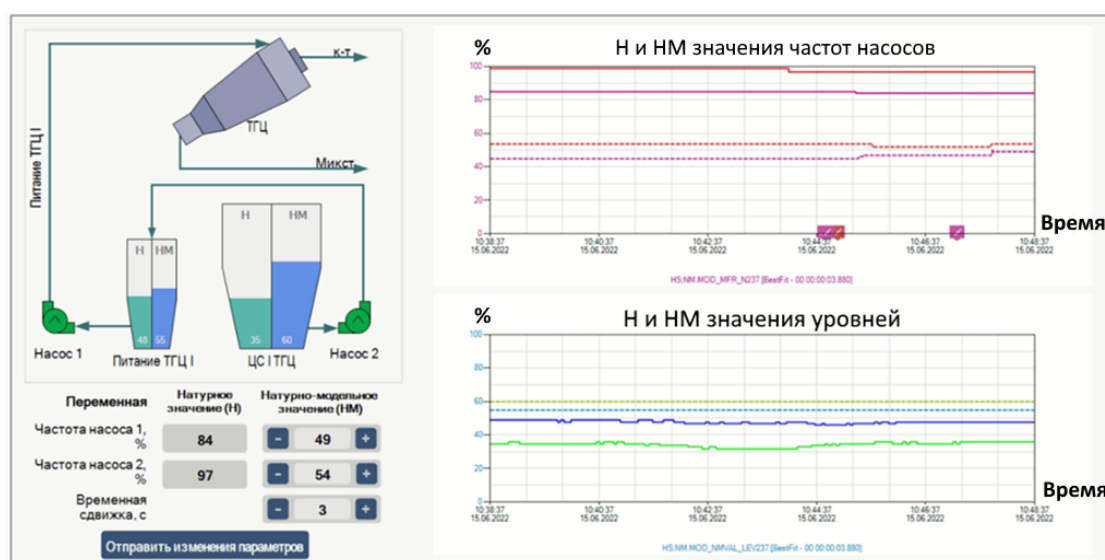


Рисунок 5 – Имитационная модель «Питание гидроциклона 1»

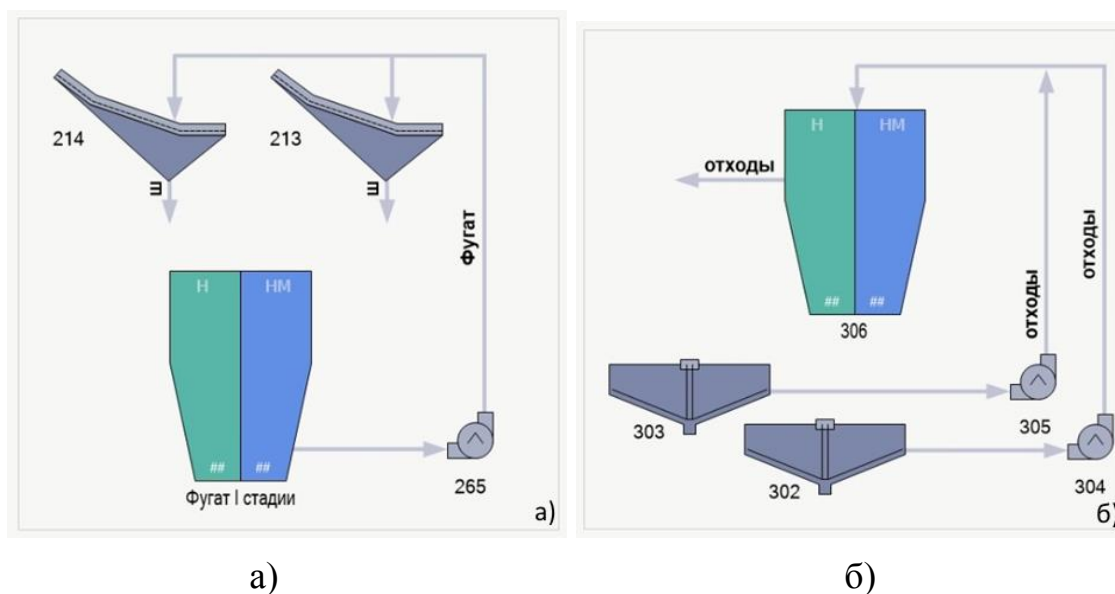


Рисунок 6 – Пример технологических контуров: а) фугат I стадии; б) радиальные сгустители поз. 302, 303

Разработанные имитационные модели технологических контуров в дальнейшем будут интегрированы в ситуационный центр обогатительной фабрики. На рисунке 7 показан пример расположения различных видеокадров на видеостене ситуационного центра. Данный ситуационный центр функционирует на базе видеостены, состоящей из восьми 55” панелей, на которых отображаются, в зависимости от ситуации, следующие видеокадры:

- диспетчерские видеокадры главного корпуса (А), флото-фильтровального отделения (Б), сушильно-топочного отделения (В), погрузки (Г);
- графики с ключевыми технологическими параметрами (Д);
- дашборд с ключевыми экономическими параметрами (Е);
- имитационная модель выбранного контура (Ж);
- видеопотоки с ip-камер наблюдения (З);

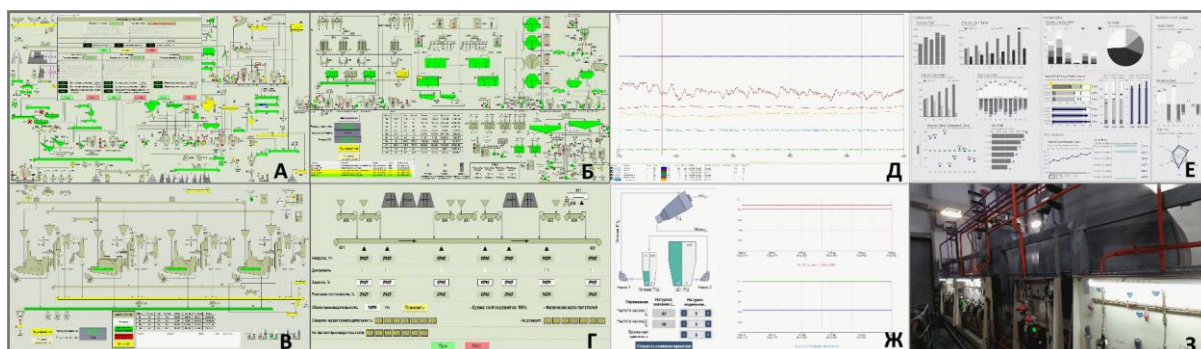


Рисунок 7 – Интерфейс видеостены ситуационного центра

Заключение

На современном этапе в глобальном информационном обществе активно формируется новый экономический уклад – цифровой. Цифровизация экономических процессов и проникновение информационных технологий происходит во всех сферах. Возникают новые требования к конкурентным преимуществам предприятий и концепциям их применения и управления.

На данный момент слабо развита научная и практическая база как для создания цифровых двойников, так и для воплощения в производстве, образовании и научной деятельности сложных полноценных АСУ ТП. Необходимо создание новых и совершенствование существующих АСУ ТП, их цифровая трансформация на крупных промышленных предприятиях с учетом повышенных требований к уровню цифровизации. Одним из основных инструментов для цифровой трансформации являются цифровые двойники с использованием технологий имитационного моделирования. Это позволит ускорить обучение персонала предприятия. При этом, благодаря моделированию протекающих технологических процессов, обеспечит прогнозирование изменений в контуре как в краткосрочном, так и долгосрочном периоде времени.

Библиографический список

1. Шваб, К. Четвертая промышленная революция. / К. Шваб – М.: Эксмо– Пресс, 2018. – С. 208.

2. Смолькин А.Е. Индустриальные революции и их особенности. / А.Е. Смолькин, В.Н. Буйнов – Символ науки: международный научный журнал. 2016. № 4-3 (16). С. 124-127.

3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения

4. Экспертно-аналитический доклад "Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности" -М.: Технет,2019. – С.43-46

5. Грачев В.В., Мышляев Л.П., Венгер М.К., Пургина М.В., Коровин Д.Е., Кулюшин Г.А. Применение технологий Industry 4.0 при создании автоматизированных промышленных комплексов // Сборник научных трудов НГТУ. –: НГТУ, 2021. – С. 7–20.

6. Грачев В.В., Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Свинцов М.М., Коровин Д.Е. Использование цифровых двойников при обучении оперативно-диспетчерского персонала автоматизированных промышленных комплексов // Материалы V Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы современного образования: практика вуза и школы». Часть 2». –: Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2021.

7. Коровин Д.Е. Цифровой двойник: понятие и перспективы использования в угольной отрасли. / Коровин Д.Е., Грачев В.В., Мышляев Л.П., Иванов Д.В., Кулюшин Г.А., Загидулин И.Р., Свинцов М.М., Макаров Г.В. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – №7. – С. 227 – 231.

УДК621.3.078

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАНТОВАНИЯ УГОЛЬНОГО ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЯ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ "ПЧ-АД"

Клевцов С.А., Модзелевский Д.Е.

***Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, klevtsov1999@mail.ru, dima010@mail.ru***

Аннотация: Рассматриваются основные проблемы эксплуатации угольных вагоноопрокидывателей. Представлена кинематическая схема угольного вагоноопрокидывателя роторного типа. Произведен анализ отказов и неисправностей электропривода кантования. Рассчитаны статические и динамические моменты на валу электродвигателя, построена тахограмма цикла работы вагоноопрокидывателя. Выбрана система управления электроприводом.

Ключевые слова: угольный вагоноопрокидыватель, двухдвигательный привод, преобразователь частоты, тахограмма, статические моменты, динамические моменты, электропривод.

MODERNIZATION OF THE RELAY-CONTACTOR CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC ROTATION DRIVE OF THE WAGON TIPPLER TO THE CONTROL SYSTEM "PCH-AD"

Klevtsov S.A., Modzelevsky D.E.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, klevtsov1999@mail.ru , dima010@mail.ru*

Abstract. *The main problems of operation of coal wagon tippler are considered, the kinematic scheme of a rotary type coal wagon tippler is presented. The analysis of failures and malfunctions of the electric tilting drive was carried out. Static and dynamic moments on the shaft of the electric motor are calculated, a tachogram of the cycle of operation of the wagon tippler is constructed.*

Keywords: *coal wagon tippler, twin-motor drive, frequency converter, tachogram, static moments, dynamic moments, electric drive.*

Погрузочно–разгрузочный транспортный комплекс современного аглодоменного производства представляет собой ряд технико - производственных средств, обеспечивающих перевозку, транспортировку и отгрузку рудного сыпучего сырья. Внутрицеховая транспортировка реализуется путем железнодорожных перевозок широкой колеи. К таким относятся вагоны магистрального типа (полувагоны – гондолы, полувагоны – хопперы, платформы, крытые вагоны) и специальные вагоны (хопперы для транспортировки окатышей, думпкары для производственных отходов, большегрузные платформы, шлаковозы и т.д.). Для всех видов работ связанных с перевозкой на прирельсовых сырьевых складах используют стреловые передвижные железнодорожные краны. Для наиболее быстрого перемещения сырья в качестве межцехового транспорта применяются ленточные, пластинчатые, скребковые, подвесные конвейеры [1].

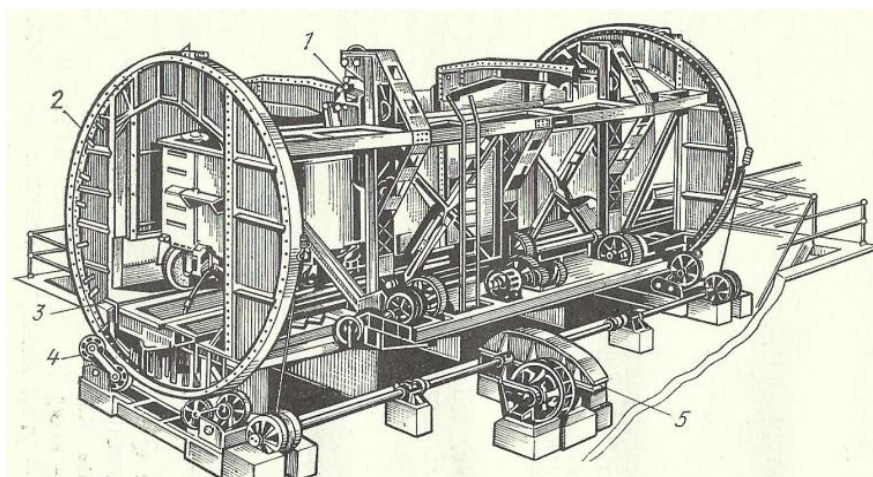
Угольный вагоноопрокидыватель служит важнейшим звеном в погрузочно-разгрузочной системе аглодоменного предприятия. Опрокидыватели применяются с целью разгрузки рудного сырья из полувагонов путем опрокидывания [2].

В данной работе будет рассмотрен угольный вагоноопрокидыватель роторного типа ВРС 93-110М.

На рассматриваемом вагоноопрокидывателе используется нерегулируемый асинхронный привод, построенный на релейно–контакторной системе управления. Основной привод воздействующий на рабочее колесо (ротор) представляет собой два равнозначных асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором, располагаемой мощностью 60 кВт каждый.

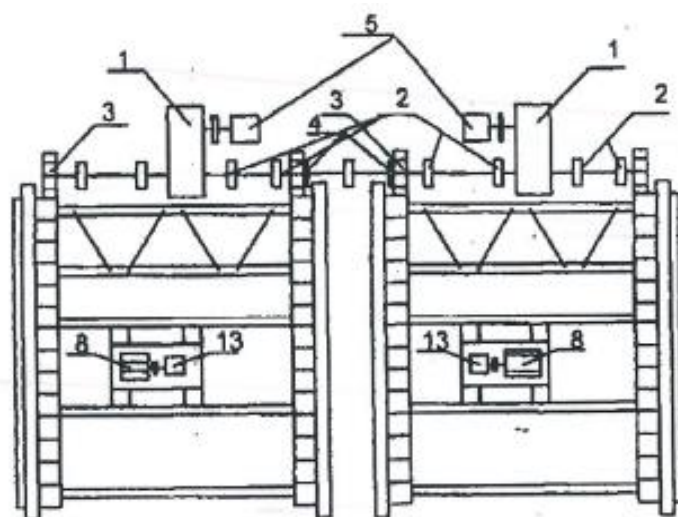
По техническому паспорту данный тип опрокидывателей способны совершать до 25 количество циклов полувагонов/час. Следовательно, за сутки опрокидыватель способен разгрузить 540-600 полувагонов.

Угольный вагоноопрокидыватель роторного типа изображен на рисунке 1, обобщенная кинематическая схема изображена на рисунке 2.



