

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

**НАУКА И МОЛОДЕЖЬ:
ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ**

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВЫПУСК 27

*Труды Всероссийской научной конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
16 – 17 мая 2023 г.*

ЧАСТЬ I

Под общей редакцией профессора С.В. Коновалова

**Новокузнецк
2023**

ББК 74.48.288
Н 340

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор Коновалов С.В.,
д-р физ.-мат. наук, профессор Громов В.Е.,
канд. техн. наук Шевченко Р.А.,
канд. техн. наук, доцент Темлянцева Е.Н.

Н 340

Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16–17 мая 2023 г. Выпуск 27. Часть I. Естественные и технические науки / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. С.В. Коновалова – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 385 с. : ил.

ISSN 2500-3364

Представлены труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по результатам научно-исследовательских работ. Первая часть сборника посвящена актуальным вопросам в области естественных наук, металлургических процессов, технологий, материалов и оборудования, экологии, безопасности, рациональному использованию природных ресурсов.

Материалы сборника представляют интерес для научных и научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

ISSN 2500-3364

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

I ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 536.7:546.666

КОНСТАНТЫ ПЛАВЛЕНИЯ БРОМИДА ЭРБИЯ (III)

Чумачкова Е.Г., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: koax@sibsiu.ru*

Проводили серию измерений температуры и энтальпии плавления ErBr_3 на приборе TG-DSC-1600 °C Labsys Evo-gas option (SETARAM instrumentation) с ДСК-сенсором в форме пластины. На первом этапе выполнили градуировку и калибровку прибора, а затем исследовали охарактеризованные образцы ErBr_3 . Полученные результаты сравнивали с серией аналогичных экспериментов, проведенных нами методом количественного ДТА на дериватографе системы Паулик, Паулик, Эрдей и другими литературными данными.

Ключевые слова: метод ДСК, бромид эрбия (III), температура плавления, энтальпия плавления.

Лантаниды и их соединения давно уже не относятся к «застойным» зонам периодической системы элементов, однако потенциальные возможности их использования в высокотехнологичных областях раскрыты далеко не полностью. В теоретическом плане интерес к систематическому экспериментальному определению термических констант соединений лантанидов обусловлен возможностью выявления новых особенностей и уточнения частных закономерностей в лантанидном ряду. При этом приходится учитывать, что лабораторная база для научных исследований постоянно совершенствуется и возникает необходимость оценивать сходимость результатов, полученных на разных приборах. В настоящей работе приведены результаты определения термических констант плавления ErBr_3 на приборе TG-DSC-1600°C Labsys Evo-gas option с ДСК-сенсором в форме пластины и проведено сравнение с нашими же результатами, полученными ранее [1] с использованием дериватографа системы Паулик, Паулик, Эрдей и метода ДТА.

Экспериментальная часть

Синтез. Нами разработан способ получения высокочистого безводного бромида эрбия из металлического эрбия (ЭрМ-1) и брома (хч) и устройство для его осуществления – вакуумированный двухсекционный (секции под углом 100-120°) кварцевый реактор [1]. Полученный продукт очищали вакуумной дистилляцией при 1450К. Для этого вещество помещали в другой кварцевый реактор (две последовательные секции под углом 180°). Вторая секция из двух служила для конденсации возогнанного из первой секции вещества. Реактор с дистиллятом ErBr_3 охлаждали, отпаивали и переносили в сухой бокс для извлечения бромида.

Извлечённую из реактора с дистиллятом (для этого реактор в сухом боксе разбивали) и измельчённую в ступке соль распределяли по ампулам из молибденового вакуум-плотного стекла, ампулы отпаивали и укладывали в сухой бокс для хранения. Всего проводили три параллельных синтеза вещества ErBr_3 . Для опытов на дериватографе и TG-DSC-1600 °C использовалось вещество из разных молибденовых ампул, но из тех же трёх параллельных синтезов ErBr_3 .

Химический анализ. Для определения содержания брома использовали гравиметрический анализ (по массе AgBr), а эрбия – прямое комплексонометрическое титрование раствором трилона Б с визуальной индикацией точки стехиометричности. В полученном веществе второго синтеза:

	Er	Br
Найдено, % масс.:	40,90±0,20	58,80±0,11
Для ErBr_3 вычислено, % масс.:	41,10	58,90
Суммарное содержание элементов:	99,70±0,23 (P = 0,95; f=4).	