1 – механизм зажима вагонов; 2 – металлическая рама (ротор); 3 – подвижный толкатель; 4 – опорные балансирующие катки; 5 – канатный привод

Рисунок 1 - Угольный вагоноопрокидыватель роторного типа ВРС 93-110М



1 – редуктор; 2 – зубчатые муфты; 3 – открытая зубчатая пара; 4 – подшипник качения; 5 – электродвигатель привода; 8 – подшипник вибратора; 13 – электродвигатель вибратора

Рисунок 2 - Общая кинематическая схема роторного вагоноопрокидывателя ВРС 93-110М

На сегодняшний день важным вопросом применения вагоноопрокидывателей служит ресурс применяемых приводов. Ресурс производительности приводов определен процессом эксплуатации в производстве. Привода функционируют в повторно – кратковременном режиме работы с большой периодичностью включения и большими моментами инерции. Тяжелые условия работы электропривода обусловлены частыми прямыми пусками, высокой интенсивностью работы приводят к поломкам, выводам электроприводов из строя [3].

Проведем анализ отказов и неисправностей электроприводов кантования предоставленных участком угольного вагоноопрокидывателя АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в виде гистограммы.

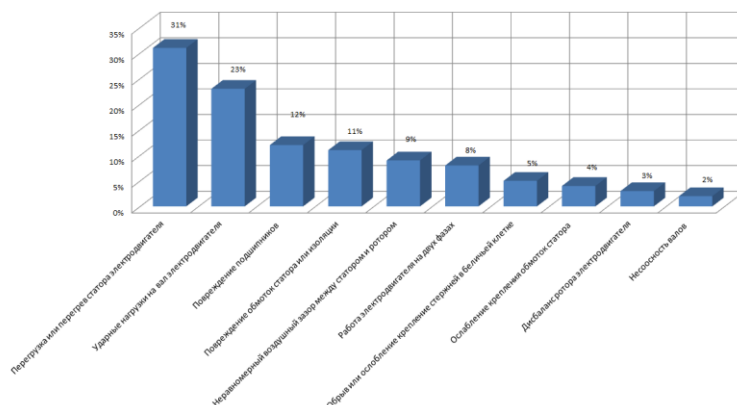


Рисунок 3 - Гистограмма отказов и неисправностей электропривода кантования угольного вагоноопрокидывателя «ЕВРАЗ ЗСМК» за 2022 г

Согласно гистограмме, наибольшее количество нагрузок приходится на статор, механическую часть (вал электродвигателей, подшипники). Следствием анализа данных гистограммы можно отнести производственные потери предприятия, утраты прибыли, большие расходы на восстановление.

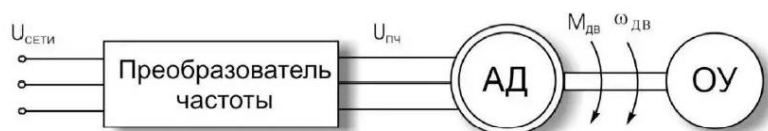
Правильным решением данного вопроса служит усовершенствование приводов вагоноопрокидывателей, без внедрения в его механическую часть.

Важной целью усовершенствования привода ротора опрокидывания является увеличение КПД, уменьшение динамических нагрузок, создании плавности пуска и останова, увеличении диапазона регулирования и соответственно надежность и долговечность.

Достижением поставленных целей модернизации являются следующие задачи:

- анализ возможных методов реализации системы управления;
- анализ возможных проблем модернизации системы управления, разработка путей решения;
- создание модели электромеханической части опрокидывателя;
- анализ и исследование возможности реализации системы управления различными методами достижения поставленных в данной работе задач;
- поиск верных алгоритмов управления;

Рациональным способом реализации вышеуказанных аспектов модернизации в данном случае является установка преобразователя частоты. Обобщенная функциональная схема подсоединения «ПЧ-АД» изображена на рисунке 4.



АД – асинхронный двигатель; ОУ – объект управления (ротор); $U_{\text{сети}}$ – входное напряжение; $M_{\text{дв}}$ – вращающий момент, развиваемый на валу электродвигателя;
 $\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость вращения вала двигателя

Рисунок 4 - Общая функциональная схема подключения «ПЧ-АД»

Подробно рассмотрим статические и динамические моменты оказываемые на «кантователь» и привод.

Привод механизма кантования ротора обязан преодолеть статические моменты сопротивления вращению от веса ротора, полувагона, материала и от силы трения в роликовых опорах, а также динамические моменты вращающихся масс в периоды пуска и торможения двигателя.

Графическим или расчетным путем находят координаты центров тяжести вращающихся частей вагоноопрокидывателя: ротора, полувагона и материала относительно оси вращающегося ротора при различных углах его поворота с учетом перемещения и высыпания материала из полувагона при опрокидывании и возврате ротора в исходное положение.

Для деталей или узлов сложной формы, центры тяжести определяют по формулам:

$$x_{\text{цт}} = \frac{\sum G_i \cdot x_i}{\sum G_i}; \quad y_{\text{цт}} = \frac{\sum G_i \cdot y_i}{\sum G_i}, \quad (1)$$

где G_i – вес простейших фигур, на которые расчленены ротор и полувагон;
 $x_{\text{цт}}$ и $y_{\text{цт}}$ – расстояние от их центра тяжести до выбранной оси.

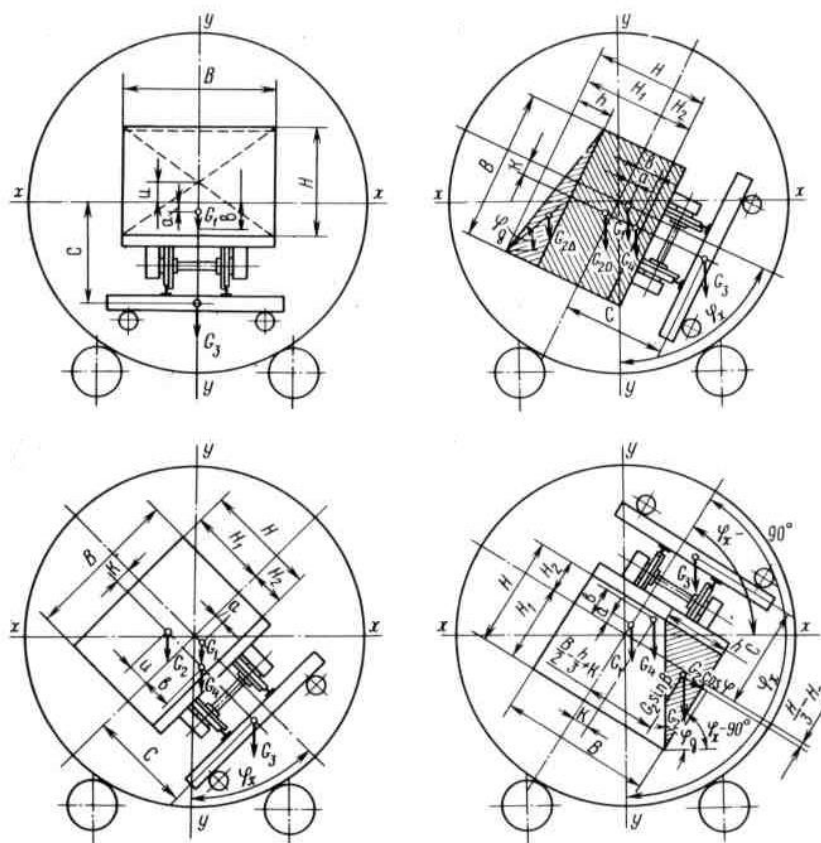


Рисунок 5 - Положение частей вагоноопрокидывателя, полувагона и материала при различных углах кантования

Зная положение центров тяжести всех частей вращающегося ротора, определяют его общий центр тяжести

Статический момент для принятых углов поворота при опрокидывании и возврате ротора:

$$M_{ст.i} = G_i \cdot x_{0i}, \quad (2)$$

где x_{0i} – плечо.

Моменты сил трения в роликовых опорах, как и в случае расчета статических моментов, эти моменты определяют для различных углов поворота ротора при его опрокидывании и возврате в исходное положение.

Общий момент сил трения, приведенный к оси ротора состоит из моментов сил трения в подшипниках опорных роликов $M_{тр1}$ и сил трения качения бандажей ротора по опорным роликам $M_{тр2}$.

$$M_{три} = N_{pi} \cdot \frac{R_6}{r_p} \cdot z \cdot (r_{ц} \cdot f_{пр} + k), \quad (3)$$

где N_{pi} – реакция ролика (кН);

$r_{ц}$ – радиус цапфы;

$f_{пр}$ – приведенный коэффициент трения подшипников качения опорных роликов;

z – число опорных роликов;

R_6 – радиус бандажа ротора;

r_p – радиус опорного ролика.

$$N_{pi} = \frac{\sum G_i}{(z \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)}; \quad (4)$$

где α, β – углы, определяющие положение опорных балансиров и роликов.

Суммарные статические моменты, приведенные к валу двигателя:

$$M_{ст.пр.i} = \frac{M_{ст.i} + M_{три}}{u \cdot \eta}, \quad (5)$$

где u – общее передаточное число привода;

η – к.п.д. привода.

При работе двигателя в генераторном режиме:

$$M_{ст.пр.i} = \frac{M_{ст.i} + M_{три}}{u} \cdot \eta. \quad (6)$$

По полученных значениям $M_{ст.пр.i}$ строим график статических моментов на валу двигателя.

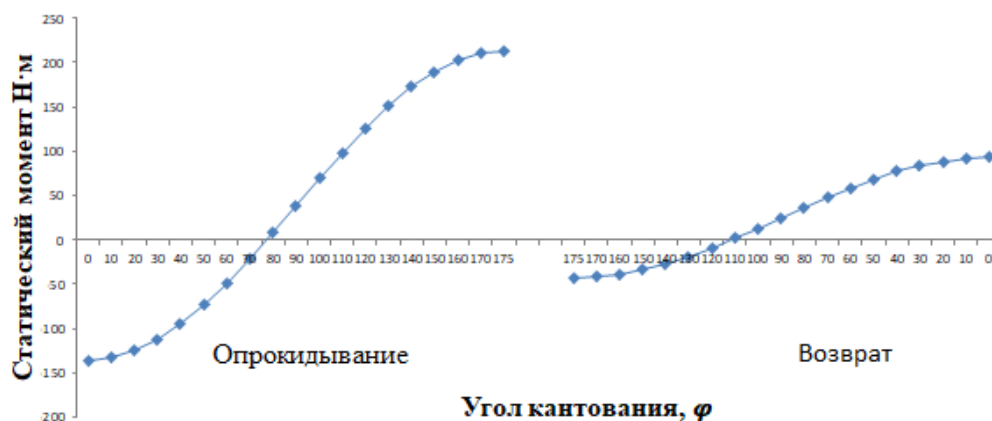


Рисунок 6 - График статических моментов на валу двигателя от угла кантования

Анализируя график статических моментов на валу электродвигателя можно отметить, что при опрокидывании момент статический гораздо больше, чем при возврате. Данный факт свидетельствует о загруженности приводов в зависимости от массы полувагона и груза.

Тахограмма работы вагоноопрокидывателя «ВРС 93-110М» изображена на рисунке 7.

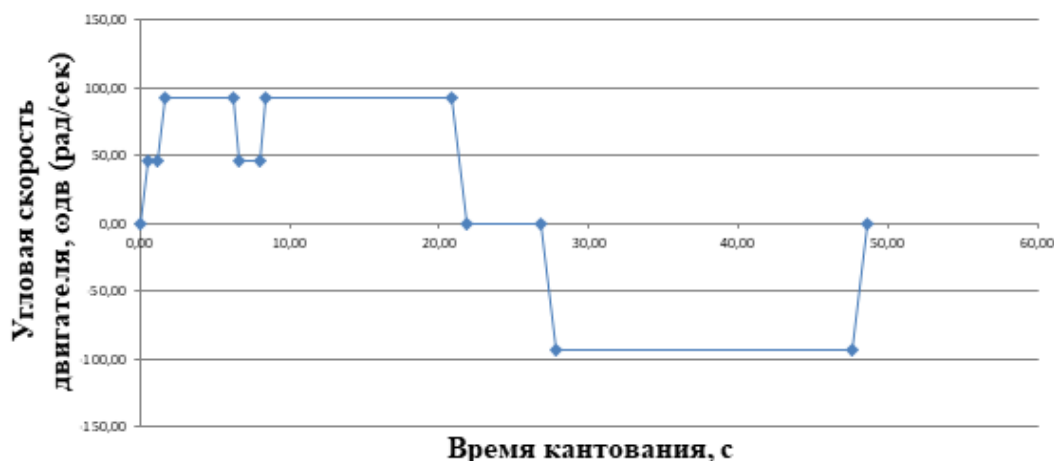


Рисунок 7 - Тахограмма работы вагоноопрокидывателя

Время работы «кантователя» - вагоноопрокидывателя составляет 48,6 с. из которых 5 с. отводится на паузу, при котором угловая скорость равняется 0. Время всего цикла работы составляет 103,6 с.

Циклом является процесс постановки полувагона, опрокидывания, паузы перед возвратом в исходное положение, возврат полувагона, выталкивания и постановки нового полувагона.

Общий динамический момент, определяемый отдельно для периодов пуска и торможения, на валах двигателей (двух).

$$M_D = \frac{mD_{пр}^2 \cdot n}{38,3 \cdot t_n} + \frac{J_{общ} \cdot \varepsilon}{i \cdot \eta}, \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (7)$$

где $mD_{пр}^2$ – приведенный к валу двигателя суммарный маховый момент вращающихся масс привода;

n – частота вращения вала двигателя;

t_n – время пуска двигателя;

$J_{общ.}$ – суммарный момент инерции отдельных вращающихся масс вагоноопрокидывателя (ротора с венцами и бандажами, платформы, люльки, порожнего полувагона и материала) относительно оси вращения ротора;

$$J_{общ.} = \sum m_i \frac{D_i^2}{4} \text{ кг} \cdot \text{м}. \quad (8)$$

Моменты на валу двигателя для заданных углов поворота (кН·м):

$$M_{двi} = M_{ст.прi} + M_{дин.п(т)i}. \quad (9)$$

По полученным значениям $M_{двi}$ строим нагрузочную диаграмму.

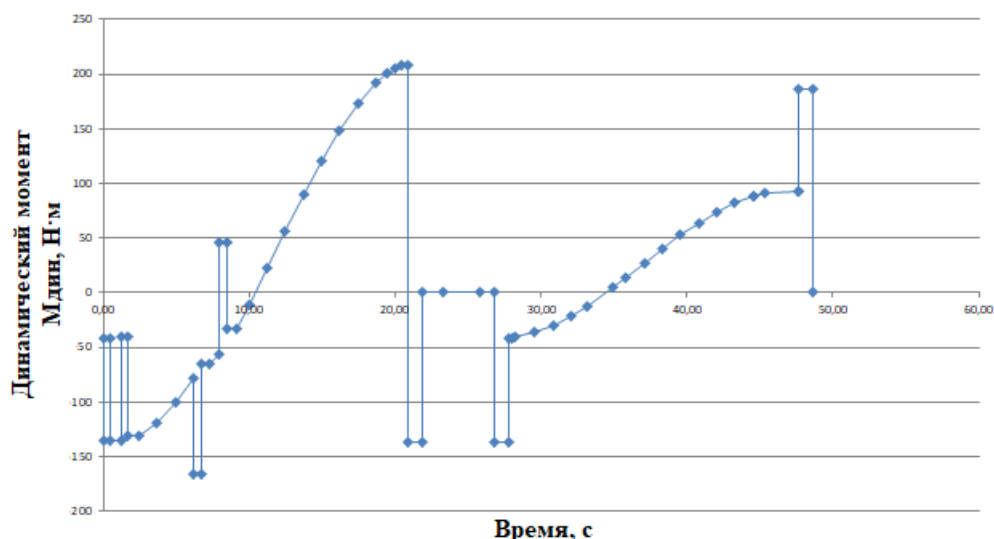


Рисунок 8 - График зависимости динамического момента электропривода от времени кантования

По графику следует отметить, что наброс динамического момента происходит в моменты разгона и торможения. Плечи усилий при кантовании непрерывно меняются, ток приведенный к валу электродвигателя, момент инерции от люльки, полувагона с материалом и противовесом являются функцией угла α .

Следовательно, динамические моменты от этих элементов действуют на протяжении всего цикла кантования люльки. Однако наиболее существенные величины динамических моментов возникают в периоды разгона и торможения привода. Одним из нагруженных узлов угольного вагоноопрокидывателя является его обод.

Результатом проделанного исследования является выбор электропривода с преобразователем частоты, полезного и менее энергозатратного по своим характеристикам для вагоноопрокидывателя который будет положен в основу построения системы управления.

По реальным параметрическим данным рассчитаны графики статических и динамических моментов реального электропривода, построена тахограмма работы электропривода, которая в первом приближении указывает на повторно-кратковременный режим работы электропривода.

Моделирование системы управления позволит в дальнейшем оптимизировать параметры и настроить электропривод на работу в определенных для него условиях.

Полученные данные позволяют выбрать наиболее экономичный электропривод. На практике применяют электрическое оборудование с огромным запасом по мощности, что приводит к недоиспользованию электродвигателя, а следовательно, к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов за счет снижения КПД и коэффициента мощности.

Библиографический список

1. Металлургические подъемно-транспортные машины: [Учеб. для металлург. спец. вузов] / В. А. Кружков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Метал-

лургия, 1989. - 462 с.

2. Механическое оборудование фабрик для окускования железорудного сырья [Текст] / Э.В. Ловчиновский. - Москва: Металлургия, 1977. - 255 с.

3. Эксплуатация и ремонт электрических машин: Учеб. Пособие для спец. «Электромеханика» вузов/ М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец. – Москва: «Высшая школа» 1989. – 192 с.

4. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – Москва: «Энергоатомиздат», 1983. – 616с.

УДК 658.5

СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ, ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ

Макаров Г.В.¹, Мышляев Л.П.², Чинахов Д.А.¹, Ивушкин К.А.³

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, gmakarov@nicsu.ru*

²*ООО «Научно-исследовательский центр систем управления,
г. Новокузнецк, Россия*

³*ООО ОК «Сибшахтострой», г. Новокузнецк, Россия*

***Аннотация.** В работе поднимаются вопросы рационального замещения интеллектуальных, программных и технических средств систем управления. Не всегда возможно найти прямой аналог какого-либо продукта при всем разнообразии производственных задач и имеющегося в мире ассортимента решений. Для систем управления наиболее важными стали поиски замены программного обеспечения для оперативно-диспетчерского управления и программируемых логических контроллеров. При этом вопросам замещения интеллектуальных средств систем управления внимания практически не уделяется.*

***Ключевые слова:** АСУ ТП, системы управления, автоматизация, импортозамещение*

SYSTEMIC ASPECTS OF SUBSTITUTION OF CONTROL INTELLIGENT TOOLS, SOFTWARE AND HARDWARE

Makarov G.V.¹, Myshlyaev L.P.², Chinakhov D.A.¹, Ivushkin K.A.¹

¹*"Siberian State Industrial University",
Novokuznetsk, Russia, gmakarov@nicsu.ru*

²*LLC "Research Center for Control Systems", Novokuznetsk, Russia*

²*LLC United Company "Sibshakhtostroy", Novokuznetsk, Russia*

***Abstract.** The paper raises the issues of rational replacement of intellectual, software and technical means of control systems. It is not always possible to find a*

direct analogue of any product with all the variety of arising production tasks and the range of solutions available in the world. For control systems, the search for replacement of software for operational dispatch control and programmable logic controllers has become the most critical. At the same time, almost no attention is paid to the issues of replacement of intellectual means of control systems.

Keywords: APCs, control systems, automation, import substitution.

Проблемы импортозамещения при создании и эксплуатации систем автоматизации управления следует рассматривать комплексно, включая интеллектуальные, программные и технические средства.

Системы управления – это сложные комплексы, требующие разработки и объединения множества видов обеспечения: математического, информационного, лингвистического, программного, технического, метрологического, организационного, методического, требования к которым закладываются на этапе формирования технического задания [1]. При разработке комплекса всех этих видов обеспечения необходимо руководствоваться принципами системности, развития, совместимости, стандартизации и унификации, а также и эффективности [2]. В условиях большого разнообразия предлагаемых на современном рынке решений не представляет труда собрать готовую систему управления, которая бы подходила и была оптимальна по технико-экономическим показателям для решения поставленных задач. Однако, любые ограничения, связанные с каким-либо элементом АСУ, значительно снижают возможности совместимости с другими, сужают выбор, что ведет к проблемам разрозненности и потери системности.

Путь упрощения и перехода на примитивные решения в области автоматизации в условиях следования трендам индустрии 4.0, цифровой трансформации и цифровизации производств и экономики в целом приводит к разрушению необходимых ступеней, что не позволяет перейти на нужный уровень «цифровой зрелости», или даже сохранить его.

Для диспетчеризации и автоматизированного оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ) востребованы в настоящее время запросы на поиск аналогов и замену программного и технического обеспечения АСУ.

SCADA-система является неотъемлемой частью современной АСУ ТП, представляя собой программный комплекс для отображения информации, дистанционного управления отдельными механизмами и комплексами, визуализации архивных и онлайн данных, и других функций. На отечественном рынке можно выделить следующих лидеров, представляющих свои решения для оперативно-диспетчерского управления и контроля (рисунок 1):

1. MasterSCADA (<https://insat.ru/products/?category=9>);
2. TRACE MODE 6 (<http://www.adastra.ru/products/overview/>);
3. Круг-2000 (<https://www.krug2000.ru/products/ppr/scada-2000.html>);
4. SCADA Infinity (<https://elesy.ru/scada-infinity/description.aspx>);
5. Alpha.Platform (<https://www.automiq.ru/ru/products/alpha-platform>).



Рисунок 1 – Логотипы SCADA-систем

Все эти продукты поддерживают базовый функционал, возлагаемый на SCADA-систему, но функции, производительность и способы «развертки» на объекте отличаются. Это вызвано, в первую очередь, «нишевыми» данными решений. Не все эти решения предполагались для работы в крупных АСУ, некоторые из которых могут требовать для подключения более 50 тысяч «тегов» – переменных, содержащих информацию. Одним из решений может быть сегментация АСУ по отдельным «модулям» или подсистемам.

Также, если у ведущих производителей SCADA-систем (Aveva System Platform, Genesis 64) сформирован банк драйверов, необходимых для подключения практически любых устройств, то отмеченные отечественные производители, в основном, ограничиваются типовыми и популярными протоколами связи. Надо отметить, при этом, что некоторые из них предлагают услуги по разработке драйверов для подключения необходимых устройств, но это, конечно, занимает время.

Некоторые китайские производители предлагают свои решения в области SCADA и MES систем. Например, компания HollySys предлагает свой продукт MACS-SCADA. Однако проблема разработки и интеграции АСОДУ на их основе заключается в базовом языке ПО – китайском. В таком случае вести разработку на довольно проблематично, но даже при успехе могут возникнуть проблемы с отображением шрифтов или некоторыми предупреждениями, которые невозможно корректно перевести без владения китайским языком.

В плане контроллерного оборудования несомненным лидером по популярности и востребованности на отечественном рынке являлись контроллеры ОВЕН (<https://owen.ru/>). Сфера их применения довольно широка, а решения применяются в отраслях энергетики, теплоснабжения, вентиляции и сельского хозяйства. Производитель предлагает линейки моноблочных контроллеров для малых, средних и распределенных систем автоматизации, моноблочные контроллеры для средних систем автоматизации (рисунок 2).



Рисунок 2 – ПЛК «ОВЕН»

Промышленные контроллеры REGUL от компании «Прософт-Системы» (<https://prosoftsystems.ru/catalog/semejstvo-programmiruemyh-logicheskikh-kontrollerov-regul-rx00>) – универсальный инструмент для создания систем автоматизации технологических процессов любой сложности в металлургической, нефтегазовой, энергетической, горнодобывающей и других отраслях промышленности. Флагманы линейки оборудования автоматизации, выпускаемой компанией «Прософт-Системы» предназначены для построения сложных и отказоустойчивых систем управления технологическими процессами с быстроменяющимися и опасными физическими процессами. Например, сюда относится управление турбинами, оборудованием атомных станций и непрерывными процессами в нефтепереработке (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оборудование REGUL

Технические решения китайского производителя контроллеров HollySys (<https://www.hollysys.com/>) представлены двумя линейками. ПЛК серии LE подходят для управления в системах водоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, в текстильной промышленности, на оборудовании для упаковки, печати, производства пластмасс и продуктов питания, в других отраслях промышленности, где необходимы небольшие и средние системы управления. ПЛК серии LK (рисунок 4), свободно масштабируемых для больших систем. Одним из главных преимуществ этих контроллеров является возможность построения на базе Profibus. Таким образом

корзины удаленного ввода/вывода могут свободно интегрироваться с другими системами, построенными на данной сети – например, с контроллерами Siemens. Особенно важно это в условиях обеспечения существующих производств парком ЗИПа. Данные контроллеры зарекомендовали себя, преимущественно, в Китае, в том числе на атомных электростанциях.



Рисунок 4 – Контроллеры серии LK (HollySys)

Контрольно-измерительные приборы отечественного производства представлены в большом количестве, однако среди них очень мало или вовсе отсутствуют приборы для областей специального применения – химически агрессивные среды, суспензии и взвеси и т.д. Особенно остро стоит проблема по измерению расхода и уровня в таких средах.

В сложившихся условиях разрозненности элементов систем управления и связей между ними нарушаются все основные принципы построения АСУ – системности, развития, совместимости, стандартизации и унификации, и, как следствие, эффективности. Разнородная реализация встроенных в устройства интерфейсов обмена информацией приводит к снижению информационного обмена между подсистемами и, зачастую, приводит к передаче исключительно физических смежных сигналов, что сказывается на качестве управления.

При всём вышесказанном, наиболее значимой проблемой, которой уделяется незаслуженно мало внимания является проблема замены интеллектуальных средств и составляющих систем управления. К этим средствам относятся технологии и подходы к разработке, методы проектирования как в целом систем, так и отдельных компонентов, так и сами системы управления со всеми их подсистемами.

От современной системы управления требуется не только обеспечивать функции базовой автоматизации на уровне систем логического управления, но и содержать подсистемы, реализующие функции интеллекта для предиктивной аналитики и прогнозирования, анализа непрерывно обновляемых больших данных, идентификации и цифрового моделирования, управляющие алгоритмы и др. Имеющаяся научная база для наполнения этих систем наталкивается на проблемы практической реализации, поскольку теоретические исследования не всегда легко ложатся в практику.

Примеры внедрения таких систем описаны в [3-6]. Одна из главных проблем, с которыми в настоящее время можно столкнуться при внедрении подобных систем заключается в том, что они, зачастую, используют встроенные средства доступа и обработки информации зарубежных продуктов, на которых реализованы сами системы автоматизации управления. С точки зрения разработки, выполнение всех функций в едином программном пространстве – корректное решение. Но по факту возникают проблемы лицензирования, отсутствия поддержки, что может привести к нестабильности работы или вовсе ее прекращению.

Зарубежное технологическое оборудование практически всегда шло с готовой системой управления, отлаженными и проверенными алгоритмами, настроенными регуляторами, которые были, в большинстве случаев, закрыты от вмешательства и даже анализа, представляя собой «черный ящик» [7]. Таким образом, возникновение любой непредвиденной ситуации или изменение условий работы требовало вмешательства зарубежных специалистов. В настоящее время это вызывает некоторые проблемы, что приводит к порче и остановке оборудования, прерывании технологических процессов и, самое важное, не позволяет совершенствовать системы. Ни о какой цифровой трансформации не может быть речи, когда базовая автоматизация к ней не готова и не подлежит изменению.

Одной из главных целей обеспечения безопасности отечественного производства должна быть комплексная проработка решений с совместным синтезом объекта и управляющей системы [8]. Сейчас многие организации предлагают свое технологическое оборудование, однако, разработок с локальными системами управления, поставляемыми комплектно, очень мало. Еще меньше интеллектуальных технологий защищены авторскими свидетельствами и патентами, поскольку процедуры регистрации требуют специальных навыков, а дальнейшая патентная защита, даже внутри страны, проблематична.

Особенностью отечественных производственных процессов является постоянно меняющиеся условия их протекания – это не столько возмущения и помехи, сколько постоянно изменяющиеся требования стандартов, свойства (а зачастую и тип) сырья, не регламентная замена оборудования на другую производительность (как правило, большую), добавление нового оборудования и технологических связей, и так далее, что должно отражаться и в самом подходе к разработке систем управления. Исследования в данном направлении говорят о необходимости построения специальных систем управления с переменной структурой – иными словами, структурной не стационарностью [9]. Причем переменная структура объекта управления должна отражаться и в управляющей части системы. При этом необходимо кроме параметрических и координатных воздействий в системе управления вводить целенаправленное изменение (управление) структурами. То есть в целом система управления должна объединять координатные (сигнальные), параметрические и структурные управляющие воздействия. Для развития этого направления необходимы фундаментальные исследования по разра-

ботке новых подходов, методов и алгоритмов управления. Основопологающим фундаментом могут служить принципиальные наработки по новым типам обратных связей [10], а также конкретные методы и алгоритмы, например, управления объектами с положительными обратными связями, методы синтеза систем с привлечением положений подобия систем управления, объединяющих физико-химические и функциональные (кибернетические) представления [11-13].

Особо следует выделить перспективное направление синтеза синергетических (самоорганизующихся) систем управления (Колесников Синергетическое управление), в полной мере привлекая «природные» закономерности организации и функционирования объектов, в том числе и социальных.

Только разработка фундаментальных положений теории управления с прикладной конкретизацией и непосредственным внедрением позволит обеспечить опережающее развитие современных эффективных систем управления в различных сферах деятельности.