Рентгенофазовый анализ. Рентгенофазовым анализом установили монофазность синтезированных образцов ErBr_3 . Рентгеновскую съёмку порошка бромида эрбия (III) проводили на дифрактометре ДРОН-2.0 в стандартной кварцевой кювете. Кювету заполняли в сухом боксе извлечённой из реактора после возгонки солью и герметично закрывали сверху влагонепроницаемой плёнкой. Параметры съёмки, порядок и методика индицирования линий, дифракционные данные, параметры гексагональной кристаллической решетки ErBr_3 приведены в [1].

ДСК с пластиной-сенсором. Настоящую серию измерений проводили на приборе TG-DSC-1600 °C Labsys Evo-gas option (SETARAM instrumentation) с ДСК-сенсором в форме пластины¹, на которой размещают два тигля. Порошки солей в сухом боксе помещали в алундовый тигель, диаметром 5 мм и высотой 11 мм и закрывали крышкой. В тигель-эталон не добавляли никакого вещества. Тигли подбирали «парами», чтобы их массы были приблизительно одинаковыми. В печное пространство во время опыта подавался Ar со скоростью 20 мл/мин. Нагревание и охлаждение проводили со скоростью 15 К/мин. Все образцы использовали в опытах только один раз. Платинородий-платиновую термопару в области наших измерений ≈ 1200 К отградуировали по температуре плавления серебра - одной из основных реперных точек МПТШ-68 [2]; для этого записывали 3 ДСК-кривых образца Ag (99,99).

ДСК измеряет энергию, необходимую для поддержания эталона и образца при одной и той же температуре во время превращения в образце. Типичная ДСК-кривая образца ErBr_3 приведена на рисунке 1. В программе управления прибором предусмотрено автоматическое интегрирование пика превращения с определением величины «Heat» ($\mu\text{В}\cdot\text{с}/\text{мг}$) как площади пика

¹ Измерения проведены в Центре коллективного пользования «Материаловедение» СибГИУ ведущим инженером А.В. Федосеевым

на графике зависимости теплового потока «Heat flow» ($\mu\text{В}$) от времени (с) и отнесённой к массе образца (мг).