Библиографический список

1. ГОСТ 34.602-2020. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.

2. РД 50-680-88. Руководящий документ по стандартизации. Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения

3. Цифровизация средств анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного производства ПАО «ММК» / Спирин Н.А., Лавров В.В., Гурин И.А., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Шнайдер Д.А. // В сборнике: Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): AS'2021. труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Новокузнецк, 2021. С. 12-18.

4. Математическое моделирование и алгоритмизация функций мониторинга технологических процессов на основе многоточечных измерительных систем / Ковалев И.В., Ковалев Д.И., Лосев В.В., Сарамуд М.В., Тынченко Я.А. // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6-1. С. 29-38.

5. Разработка адаптивной системы управления сушильного барабана обогатительной фабрики АО "Лебединский ГОК" / Тараненко М.Е., Казанцев А.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 5 (157). С. 51-56.

6. Оценивание предаварийных состояний технологического оборудования и контрольноизмерительных приборов / Ляховец М.В., Макаров Г.В., Саламатин А.С., Шипунов М.В. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2020. № 3. С. 16-24.

7. Загидулин И.Р. Особенности интеграции локальных систем управления в АСУТП обогатительной фабрики / Загидулин И.Р., Саламатин А.С., Макаров Г.В., Коршунов С.Ю. // В сборнике: Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): AS'2021. труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Новокузнецк, 2021. С. 155-159.

8. Ляховец М.В. Совместный синтез объекта управления и управляющей подсистемы / Ляховец М.В., Ивушкин К.А., Мышляев Л.П., Чернявский С.В., Львова Е.И. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 12. С. 33-36.

9. Мышляев Л.П. Состояние и пути развития систем управления со структурным разнообразием / Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Ивушкин К.А., Грачев В.В., Ляховец М.В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 376-380.

10. Емельянов, С.В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. / Емельянов, С.В., Коровин С.К. // М.: Наука. Физматлит, 1997. - 352 с.

11. Евразийский патент №021192 «Система регулирования объектов с рециклом» МПК G06B13/00 04.03.2015 / Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г., Киселев С.Ф., Циряпкина А.В., Березин Д.Г., Чичиндаев М.Г., Барагичев К.Е.

12. Свинцов М.М. Применение натурно-математического подхода при моделировании технологических процессов / Свинцов М.М., Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Скударнова Н.В. // В сборнике: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Новокузнецк, 2021. С. 213-217.

13. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. - 2-е изд., перераб. - М.: Наука, 1978. - 400 с.

УДК 004.771

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УДАЛЕННОЙ ПУСКОНАЛАДКИ НА КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Кулюшин Г.А.^{1,2}, Мышляев Л.П.², Грачев В.В.^{1,2}, Коровин Д.Е.^{1,2}

**¹Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, georgiy15091997@gmail.com**

**²ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»,
г. Новокузнецк, Россия, mail@nicsu.ru**

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы проведения пусконаладочных работ автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) крупных промышленных предприятий с использованием технологий удаленного доступа. Приведены задачи, решаемые в ходе осуществления пусконаладочных работ, в том числе в дистанционном режиме. Представлен опыт проведения пусконаладочных работ на углеобогажительной фабрике ООО «Шахта №12» (г. Киселевск Кемеровской обл.). Предложен вариант организации удаленного доступа к АСУ ТП обогажительной фабрики полиметаллов «Рубцовская» (п. Потеряевка, Алтайский край).

Ключевые слова: удаленный доступ, сетевые технологии, углеобога-
тительная фабрика, обогатительная фабрика полиметаллов, пусконаладка,
RDP-протокол, Proxy, VPN.

EXPERIENCE IN USING REMOTE START-UP TECHNOLOGIES AT LARGE INDUSTRIAL ENTERPRISES

Kulyushin G.A.^{1,2}, Myshlyaev L.P.², Grachev V.V.^{1,2}, and Korovin D.E.^{1,2}

¹ *Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, georgiy15091997@gmail.com*

² *Scientific-Research Center for Control Systems LLC,
Novokuznetsk, Russia, mail@nicsu.ru*

Abstract. The article deals with the issues of commissioning of automated process control systems (APCS) of large industrial enterprises using remote access technologies. The tasks solved during the implementation of commissioning works, including in remote mode, are given. The experience of commissioning at the coal processing plant of LLC "Mine No. 12" (Kiselevsk, Kemerovo region) is presented. A variant of organizing remote access to the automated control system of the polymetals processing plant "Rubtsovskaya" (poselok Poteryaevka, Altai Krai) is proposed.

Keywords: remote access, network technologies, coal processing plant, polymetals processing plant, commissioning, RDP-protocol, Proxy, VPN.

Введение. Этап выполнения пусконаладочных работ автоматизированных систем управления (АСУ ТП) занимает важную роль в жизненном цикле автоматизированных промышленных предприятий. От качества и оперативности проводимых пусконаладочных работ зависит не только работоспособность всего требуемого функционала АСУ ТП, но и безопасность эксплуатации технологического комплекса.

Традиционный подход к проведению пусконаладочных работ заключается в том, что наладочный персонал либо находится в долгосрочной командировке на промышленной площадке предприятия, либо совершает ежедневные выезды на объект. Данный подход имеет как достоинства, так и недостатки. Среди достоинств можно отметить личное присутствие наладочной бригады, контроль за проведением пусконаладочных работ и возможность оперативной работы при возникновении ситуаций, требующих немедленного вмешательства. Недостатком традиционного подхода является высокие временные и финансовые затраты на ежедневную транспортировку персонала к месту проведения пусконаладочных работ на промышленную площадку предприятия.

В настоящее время формируется новый подход к проведению пусконаладочных работ, основанный на дистанционном взаимодействии с АСУ ТП промышленного предприятия через организованный удаленный доступ посредством сети Интернет.

Задачи, решаемые на этапах пусконаладки и сопровождения системы. Этап пусконаладочных работ (ПНР) является одной из заключительных стадий процесса создания АСУ ТП [1]. В процессе проведения ПНР выделяют 3 этапа:

- 1) обследование оборудования и анализ технической документации;
- 2) конфигурация компонентов АСУ ТП;
- 3) заключительный этап ПНР, включающий следующие процедуры:
 - проверка функционирования системного и прикладного программного обеспечения (ПО) в разных режимах;
 - конфигурирование измерительных преобразователей;
 - проверка приводов исполнительных устройств, запорной арматуры;
 - наладка дискретных и аналоговых измерительных каналов;
 - оценка работоспособности каналов связи.

Пусконаладочные работы проводятся непосредственно после монтажа всех элементов общей системы. Монтаж и первичная настройка компонентов АСУ ТП требуют нахождения наладочного персонала на объекте для проведения необходимых и достаточных работ по организации возможности дистанционного взаимодействия с системой в ходе заключительного этапа ПНР [2].

Удаленный доступ к АСУ ТП промышленного предприятия позволяет делать все необходимые правки и работы в режиме «онлайн», то есть моментально реагировать в любое время суток и из любой точки подключения к сети Интернет, если ситуация действительно требует немедленного вмешательства. Например, критический сбой программируемого логического контроллера (ПЛК) возможно выявить и устранить при удаленном подключении к инженерной станции АСУ ТП с помощью установленного на ней ПО от разработчика ПЛК. На рисунке 1 представлена среда CX-One конфигурирования и программирования ПЛК корпорации OMRON (Япония).

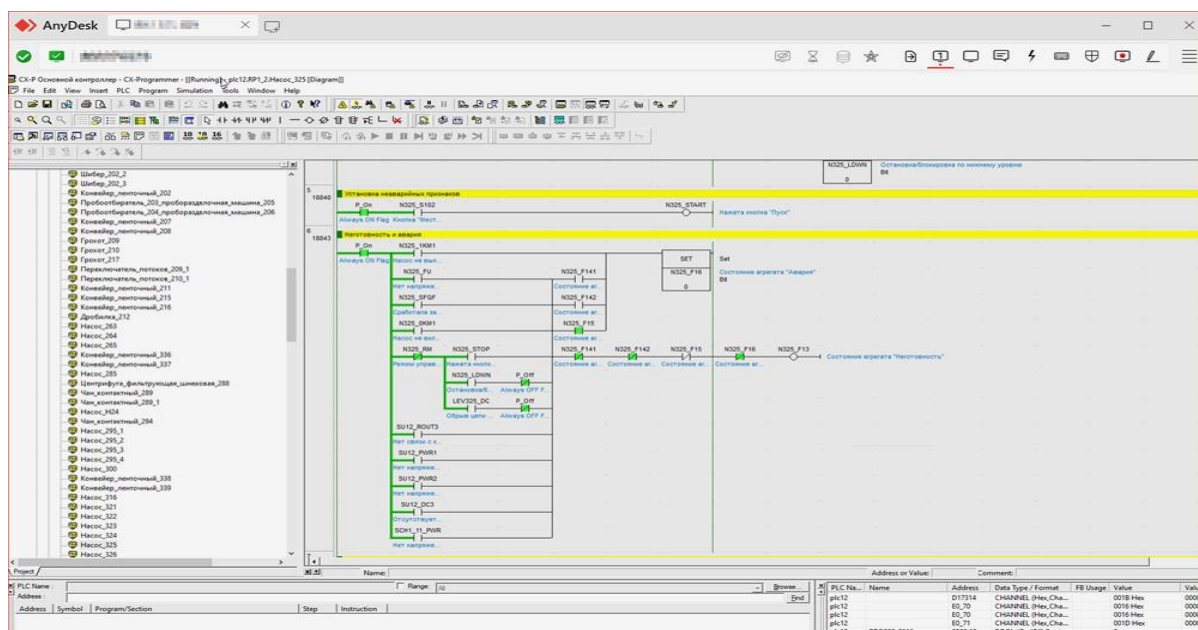


Рисунок 1 – Среда CX-One конфигурирования и программирования ПЛК корпорации OMRON, запущенная на инженерной станции АСУ ТП

Удаленный доступ также позволяет решать задачи системного и сетевого администрирования, связанного с работой с сетевым оборудованием и ключевыми узлами хранения, вычисления, передачи данных – дата-центрами, содержащими в себе вычислительные, резервируемые кластеры серверов. На рисунке 2 представлен Web-интерфейс среды конфигурирования и мониторинга виртуальных машин и кластеров физических серверов vCenter корпорации VMWare (США).

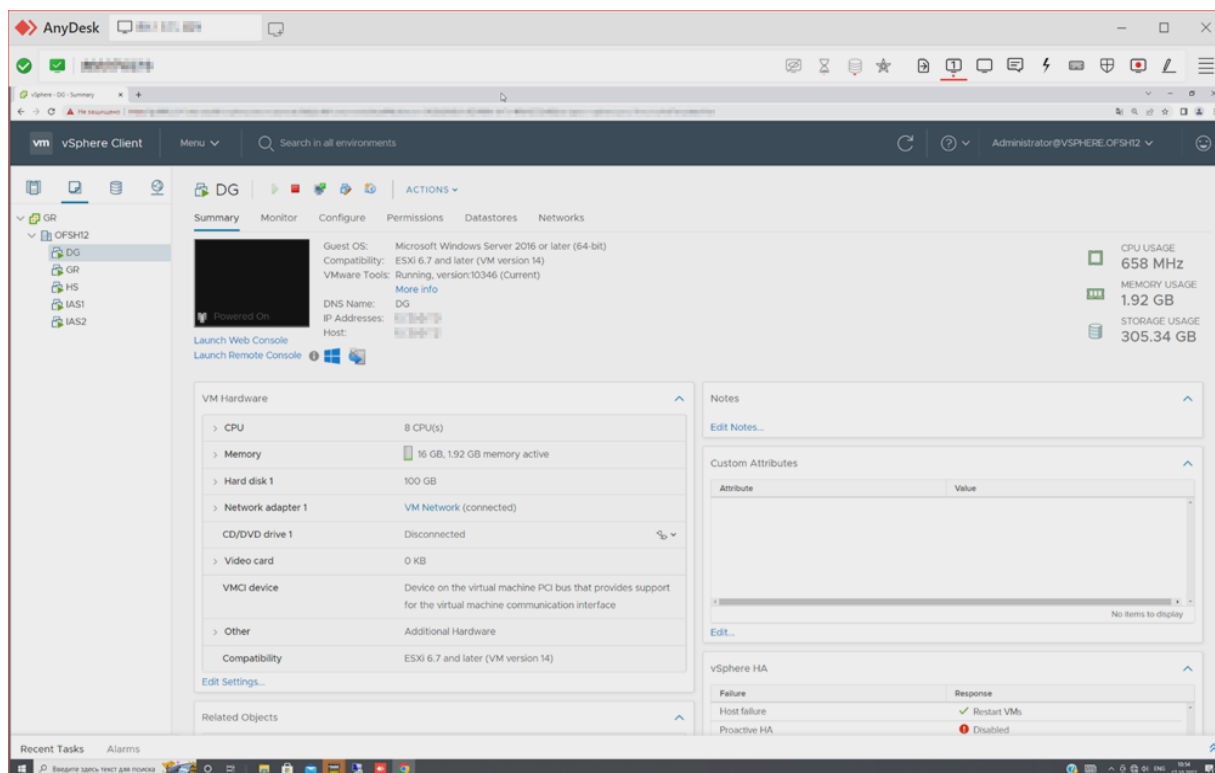


Рисунок 2 – Веб-интерфейс среды VMWare vCenter конфигурирования и мониторинга виртуальных машин и кластеров физических серверов инженерной станции АСУ ТП

Удаленное подключение к узлам АСУ ТП необходимо также для решения задач, возникающих при модернизации программного и алгоритмического обеспечения АСУ ТП и исправлении ошибок в ходе функционирования автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления. Работа с множеством виртуальных машин, на которых размещаются программные модули SCADA-системы, например, Wonderware System Platform (США), ведется в режиме удаленного подключения при помощи стандартной утилиты «Подключение к удаленному рабочему столу» операционных систем (ОС) Windows и Windows Server. На рисунке 3 показан пример удаленного подключения к виртуальной машине через инженерную станцию АСУ ТП.