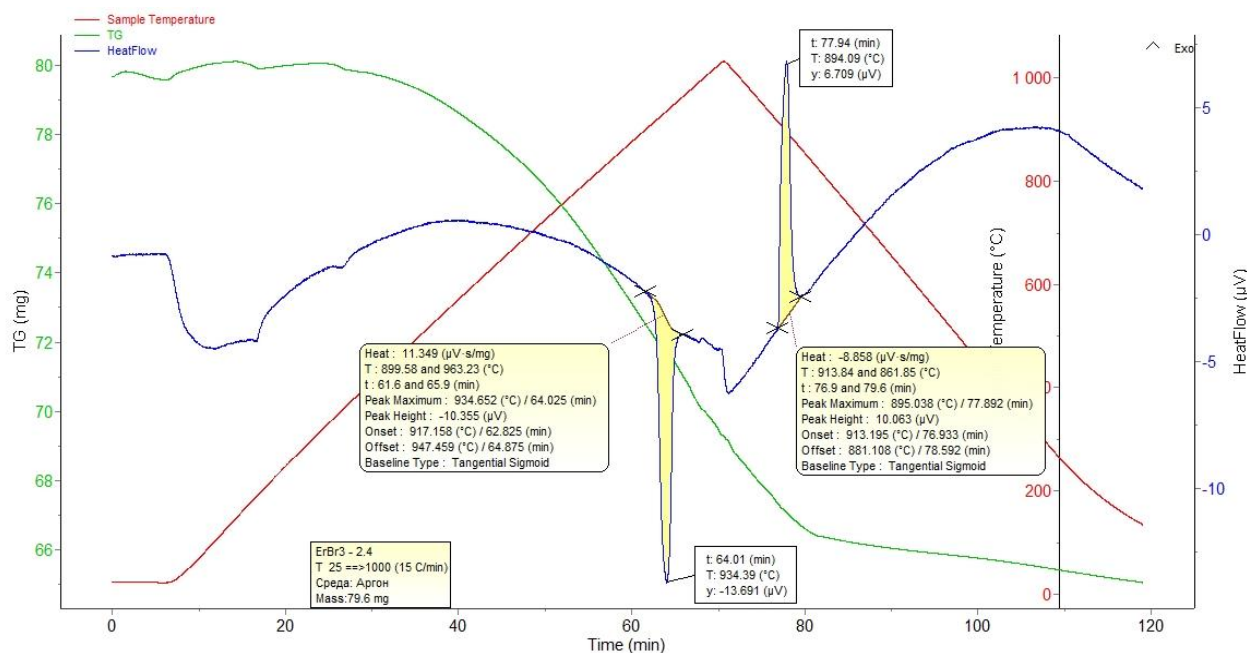


Рисунок 1 - ДСК-кривая образца ErBr₃ - 2.4

Острая треугольная форма пика кристаллизации (рисунок 1) и отсутствие дополнительных эффектов при кристаллизации открывают возможность использовать для дальнейших расчётов не только данные нагревания, но и данные охлаждения. От величины Heat можно перейти к энтальпии фазового перехода, в частности к молярной энтальпии плавления вещества $\Delta_m H^{\circ}$ (кДж/моль), но для этого необходима калибровка теплового потока:

$$\Delta_m H^{\circ} = K \cdot \text{Heat} \cdot M, \quad (1)$$

где K – калибровочный коэффициент, Вт/В;

M – молярная масса вещества, г/моль.

Калибровку теплового потока проводили по веществам NaCl(хч), NaF(ос.ч), KCl(ос.ч), поскольку их температуры плавления 1074К, 1269К и 1044К соответственно близки известной температуре плавления ErBr₃ (1200К) [1], а энтальпии плавления определены с высокой точностью [3,4]. Для калибровки записывали 8 ДСК-кривых NaCl, 4 – NaF и 5 – KCl. При этом использовали как пики нагревания, так и пики охлаждения. Было установлено статистически-значимое увеличение калибровочного коэффициента K с ростом температуры:

$$K_{\text{нагр}} \cdot 10^3 = 1,22 + 4,7 \cdot 10^{-3} T, \text{ Вт/В}, R^2 = 0,83; \quad (2)$$

$$K_{\text{охл}} \cdot 10^3 = -15,08 + 20,9 \cdot 10^{-3} T, \text{ Вт/В}, R^2 = 0,89. \quad (3)$$

Результаты ДСК-измерений образцов ErBr₃ приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты ДСК-измерений образцов ErBr₃

№ ДСК-кривой	Масса образца, m, мг	Нагревание		Охлаждение	
		T _m , К; МПТШ 68	Δ _m H°, кДж/моль	T _m , К; МПТШ 68	Δ _m H°, кДж/моль
1.1	70,0	1201,5	50,71	1209,6	65,30
1.2	68,1	1200,8	46,65	1218,3	66,36
1.3	66,7	1190,3	54,47	1204,2	68,21
1.4	69,7	1192,3	48,69	1211,3	60,20
1.5	94,4	1197,3	34,73	1211,2	50,77
1.6	94,4	1190,8	41,69	1213,0	51,29
2.1	107,8	1198,7	33,85	1201,6	45,51
2.2	78,0	1193,8	31,07	1200,7	33,17
2.3	94,4	1198,5	34,36	1202,0	35,99
2.4	79,6	1197,4	31,86	1202,0	35,06
Средние значения и доверительный интервал		1196,1±2,9 P=0,95 f =9	40,8±6,2 P=0,95 f =9	1207,4±9,0 P=0,95 f =9	51,2±11,5 P=0,95 f =9

Для сравнения приведём результаты количественного ДТА из [1] - Δ_mH°(ErBr₃) нагревание: 41,37; 24,54; 39,30; 35,62; 35,10; 19,81; 17,62; 17,61 и Δ_mH°(ErBr₃) охлаждение: 22,16; 19,91; 31,68; 35,96; 34,60; 16,10; 15,03; 14,73. Видим, что около половины результатов из [1] входит в область рассеяния данных ДСК (они выделены полужирным шрифтом) и это является положительным фактом, но при ДСК-измерениях не отмечены результаты менее 31 кДж/моль. Поскольку, как в методе ДСК, так и в методе количественного ДТА проблемой является учёт тепловых потерь, то мы отдаём предпочтение данным ДСК. Что касается температуры плавления, то области и центры рассеяния данных ДТА [1] и ДСК (таблица 1) совпадают.