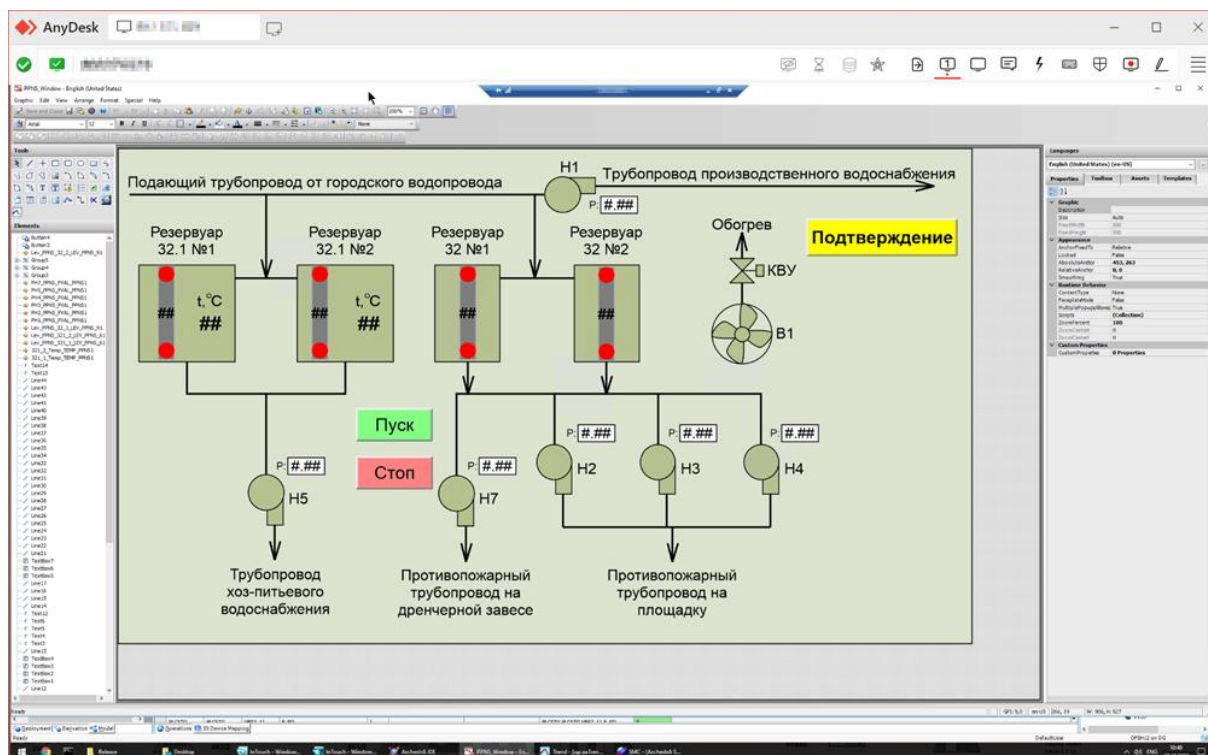


Рисунок 3 – Работа с графическим редактором Wonderware System Platform, которая ведется на удаленном виртуальном сервере разработки SCADA-системы

Технологии организации удаленного доступа к АСУ ТП. Организация удаленного доступа сопровождается выбором наиболее подходящей схемы организации удаленных рабочих мест. Как правило, используют одну из трех схем [3]:

1. Удаленный рабочий стол (англ. Remote Desktop Protocol, или RDP). RDP – это протокол подключения пользователя к удаленному рабочему столу через сервер терминалов. Наиболее простой режим работы заключается в следующем: наладочный персонал, используя RDP, соединяется с инженерной станцией АСУ ТП на промышленном предприятии для дальнейшей работы.

2. Выделенный терминал доступа (англ. Remote Desktop Services, или RDS). RDS – технология организации виртуальных рабочих столов (учетных записей) в рамках одной операционной системы на одном виртуальном или выделенном сервере. На терминальном сервере (сервере RDS) пользователи имеют доступ к одной среде, которую можно настроить для каждого пользователя, но ресурсы системы общие.

3. Виртуальные рабочие столы (англ. Virtual Desktop Infrastructure, или VDI). VDI – это виртуальные рабочие столы, которые развернуты на отдельных виртуальных машинах. При использовании VDI каждый пользователь получает доступ к своей выделенной виртуальной машине: ядра процессора, память и диски выделяются виртуальной машине конкретного пользователя, что исключает негативное влияние его работы на работу других пользователей и приложений.

Чаще всего применяется схема RDP-подключения. Достоинствами

RDP являются быстрота настройки, простота администрирования, отсутствие каких-либо требований к серверному оборудованию. Но у технологии присутствует и существенный недостаток, связанный с обеспечением безопасности и надежности данного способа в виду отсутствия серьезных механизмов контроля доступа на уровне операционных систем. Данная проблема компенсируется организацией защищенного подключения с помощью инструментов VPN или Proxy между терминалом-клиентом и удаленным сервером.

Proxy, или прокси, является сетевой технологией, позволяющей подменять IP-адрес устройства пользователя с заменой его на другой. Основным назначением технологии является сохранение анонимности и безопасности при использовании интернета. С точки зрения корпоративного применения, обеспечивается фильтрация входящих и исходящих подключений. Существенный минус данной технологии – отсутствие дополнительного шифрования и относительно слабая защита перед продвинутыми инструментами взлома.

VPN (Virtual Private Network) в свою очередь работает, как виртуальная частная сеть поверх интернета, данные которой шифруются сквозным методом – от точки подключения до точки назначения, что делает почти невозможным перехват данных злоумышленниками извне. В сравнении с Proxy, VPN-технология требует больше ресурсов системы для шифрования передаваемых данных.

Опыт реализации удаленного подключения к АСУ ТП ОФ «Шахта №12». В рамках создания автоматизированной системы управления углеобогатительной фабрики ООО «Шахта №12» (г. Киселевск, Кемеровская обл.) [4] при выполнении пусконаладочных работ и сопровождения АСУ ТП был реализован вариант, основанный на возможности удаленного Proxy-подключения по схеме удаленного рабочего стола RDP.

Упрощенная техническая структура организации удаленного доступа к АСУ ТП ОФ «Шахта №12» представлена на рисунке 4. Технологическая сеть АСУ ТП ОФ «Шахта №12» является изолированной от прямого внешнего подключения в целях обеспечения безопасности функционирующего программно-технического комплекса [5]. Для обеспечения связи с данным участком сети, применяется настроенный Proxy-сервер, имеющий разрешение в брандмауэре на выход в интернет. Proxy-сервер имеет физический доступ как к технологической сети АСУ ТП ОФ, так и к корпоративной сети фабрики, благодаря наличию двух сетевых карт. Программный доступ удаленного рабочего стола реализован на базе ПО Anydesk компании AnyDesk Software GmbH (Германия) с настроенными сетевыми параметрами Proxy-подключения.

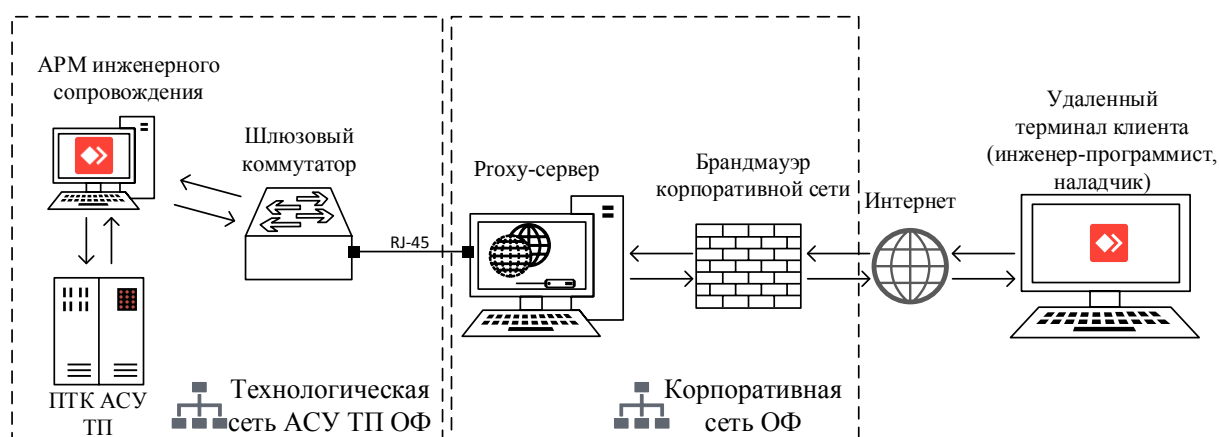


Рисунок 4 – Организация сетевой структуры RDP-подключения к АСУ ТП ОФ «Шахта №12», где АРМ – автоматизированное рабочее место, ПТК – программно-технический комплекс

В ходе пусконаладочных и сопроводительных работ АСУ ТП ОФ «Шахта №12» в удаленном режиме решались следующие задачи:

- 1) разработка мнемосхем и отладка функционирования модульных блоков SCADA-системы;
- 2) разработка и отладка прикладного программного обеспечения ПЛК в режимах местного, дистанционного и автоматического управления;
- 3) проверка приводов насосного, конвейерного, дробильного оборудования, запорной арматуры задвижек, вентиляционного и аспирационного оборудования;
- 4) наладка дискретных и аналоговых измерительных каналов ПЛК OMRON, преобразователей интерфейсов MOXA.
- 5) оценка работоспособности каналов связи сетевого оборудования НР, MOXA.

При простоте реализации данного варианта организации удаленного доступа имеется существенный недостаток. В процессе комплексной наладки на уровнях контроллерного и оперативно-диспетчерского управления специалистам необходимо ожидать своей очереди, так как управление удаленным узлом при использовании программных методов (таких, как Anydesk) на сеансовом уровне происходит одновременно. То есть при подключении двух и более удаленных терминалов-клиентов, управление для них становится общим. Наиболее простым решением данной проблемы было бы внедрение дополнительного АРМа инженерного сопровождения.

Вариант организации удаленного доступа на примере АСУ ТП ОФ «Рубцовская». Второй вариант организации удаленного доступа к АСУ ТП, основанный на технологии защищенного VPN-подключения, был предложен для АСУ ТП обогатительной фабрики полиметаллов «Рубцовская» (п. Потеряевка, Алтайский край). Техническое функционирование VPN-туннеля реализуется посредством сотового LTE-шлюза OnCell (рисунок 5) корпорации MOXA (Тайвань). Подключение к данному шлюзу осуществляется по беспроводной среде передачи данных 4G-сети провайдера сотовой связи [6].

	Технологии	
	Стандарты	AS/NZS60950, EN301511, EN301489-1-1, MPE SAR, AS/NZS 5042, EN301489-24, EN3011908-1
	Протоколы	HTTPS, OnCell Central Manager, DHCP server, GuaranLink, Serial Console, Telnet Console, Web Console, ARP, DDNS, SMTP, SNMPv1/v2c/v3, Syslog, TCP/IP, Telnet, UDP, Wireless Search Utility, Remote SMS Control
	Роутер	NAT, перенаправление портов
	Функции безопасности	
	Протоколы VPN	Open VPN, Tunnel mode, TAP mode, IPsec VPN
	Максимальное количество туннелей	5
	Параметры связи	
	Порты Ethernet	2 x Ethernet 10/100 Base T(X) (разъем RJ45)
	Скорость передачи данных	10/100 Мбит/с
	Тип разъема	RJ45 (8 конт.)
	Параметры сотовой связи	
	Стандарты	GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSPA/LTE CAT-1
	Диапазон частот	B1 (2100 МГц) / B3 (1800 МГц) / B8 (900 МГц) / B20 (800 МГц), B28 (700 МГц), UMTS/HSPA 2100/900 МГц, GSM 900/1800 МГц
	Скорость передачи данных (HSPA)	7.2 Мбит/с DL, 5.76 Мбит/с UL
	Скорость передачи данных (LTE)	Полоса частот 10 МГц: 10.2 Мбит/с DL, 5.2 Мбит/с UL
	Количество слотов для SIM-карт	2

Рисунок 5 – Общий вид и характеристики LTE-шлюза MOXA OnCell 3120-LTE – 4G

Отличительным преимуществом данного решения перед реализованной системой удаленного подключения на обогатительной фабрике «Шахта №12» является отсутствие необходимости в промежуточных технических устройствах между клиентом и программно-техническим комплексом АСУ ТП. Каждый подключаемый по VPN терминал-клиент выполняет роль АРМа инженерного сопровождения, так как на каждом из клиентских узлов можно создать собственное сеансовое RDP-подключение или через подключение через специализированные приложения. Это достигается за счет NAT-преобразований адресов в сетях TCP/IP, будто бы рабочие станции находились непосредственно в технологической сети фабрики. Концептуальная схема организации удаленного подключения для ОФ «Рубцовская» показана на рисунке 6.

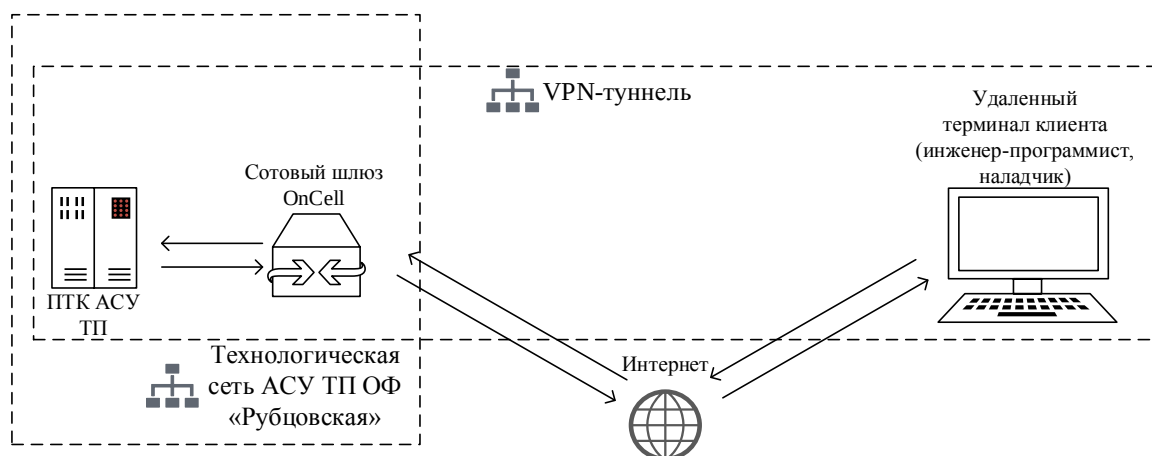


Рисунок 6 – Организация сетевой структуры планируемого VPN-подключения к АСУ ТП ОФ «Рубцовская»

Выводы

Использование технологий удаленного доступа при пусконаладке и сопровождении АСУ ТП позволяет минимизировать время нахождения пусконаладочного персонала на промплощадке обогатительной фабрики, уменьшить время реагирования на проблемы, возникающие в процессе сопровождения АСУ ТП.

Опыт организации и использования технологий удаленного доступа к АСУ ТП через технологии RDP, Proxu и VPN, полученный при проектировании и внедрении АСУ ТП ОФ «Шахта №12» и АСУ ТП ОФ «Рубцовская», позволяет рекомендовать использование данных технологий на других промышленных предприятиях.

Библиографический список

1. ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания [Текст]. – Взамен ГОСТ 24.601-86; Введ. 1992 – 01 – 01. – Москва: Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.

2. Сборка и пуско-наладочные работы [Электронный ресурс]: – Электрон. дан. – Россия – URL: <https://barracuda-stanki.ru/sborka-i-pusko-naladochnye-raboty/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 22.09.2022).