В результате совместной обработки данных ДСК при нагревании и охлаждении получили: Δ_mH°(ErBr₃) = 45,6±5,7 кДж/моль (P=0,95; f=19), T_m(ErBr₃) = 1201,7±3,6К (P=0,95; f=19). Справочных данных по энтальпии плавления ErBr₃ нет, а температура плавления, измеренная нами подтверждает данные [5] (1196К). По энтальпии и температуре плавления рассчитывали энтропию плавления: Δ_mS°(ErBr₃) = 38,0±5,0 Дж/моль·К.

Библиографический список

1. Ю.В. Горюшкина, С.В. Зенцова, Г.М. Тираков, Г.Л. Борщевская. В.Ф. Горюшкин. Синтез и термические константы плавления бромида эрбия (III)// Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отдел металлургии: Сб.науч.тр. Вып.25/ Редколл.: Л.П. Мышляев (главн. ред.) [и др.]: Сибирск. государств.индустр. университет. – Новокузнецк, 2010. - С.9 - 14.
2. Термические константы веществ: Справ. Вып.9/ Под ред.В.П. Глушко, В.А. Медведева и др. М.: Наука, 1979. 574с.

3. Термические константы веществ: Справ. Вып.10, ч.I/ Под ред.В.П. Глушко, В.А. Медведева и др. М.: Наука, 1981. 297с.

4. Термические константы веществ: Справ. Вып.10, ч.II/ Под ред.В.П. Глушко, В.А. Медведева и др. М.: Наука, 1981. 441с.

5. Spedding F.H., Daane A.H. The Rare-Earth Metals// Metallurgical Reviews, 1960. V.5, No. 19. – P. 297 – 341.

УДК 669.017.16

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ДОБАВОК СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Зорин И.А., Осинцев К.А., Лапшов М.А., Коновалов С.В.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара, e-mail: zorin_20@mail.ru*

Данное исследование посвящено изучению влияния многоступенчатой термической обработки на микротвердость алюминиевых сплавов серии Al-Mg-Si с избытком кремния, а также малыми добавками Sc и Zr. В работе приводились эксперименты вплоть до 4 ступеней ТО, а также изучалось влияние прокатки. Установлено что многоступенчатая термическая обработка вызывает лишь выделение частиц β'' (Mg_5Si_6), упрочняющих частиц со скандием обнаружено не было, судя по всему ввиду его малой концентрации.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, легирование, многоступенчатая термическая обработка, микротвердость, искусственное старение, просвечивающая микроскопия, наноразмерные упрочняющие частицы.

Введение

Алюминиевые сплавы обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и свариваемостью, в связи с чем находят все большее применение в различных отраслях промышленности [1]. Сплавы серии Al-Mg-Si являются очень востребованной группой алюминиевых сплавов, а их основной упрочняющий фазой является β'' (Mg_5Si_6) [2]. Избыток кремния в этих сплавах положительно сказывается на механические свойства [3]. Добавки скандия и циркония также позволяют улучшить прочностные свойства этих сплавов. Скандий способствует модифицированию литой структуры и образованию наноразмерных дисперсоидов Al_3Sc [4]. Цирконий, в свою очередь, предотвращает рост зерна при высоких температурах, улучшает свариваемость и снижает восприимчивость к коррозии [5]. Однако, добавление скандия в сплавы системы Al-Mg-Si затруднено из-за его взаимодействия с кремнием и риском развития тройного соединения $AlSc_2Si_2$, которое негативно воздействует на механические свойства [6]. Недавние исследования показали, что развитие данного соединения возможно избежать, если правильно

подобрать многоступенчатую термическую обработку [7].