3. Кулюшин Г.А. Использование технологий удаленного доступа при решении задач наладки и сопровождения АСУ ТП обогатительных фабрик / Г. А. Кулюшин, В. В. Грачев, Д. Е. Коровин, Д. В. Иванов, Д. С. Аниканов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 227-230.

4. Шипунов, М. В. Система автоматизации управления обогатительной фабрикой ООО "Шахта №12" / М. В. Шипунов, В. В. Грачев, К. А. Ивушкин, Ш. А. Файрушин, Л. П. Мышляев, Г. В. Макаров // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019: Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 28–30 ноября 2019 года / под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 186-192.

5. Кулюшин, Г.А. Создание резервируемой инфокоммуникационной сети АСУ ТП ОФ «Шахта №12» / Г. А. Кулюшин, Д. В. Иванов, Д. Е. Коровин, В. В. Грачев, С. Ю. Коршунов // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды V Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 14 апреля 2021 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 291-295.

6. OnCell 3120-LTE – 4G шлюз для телеметрии [Электронный ресурс]: – Электрон. дан. – Россия – URL: <https://moxa.pro/blogs/news/oncell-3120-lte-4g-shlyuz-dlya-telemetry>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 22.09.22).

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНО-
ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА «АЛЮМИНЩИК»
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В МИКСЕРЕ
ЛИТЕЙНОГО ОТДЕЛЕНИЯ**

Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, science_nvkh@mail.ru)*

***Аннотация.** Производство алюминиевых сплавов остается одним из наиболее востребованных направлений в современной металлургии. При этом технологический процесс формирования алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления литейного отделения напрямую зависит от качества добытого сырья, что определяет наличие избыточного количества корректирующих воздействий при формировании заданного химического состава в соответствии с портфелем заказов на предприятии. Многофакторность металлургического процесса непосредственно приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности электрического миксера сопротивления и повышению затрат на единицу готовой продукции. Поэтому, совершенствование технологии и разработка оптимальных ресурсосберегающих режимов формирования алюминиевого расплава в электрических миксерах сопротивления с использованием инструментальной системы моделирования и оптимизации является актуальной научно-практической задачей современной металлургии.*

***Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, алюминий-сырец, лигатуры, электрический миксер сопротивления, математическая модель, экономический эффект.*

**MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE-INSTRUMENTAL
SYSTEM «ALYUMINSCHIK» FOR IMPROVING THE PROCESS OF
OBTAINING ALUMINUM ALLOYS IN A MIXER FOUNDRY
DEPARTMENT**

Martusevich E.A., Rybenko I.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, science_nvkh@mail.ru)*

***Abstract.** The production of aluminum alloys remains one of the most popular areas in modern metallurgy. At the same time, the technological process of forming aluminum melt in electric resistance mixers of the foundry department directly depends on the quality of the extracted raw materials, which determines the presence of an excessive number of corrective actions in the formation of a given*

chemical composition in accordance with the portfolio of orders at the enterprise. The multitasking and multifactorial nature of the metallurgical process directly leads to an increase in the melt preparation time, a decrease in the productivity of the electric resistance mixer and an increase in the cost per unit of finished product. As a result, the improvement of technology and the development of optimal resource-saving regimes for the formation of aluminum melt in electric resistance mixers is an urgent scientific and practical task of modern metallurgy.

Key words: aluminum alloys, raw aluminum, ligatures, electric resistance mixer, mathematical model, economic effect.

Технологический процесс формирования алюминиевого расплава в миксере относится к сложным многопараметрическим объектам и заключается в порционном добавлении алюминия-сырца из литейных ковшей в миксер с последующей корректировкой лигатурами и флюсами. Основная сложность получения алюминиевых сплавов заключается в постоянно меняющемся химическом составе алюминия-сырца [1]. В связи с этим получение алюминиевых сплавов заданного состава не имеет единого сценария приготовления и требует постепенного доведения формируемого алюминиевого расплава в миксере до заданного химического состава фактически «методом проб и ошибок».

Для решения задачи определения оптимальных режимов процесса формирования алюминиевого расплава в электрическом миксере разработана модель динамики изменения химического состава и температуры расплава при порционном смешивании первичного алюминия с последующей его обработкой лигатурами и флюсами, в том числе разработана модель диффузии компонентов расплава в ванне миксера. Модель динамики изменения химического состава и температуры расплава в миксере представлена в виде блок-схемы на рисунке 1.

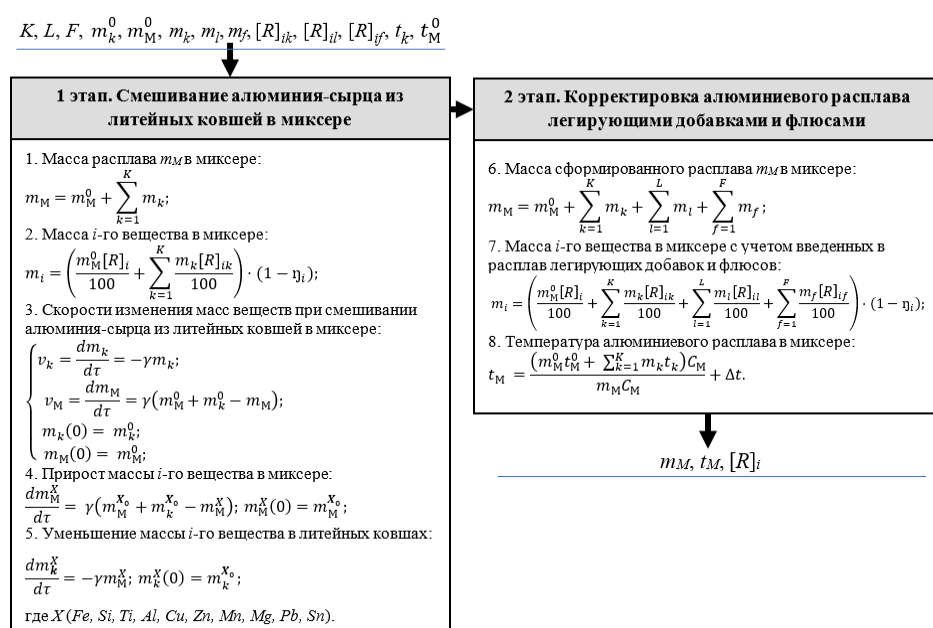


Рисунок 1 – Блок-схема математической модели процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

В математической модели приняты следующие обозначения: K – количество литейных ковшей; L – количество применяемых лигатур; F – количество флюсов; m_M^0 – исходная масса расплава в миксере перед началом технологической операции формирования расплава, кг; m_M – текущая масса расплава в миксере, кг; m_k^0 – начальная масса расплава в k -ом литейном ковше, кг; m_k – текущая масса алюминия-сырца, поступающего из k -го литейного ковша, кг; m_i – масса i -го вещества в миксере, кг; m_l – масса l -ой лигатуры, добавляемой в алюминиевый расплав, кг; m_f – масса f -ого флюса, добавляемого в алюминиевый расплав, кг; $[R]_i$ – химический состав алюминиевого расплава в миксере, оставшегося с предыдущего технологического этапа плавки, %; $[R]_{ik}$ – химический состав алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, %; $[R]_{il}$ – химический состав l -ой лигатуры, %; $[R]_{if}$ – химический состав f -ого флюса, %; η_i – коэффициент угара i -го элемента; v_k – скорость поступления алюминия-сырца из k -го литейного ковша, кг/с; v_M – скорость прироста массы расплава в миксере, кг/с; τ – текущее время, с; C_M – теплоемкость расплава в миксере, кДж/(кг·град); t_M – текущая температура алюминиевого расплава в миксере, °С; t_M^0 – исходная температура алюминиевого расплава в миксере перед началом смешивания алюминия-сырца, °С; t_k – температура алюминия-сырца в k -ом литейном ковше, °С; Δt – приращение температуры в миксере за счет нагревательных элементов, °С [2].

Математическая модель реализована в программном комплексе «Алюминщик», разработанном с использованием современных ИТ-средств и инструментов и позволяющем решать задачу оптимального соотношения расходов материалов с учетом имеющихся ограничений [3].

Программный комплекс «Алюминщик» (рисунок 2) предназначен для моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления и повышения квалификации технологического персонала промышленных предприятий с целью уменьшения материальных, энергетических и других затрат [4, 5].

Структуру реализованной системы «Алюминщик» можно представить в виде блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу исходных материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать материальный и тепловой балансы, параметры перемешивания металла в миксере и определять оптимальные условия реализации процесса (рисунок 3).

С использованием математической модели и программного комплекса «Алюминщик» были проведены исследования технологического процесса формирования алюминия в миксере с учетом перемешивания расплава [6]. На рисунке 4 приведен пример динамики изменения концентраций компонентов формируемого расплава марки АВ88 при добавлении алюминия-сырца из восьми литейных ковшей в миксер через установленные промежутки времени τ .

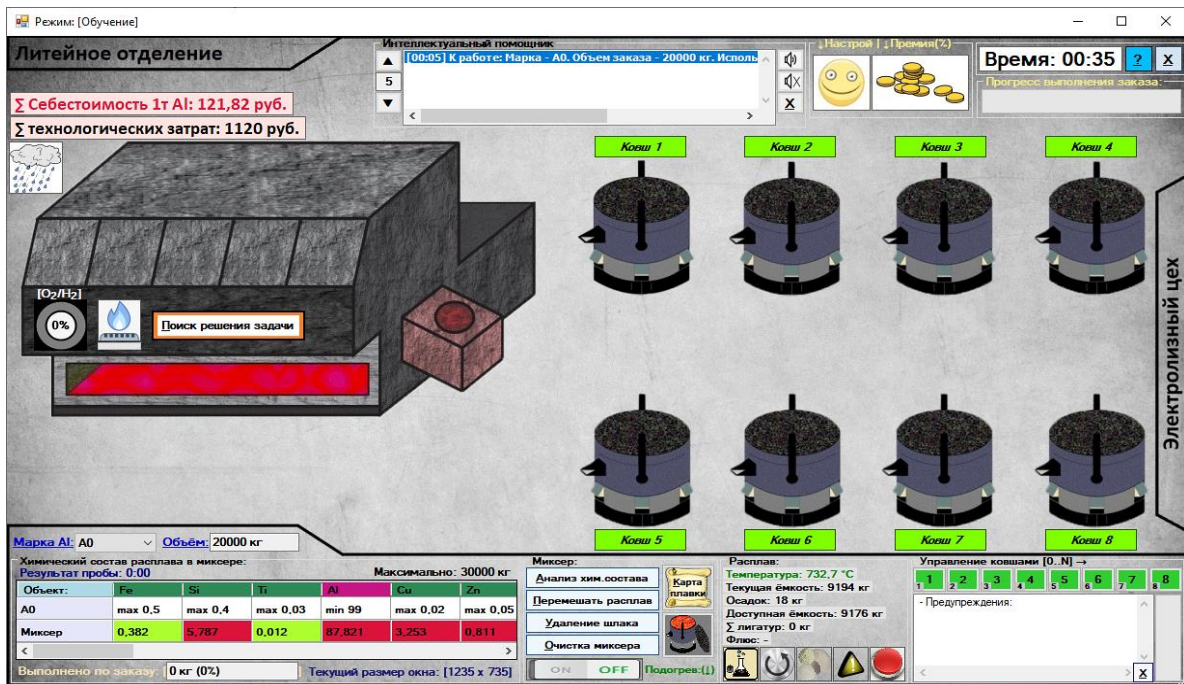


Рисунок 2 – Интерфейс программного комплекса «Алюминщик»

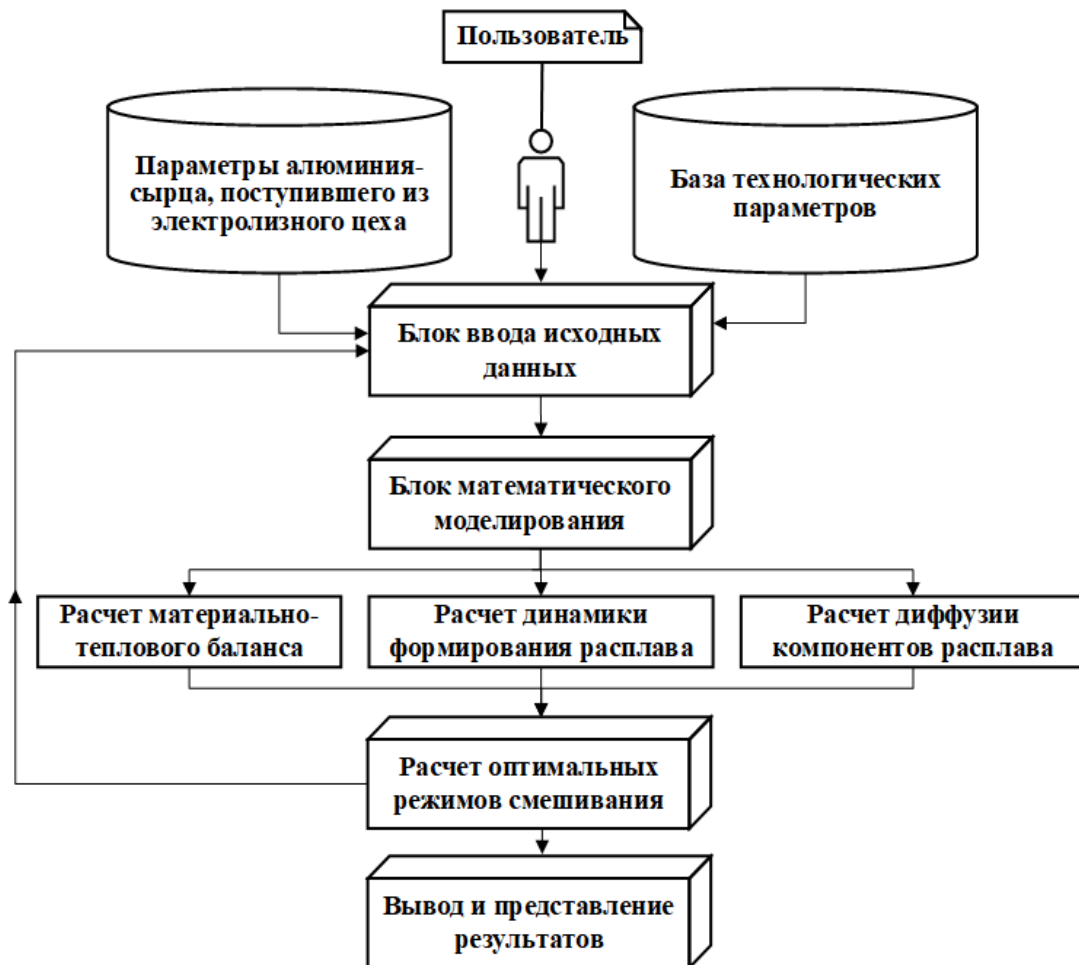


Рисунок 3 – Схема взаимодействия основных компонентов программного комплекса «Алюминщик»

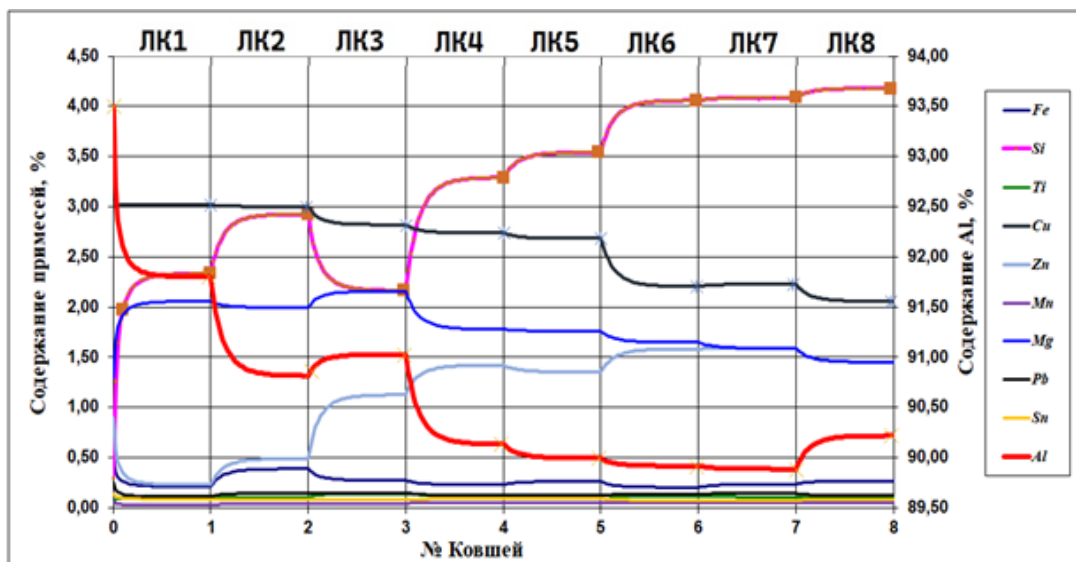


Рисунок 4 – Динамика изменения химического состава
алюминиевого расплава

С использованием программы «Алюминщик» проведены расчеты оптимальных режимов процесса по данным фактических паспортов плавков на примере десяти различных марок, реализованных на АО «РУСАЛ Новокузнецк».

Сравнительный анализ реальных технологических данных и полученных оптимальных результатов расчета, показал, что рассчитанные с использованием программного комплекса «Алюминщик» оптимальные режимы обеспечивают не только попадание в заданную марку, но и приводят к снижению затрат на единицу продукции.

Также за счет уменьшения времени на корректирующие операции сокращается общая продолжительность технологического этапа формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере сопротивления, в результате чего повышается производительность агрегата и всего литейного отделения.

На рисунке 5 приведена гистограмма распределения временных затрат на технологическую операцию по фактическим и расчетным данным на примере 250 плавков, из которой видно, что время приготовления алюминиевого расплава с использованием оптимальных расчетов можно снизить на 15 – 20 мин, что приводит к повышению производительности миксера с 120 до 137 т/сут или с 39,4 до 44,9 т/год. Это позволит получить экономический эффект 40,7 млн. рублей для одного миксера в год.

Таким образом, разработанная система «Алюминщик», включающая в себя математическую модель и метод оптимизации, внедрена в производство и учебно-информационный центр АО «РУСАЛ Новокузнецк», а также на предприятии ООО «Полимет». Внедрение результатов работы в производство на АО «РУСАЛ Новокузнецк» позволило на 20 % уменьшить количество брака из-за некорректно принятых решений, снизить затраты на получение единицы продукции на 200 – 250 руб/т за счет рационального распределения материалов и уменьшить длительность технологической операции на 10 %.

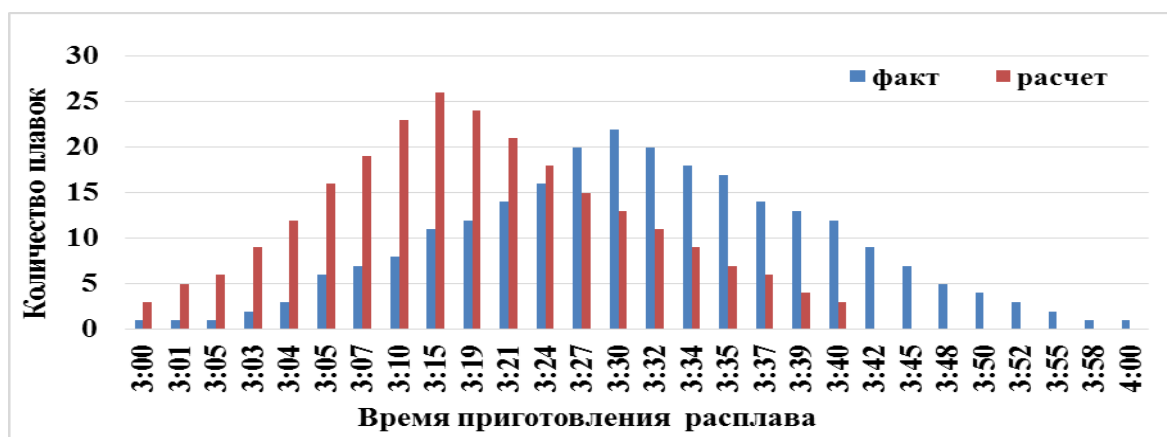


Рисунок 5 – Гистограмма распределения временных затрат на технологическую операцию по результатам 250 плавов

Апробация программного комплекса «Алюминщик» при приготовлении сплава марки АД31 на предприятии ООО «Полимет» также показало его высокую эффективность, позволило уменьшить длительность технологической операции на 10 % и снизить расход электроэнергии на 4 %.

Статья опубликована в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Библиографический список

1. Золоторевский, В. С. Металловедение цветных металлов. Алюминиевые сплавы / В. С. Золоторевский, Н. А. Белов. – М.: Изд-во «МИСиС». – 2000. – 147 с.
2. Шеметев, Г. Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение / Г. Ф. Шеметев. – СПб.: Изд-во «СПбПУ». – 2012. – 155 с.
3. Горенский, Б. М. Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии / Б. М. Горенский, О. В. Кирякова, С. В. Ченцов, Л. А. Лапина. – Красноярск: Изд-во «СФУ». – 2012. – 148 с.
4. Калашников, С. Н. Проектирование и реализация комплекса программ для моделирования технологического процесса формирования алюминиевых сплавов на основе объектно-ориентированного подхода / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, В. Н. Буинцев, И. А. Рыбенко // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 57. – С. 110–117.
5. Калашников, С. Н. Математическое моделирование действующего технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере литейного отделения / С. Н. Калашников, Е. А. Мартусевич, Е. В. Мартусевич, И. А. Рыбенко // Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 56. – С. 20–28.
6. Мартусевич, Е. А. Поиск решения технологических задач методом последовательной оптимизации / Е. А. Мартусевич, В. Н. Буинцев // Труды международной научно-практической конференции «Инновационные технологии научного развития». – 2017. – С. 100–104.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА, КАК ОТВЕТ НА ЗАПРОСЫ БИЗНЕСА

Домнышев А.В.^{1,2}, Затепакин О.А.²

¹*ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат,
г. Новокузнецк., Россия, а aleksey.domnyshev@evraz.com*

²*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк., Россия*

Аннотация. В работе представлены основные направления подготовки персонала реализуемые на ЕВРАЗ ЗСМК для повышения ее качества, адаптивности под вызовы и запросы бизнеса, внедрение новых инструментов и методик, трансформация существующих подходов.

Ключевые слова: Образовательное учреждение, подготовка персонала, тренажерная подготовка, практикоориентированность обучения.

MODERN APPROACHES IN PERSONNEL TRAINING, AS A RESPONSE TO BUSINESS REQUESTS

Domnyshev A.V.^{1,2}, Zatepyakin O.A.²

¹*EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine,
Novokuznetsk, Russia, а aleksey.domnyshev@evraz.com*

²*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia*

Abstract. The paper presents the main areas of personnel training implemented at EVRAZ ZSMK to improve its quality, adaptability to the challenges and demands of the business, the introduction of new tools and methods, and the transformation of existing approaches.

Keywords: Educational institution, personnel training, simulator training, practice-oriented training.

Введение

ЕВРАЗ - глобальная горно-металлургическая компания, лидер на рынках стального проката для инфраструктурных проектов. Ключевая цель – быть в пятерке лидеров на рынках инфраструктурных проектов, миссия-объединять таланты для лучшего будущего наших сотрудников, общества и партнеров. Достижение ключевой и других целей возможно только при своевременном обеспечении потребности предприятия в квалифицированных кадрах как текущей, так перспективной.

Важно отметить, что реализуемые на предприятии проекты развития производства и его цифровизация требует совершенно другого уровня развития компетенций у персонала и повышение его внутренней конкурентоспо-

способности [1]. Внутренняя конкурентоспособность достигается для разных категорий персонала за счет развития различных компетенций: для руководителей – технических, управленческих, знание экономики, для специалистов – на первое место выходят инженерная аналитика, цифровые компетенции, для рабочих – проекты мультискиллинга, быстрой адаптации и др. [2-3].

Для реализации всех этих задач необходима как перестройка системы подготовки персонала внутри организации, так реализация совместных проектов с образовательными учреждениями [4].

Основными направлениями трансформации системы подготовки персонала на предприятии является повышение ее практикоориентированности и цифровизации за счет внедрения современных симуляторов и VR тренажеров.

Задачами в совместной работе с образовательными учреждениями является создание модели непрерывного образования школа-образовательное учреждение-предприятие, развитие внутренней конкурентоспособности сотрудника [5]. Соответственно перенос требования к квалификации и компетенциям в левую на более ранний срок, позволяет на выходе достигать более качественных результатов в подготовке персонала [6].

Основными проектами с образовательными учреждениями в 2022 году была реализация двух ключевых проектов:

1. Создание кластера Цифровая металлургия Кузбасса в рамках проекта «Профессионалитет» совместно с Кузнецким индустриальным техникумом (КИТ) и Кузнецким металлургическим техникумом (КМТ).

2. Реализация проекта Цифровая металлургия совместно с Сибирским Государственным Индустриальным Университетом (СибГИУ).

Более подробно рассмотрим данные проекты.

Трансформация системы подготовки персонала за счет повышения ее практикоориентированности и цифровизации.

Эпоха технологических открытий представляет угрозу для промышленных отраслей и компаний, но вместе с тем становится огромной возможностью [7]. Только при наличии конкурентоспособного персонала можно использовать эти возможности. В связи с этим возникает запрос бизнеса к компетенциям персонала. Одним из направлений в повышение практикоориентированности подготовки в ответ на запросы производства стало разработка и внедрение в процесс подготовки персонала VR тренажеров и симуляторов. Тренажеры полностью моделируют управление техникой и позволяют:

- освоить органы управления техникой;
- проводить управление техникой в режиме тренировки;
- проводить управление техникой в режиме сдачи экзамена;
- отрабатывать нештатных ситуации и др.

Тренажеры в первую очередь используются для подготовки персонала по технологическим профессиям со сложным содержанием труда, там, где отсутствует возможность обучаться на действующем оборудовании и создать отдельные полигоны и лаборатории для отработки навыков [8]. Преимущества тренажерной подготовки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Преимущества тренажерной подготовки

№	Параметр	Преимущества
1	Эффективность	– эффективная эксплуатация оборудования; – сокращение сроков восстановления и уменьшение простоев оборудования
2	Удобство	– получение объективной оценки знаний и умений сотрудников; – возможность повторить и отработать до автоматизма любую операцию
3	Скорость	– сокращение сроков на обучение сотрудников; – диагностика, идентификация и устранение проблем в рамках особого ограничения времени
4	Безопасность	– снижение количества нарушений технологии ведения горных работ; – снижение количества аварийных ситуаций; – безопасные условия обучения без выхода на рабочую площадку

Схема подготовки на тренажерах-симуляторах представлена на рисунке 1. Данный подход включает проверку знаний/навыков после каждого этапа и позволяет изучить все аспекты управления техникой.



Рисунок 1 – Схема подготовки на тренажерах

По итогам 2021 года на основании результатов внедрения тренажеров принято решение продолжить разработку и внедрение симуляторов и виртуальных тренажеров по следующим направлениям:

- обеспечение безопасности труда на предприятиях по добыче руды;
- управлением технологическим процессом с применением виртуальной реальности в агломерационном производстве;
- управление железнодорожным транспортом.

Разработка и внедрение тренажерной техники позволило развить такие элементы эко системы, как:

- ознакомительные профориентационные занятия с школьниками, как потенциальными абитуриентами образовательных учреждений, а также студентами, как будущим сотрудниками;
- организация подготовки новых сотрудников предприятия;
- проведение конкурсов профессионального мастерства среди действующего персонала.

Создание кластера Цифровая металлургия Кузбасса в рамках проекта «Профессионалитет» совместно с Кузнецким индустриальным техникумом и Кузнецким металлургическим техникумом

Проект направлен на построение региональной модели ускоренной практикоориентированной подготовки специалистов в рамках федерального проекта «Профессионалитет» в партнерстве ЕВРАЗ ЗСМК, КИТ и КМТ. Проект обеспечит развитие кадрового потенциала металлургической отрасли региона. В рамках реализации данного проекта в Кузбассе создано в 2022 году всего два подобных кластера, один из которых на базе КИТ, КМТ и ЕВРАЗ ЗСМК.

Для студента проект позволяет:

- построить карьеру в крупной международной компании;
- получить уникальные навыки в период обучения;
- гарантировать трудоустройство в ЕВРАЗ после окончания образовательного учреждения;
- получить диплом специалиста за сокращенные сроки обучения.

Для техникумов кластера проект позволяет:

- кардинально развить учебно-материальную базу за счет федерального финансирования в размере 100 млн.руб. и финансирования со стороны индустриального партнера;
- развить компетенции преподавательского состава за счет участия в программах обучения и стажировки;
- повысить привлекательность и рейтинг образовательных учреждений.

Для предприятия проект позволяет:

- снизить сроки подготовки специалистов на один год, до 2 лет 10 месяцев;
- повысить практикоориентированность подготовки под индустриального партнера;
- повысить качество отбора абитуриентов в техникумы и как следствие уровень выпускников.

В результате реализации проекта в 2022 году был осуществлен набор 6 групп общей численностью 150 студентов в рамках данного проекта. В 2023 и последующие годы предусмотрено увеличение контрольных цифр приема в рамках данного проекта.

Реализация проекта «Цифровая металлургия» совместно с Сибирским государственным индустриальным университетом

Реализация проекта Цифровая металлургия направлена на подготовку принципиально нового уровня специалистов для компании, специалистов, сочетающих в себе технологическую экспертизу и владение инструментами цифровизации: использование цифровых подсказчиков и цифровых двойников, владение базовыми основами инженерной аналитики и др.

Проект позволяет студентам:

- обучиться по сетевым образовательным программам СибГИУ с участием ведущих ВУЗов страны в области металлургии, материаловедения и информационных технологий;

– участвовать в реальных проектах по разработке гибридных и цифровых двойников технологических линий металлургического производства стратегического партнера СибГИУ – ЕВРАЗ ЗСМК;

– узнать и применить на практике принципы построения дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) в металлургии

– продолжить обучение по специальности в магистратуре любого из ТОПовых ВУЗов России;

– реализовать индивидуальный карьерный трек в ЕВРАЗе.

Для ВУЗа проект позволяет:

– повысить качество и практикоориентированность подготовки;

– привлечь инвестиции от индустриального партнера в развитие материально-технической базы;

– вывести интеграцию и взаимодействие между экспертами предприятия и ВУЗа на принципиально новый уровень.

Для предприятия проект позволяет:

– гарантировать количество и качество подготовки студентов по необходимым компетенциям на позиции руководителей и специалистов;

– повысить привлекательность предприятия в целом и специальностей отдельно.

По итогам приемной компании 2022 года в СибГИУ укомплектована группа из 21 студента по направлению «Металлургия» профиль «Цифровая металлургия». Основные преимущества для студентов, которые предусматривает программа подготовки:

– привлечение к подготовке студентов преподавателей МФТИ в рамках программы сетевого взаимодействия;

– единовременная выплата 10 тыс.руб. каждому студенту группы;

– разработка индивидуальных карьерных треков для студентов.

Заключение

Таким образом, реализация мероприятий по разработке современных средств обучения, а также запуск новых проектов с образовательными учреждениями позволил:

во-первых, повысить качество подготовки по технологически сложным профессиям, где невозможно построить систему обучения на действующем оборудовании;

во-вторых, развить материальную базу в образовательных учреждениях, в т.ч. за счет федерального бюджета в размере 100 млн.руб. и финансирования со стороны ЕВРАЗ ЗСМК;

в-третьих, обеспечить набор в образовательные учреждения, обеспечив конкурс 1,9-2,1 человека на место в техникумах;

в-четвёртых, снизить сроки подготовки в учреждениях среднего профессионального образования до 2 лет 10 месяцев.

Такой подход к подготовке обучающихся позволяет быстро реагировать на запрос со стороны бизнеса как в текущем моменте, так и в перспективе, повысить гибкость и адаптивность системы обучения. Результатом является изменение показателя внутренней конкурентоспособности персонала,

готового к решению задач более высоко уровня [9].

Библиографический список

1. Вайл, П. Цифровая трансформация бизнеса: Изменение бизнес-модели для организации нового поколения / П. Вайл // Москва : Альпина Паблишер, 2019. – 257 с.
2. Шматко, Н.А. Компетенции инженерных кадров: опыт сравнительного исследования в России и странах ЕС / Н.А. Шматко // Форсайт. – № 2012. – № 4 Т. 6. – С. 31-47.
3. Легкий, С. Навыки и компетенции руководителя / С. Легкий // Бизнес. ру – Режим доступа: <https://www.business.ru/article/1456-professionalnye-navyki-i-kompetentsii-rukovoditelya>
4. Домнышев, А.В. Формирование экосистемы на базе учебного центра / А. В. Домнышев, науч. рук. О.А. Затепакин // Студент года 2021 : сборник статей Международного учебно-исследовательского конкурса, 19 мая 2021 г. – Петрозаводск : Новая наука, 2021. – Ч. 4. – С. 34-41. – URL: <http://library.sibsiu.ru>.
5. Домнышев, А.В. Профориентационная работа как один из ключевых элементов эко системы / А. В. Домнышев, научный руководитель О. А. Затепакин // Лучшая научная статья 2021 : сборник статей XLIII Международного научно-исследовательского конкурса, 30 июня 2021 г. – Пенза. – С. 51–53. – URL: <http://library.sibsiu.ru>.
6. Домнышев А.В. Построение системы внутренней кокурентоспособности персонала на промышленном предприятии как фактор развития и удержания сотрудников и развития предприятия / А.В. Домнышев, научный руководитель О.А. Затепакин// // Лучшая научная статья 2021 : сборник статей XI Международного научно-исследовательского конкурса «Конкурс молодых ученых», 15 июня 2022 г. – Пенза. – URL: <http://library.sibsiu.ru>.
7. Домнышев А.В. Современные подходы в подготовке кадров для промышленного производства на основе автоматизации и цифровизации процесса обучения / А.В. Домнышев, научный руководитель О.А. Затепакин// // Лучшая научная статья 2021 : сборник статей XIV Всероссийская научно-практическая конференция «высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации», 23 января 2022 г. – Пенза. – URL: <http://library.sibsiu.ru>.
8. Сибел, Т Цифровая трансформация. Как выжить и преуспеть в новую эпоху / Томас Сибел. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2021. – 256 с
9. Капустянова К.А., Гелета И.В. Совершенствование системы оценки кокурентоспособности персонала на предприятии//Символ науки.–2016. – №11-1. – С. 67–69

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 3: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ	4
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОТВОДА <i>Чинахов Д.А., Акимов К.О., Полегешко С.А.</i>	4
ВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ В КАПЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ <i>Сарычев В.Д., Чинахов Д.А., Грановский А.Ю., Устюжанин С.В., Сарычев Д.В., Коновалов С.В.</i>	12
ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ НАПЫЛЕНИЯ НА СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВОВ AL-5SI, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ СВАРКИ <i>Су Ч., Коновалов С.В., Чэнь С., Хуанг Л.</i>	18
ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРОЧНОГО ФЛЮСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Михно А.Р., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Жуков А.В., Бендре Ю.В.</i>	22
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВОВ А5М, ВТ-1, С2 ПОДВЕРГНУТЫХ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКЕ <i>Шляров В.В., Серебрякова А.А., Аксенова К.В., Загуляев Д.В., Устинов А.М.</i>	27
РАЗРАБОТКА НАПЛАВОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ SN-SB-CU ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Михеев Р.С., Калашников И.Е., Катин И.В., Быков П.А.</i>	35
ИССЛЕДОВАНИЕ ОБШИРНОЙ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ, СФОРМИРОВАННОЙ НА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ <i>Шевчук Е.П., Плотников В.А., Макаров С.В.</i>	40
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ <i>Федоров В.В., Клименов В.А., Черепанов Р.О.</i>	49
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА AL-CO-CR-FE-MN-Ni С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ <i>Осинцев К.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Панченко И.А., Воробьев С.В., Бессонов Д.А.</i>	56
КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ИНТРЕМЕТАЛЛИДНОГО ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ TI-AL <i>Яковлев В.И., Собачкин А.В., Логинова М.В., Мясников А.Ю., Барсуков Р.В.</i>	61
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В УСЛОВИЯХ ДУХСТРУЙНОЙ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 45 <i>Чинахов Д.А., Рзаев Э.Д.</i>	70
ОСОБЕННОСТИ СПЛАВЛЕНИЯ, СТРУКТУРО- И ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ И ПРОВОЛОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ <i>Клименов В.А., Федоров В.В., Черепанов Р.О., Хань Ц., Стрелкова И.Л.</i>	80
ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ПРОВОЛОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Чумаевский А.В., Панфилов А.О., Зыкова А.П., Осипович К.С., Николаева А.В., Добровольский А.Р., Утяганова В.Р., Шамарин Н.Н., Никонов С.Ю.</i>	88

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ И РАДИУСА РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ИНСТРУМЕНТА НА ОБРАЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МИКРОСТРУКТУРУ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Джигвишов В.Ф., Рзаев Э.Д.</i>	98
МИКРОСТРУКТУРА КЕРАМИКИ V_4C-CrV_2 , СИНТЕЗИРОВАННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА	
<i>Дик Д.В., Гудыма Т.С., Филиппов А.А., Крутский Ю.Л.</i>	107
ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛЮСА НА ОСНОВЕ ШЛАКА СИЛИКОМАРГАНЦА И ФД-УФС	
<i>Крюков Р.Е., Михно А.Р., Жуков А.В., Бендре Ю.В.</i>	114
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО СВИНЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИНДУКЦИЕЙ 0,5 Тл	
<i>Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В.</i>	121
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСНОВОЙ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКЕ	
<i>Будовских Е.А., Романов Д.А., Филяков А.Д., Бащенко Л.П., Ионина А.В.</i>	126
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ИЗНОСА ПУТЕМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНО СОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОШОК ТИТАНА	
<i>Киселев П.В., Комаров А.А., Михно А.Р., Дробышев В.К.</i>	131
ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ БЕСКИСЛОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМАХ V_4C-MeV_2 ($Me = Ti, Cr, Zr$)	
<i>Гудыма Т.С., Крутский Ю.Л., Крутская Т.М., Дик Д.В., Шестаков А.А., Апарнев А.И., Логинов А.В.</i>	138
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ	
<i>Непочатов Ю.К., Плетнев П.М., Гудыма Т.С.</i>	143
ПЕРСПЕКТИВЫ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ МЕТОДОМ ЭШН	
<i>Быстров В.А.</i>	149
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВА AL7075 ПОСЛЕ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ	
<i>Дробышев В.К., Михно А.Р., Панченко И.А., Лабунский Д.Н.</i>	158
СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Mo-Au	
<i>Филяков А.Д., Романов Д.А., Соснин К.В., Московский С.В.</i>	162
ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРОКАТА ИЗ ОТБРАКОВКИ ЗАГОТОВОК РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ	
<i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В.</i>	168
СЕКЦИЯ 4: РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА, ОХРАНА ТРУДА	176
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО КОНЦЕНТРАТА, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ УГЛЕОТХОДОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ	
<i>Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Улмасов А.Б., Кунц О.А.</i>	176

ПРОВЕРКА ЗНАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ОХРАНЫ ТРУДА И КРИТЕРИИ ГОТОВНОСТИ РАБОТНИКА К БЕЗОПАСНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	
<i>Чернов К.В.</i>	182
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИРОСТА МАССЫ ШИХТОВЫХ АГРЕГАТОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ БРИКЕТОВ	
<i>Павловец В.М., Домнин К.И.</i>	193
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БРИКЕТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ И СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИЗБИРАТЕЛЬНОМУ СМЕШИВАНИЮ	
<i>Павловец В.М., Домнин К.И.</i>	203
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИЙ С МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРИСТОГО СТЕКЛОКОМПОЗИТА	
<i>Скирдин К.В., Казьмина О.В.</i>	211
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА	
<i>Баженова Н.Н., Водолеев А.С., Гибадуллин Р.М.</i>	219
КЕДР КАК ОБЪЕКТ РЕКУЛЬТИВАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ КУЗБАССА	
<i>Водолеев А.С., Захарова М.А., Толстикова А.Ф., Баженова Н.Н.</i>	227
АГРОТЕХНИКА ВЫРАЩИВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ	
<i>Водолеев А.С., Захарова М.А., Постельников В.Н., Ким В.И., Бондарев М.Р.</i>	232
СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ЭКОБИОМОНИТОРИНГА ПРИ КОНСЕРВАЦИИ СКЛАДИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Захарова М.А., Водолеев А.С., Лубенцева Ю.А., Толстикова А.Ф., Баженова Н.Н.</i>	240
ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ	
<i>Корнилов Д.А., Водолеев А.С., Грибкова Е.О., Гибадуллин Р.М., Конаков С.В.</i>	247
ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАВАЮЩЕГО ВОДНОГО РАСТЕНИЯ ЭЙХОРНИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, ОБРАЗОВАННЫХ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	
<i>Гашишникова А.О., Михайличенко Т.А.</i>	259
ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. НОВОКУЗНЕЦКА И ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ	
<i>Коноплев Д.Д., Коротков С.Г., Домнин К.И.</i>	265
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛУРГИИ	
<i>Вахтарова К.О., Михайличенко Т.А.</i>	274
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ АССОРТИМЕНТА И КАЧЕСТВА УГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ТЕРМООБРАБОТКИ УГЛЕЙ	
<i>Мурко В.И., Карпенков В.И., Темлянцева Е.Н., Аникин А.Е.</i>	279
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ	
<i>Грибкова Е.О., Водолеев А.С., Гибадуллин Р.М., Конаков С.В., Корнилов Д.А., Макшанов Д.В.</i>	289
РОЛЬ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В МЕТАЛЛУРГИИ	
<i>Волченкова О.А., Михайличенко Т.А.</i>	297
ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАМОВ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К АГЛОШИХТЕ.....	306
<i>Урусов Д.Н., Михайличенко Т.А.</i>	306

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ ЗА ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ТЭЦ ФИЛИАЛА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ГАЗООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Големинов С.П., Михайличенко Т.А.</i>	314
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ТЕХНОЛОГИЯХ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ <i>Павловец В.М.</i>	322
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ДОБАВКИ <i>Павловец В.М.</i>	329
АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ОХРАНЫ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Романова В.А., Дробышев В.К.</i>	338
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ВЗАИМОВОСТРЕБОВАННЫХ УСТАНОВОК С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА НА СТАДИИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Филиппов В.А.</i>	344
СЕКЦИЯ 5: АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	352
АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ПРИ МОНТАЖЕ ОБОЖЖЕННЫХ АНОДОВ <i>Немчинова Н.В., Тузов А.В., Геройменко А.В., Анончук И.И.</i>	352
ИДЕНТИФИКАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ЗАВИСИМЫМИ ОТ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ <i>Свинцов М.М., Скударнова Н.В., Ивушкин К.А., Макаров Г.В., Мышляев Л.П.</i>	358
ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ СО СТРУКТУРНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТЬЮ <i>Загидуллин И.Р., Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Свинцов М.М.</i>	363
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ <i>Коровин Д.Е., Грачев В.В., Макаров Г.В., Кулюшин Г.А., Скударнова Н.В.</i>	369
МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАНТОВАНИЯ УГОЛЬНОГО ВАГОНООПРОКИДЫВАТЕЛЯ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ "ПЧ-АД" <i>Клевцов С.А., Модзелевский Д.Е.</i>	376
СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ, ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ <i>Макаров Г.В., Мышляев Л.П., Чинахов Д.А., Ивушкин К.А.</i>	384
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УДАЛЕННОЙ ПУСКОНАЛАДКИ НА КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ <i>Кулюшин Г.А., Мышляев Л.П., Грачев В.В., Коровин Д.Е.</i>	391
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА «АЛЮМИНИШИК» ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В МИКСЕРЕ ЛИТЕЙНОГО ОТДЕЛЕНИЯ <i>Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А.</i>	400
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА, КАК ОТВЕТ НА ЗАПРОСЫ БИЗНЕСА <i>Домнышев А.В., Затеякин О.А.</i>	406

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2022»

Труды XXIII Международной научно-практической конференции

Часть 2

Под общей редакцией А.Б. Юрьева

Технический редактор

Г.А. Морина

Компьютерная верстка

Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 16.11.2022 г.

Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офисная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 24,0 Уч.-изд. л. 26,4 Тираж 300 экз. Заказ № 296

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