Данная работа направлена на изучение влияния многоступенчатой термической обработки на сплавы Al-Mg-Si с избытком кремния, и малыми скандиево-циркониевыми добавками.

Методика

Для изучения многоступенчатого отжига и прокатки был выбран сплав $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$. Сами режимы отражены на рис 1 а, б.

Экспериментальные плавки проводились в среднечастотной индукционной печи. В качестве шихты для расплава использовались следующие материалы – первичный алюминий марки А85 (чистота 99,8 %), первичный магний марки МГ90 (99,9 %), лигатуры Al-Si12, Al-Sc2 и Al-Zr5.

Для всех исследуемых образцов была определена микротвердость. Испытания на микротвердость производили на цифровом стационарном твердомере по методу микро–Виккерса на модели HV-1000 (усилия испытания 0,2452 Н).

Методом просвечивающей микроскопии исследованы наночастицы в сплаве $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$ после отжига $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 8ч + $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 8ч + $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 0,5ч + $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5ч. Исследование проведено на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения Tescan G2 30 Twin, оснащенный системой энергодисперсионного рентгеноанализа EDAX.

Результаты исследований и их обсуждение

Микротвердость

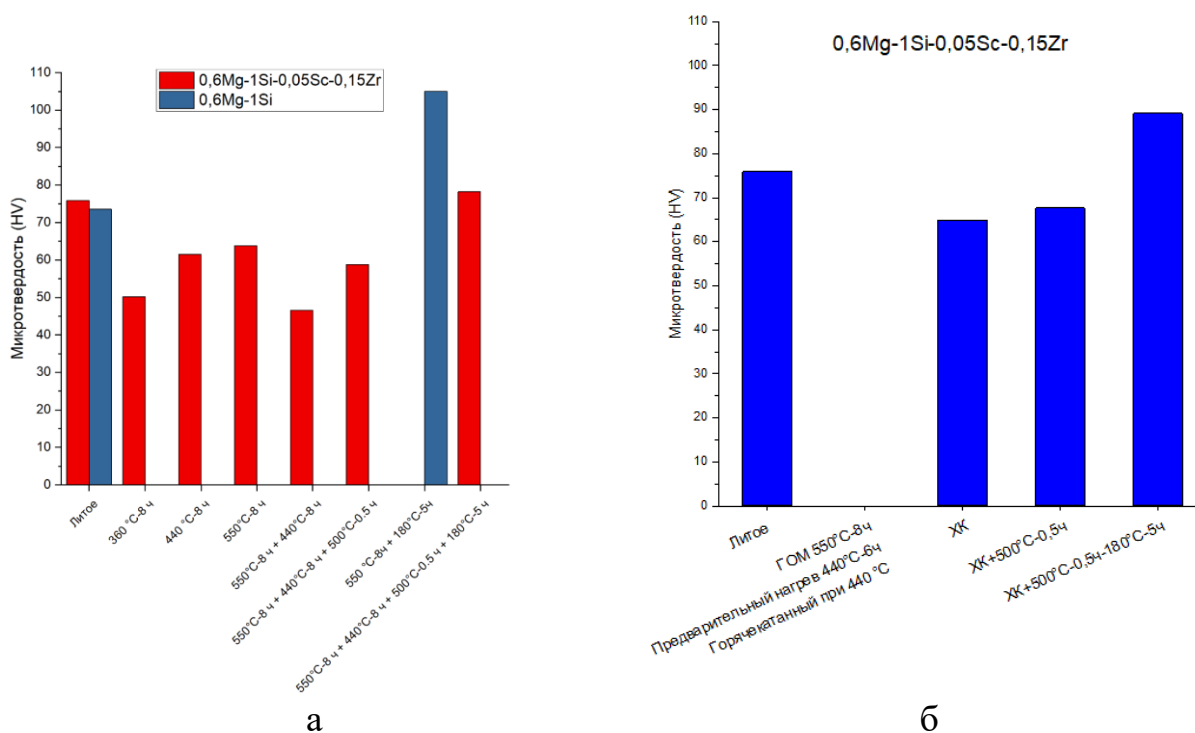


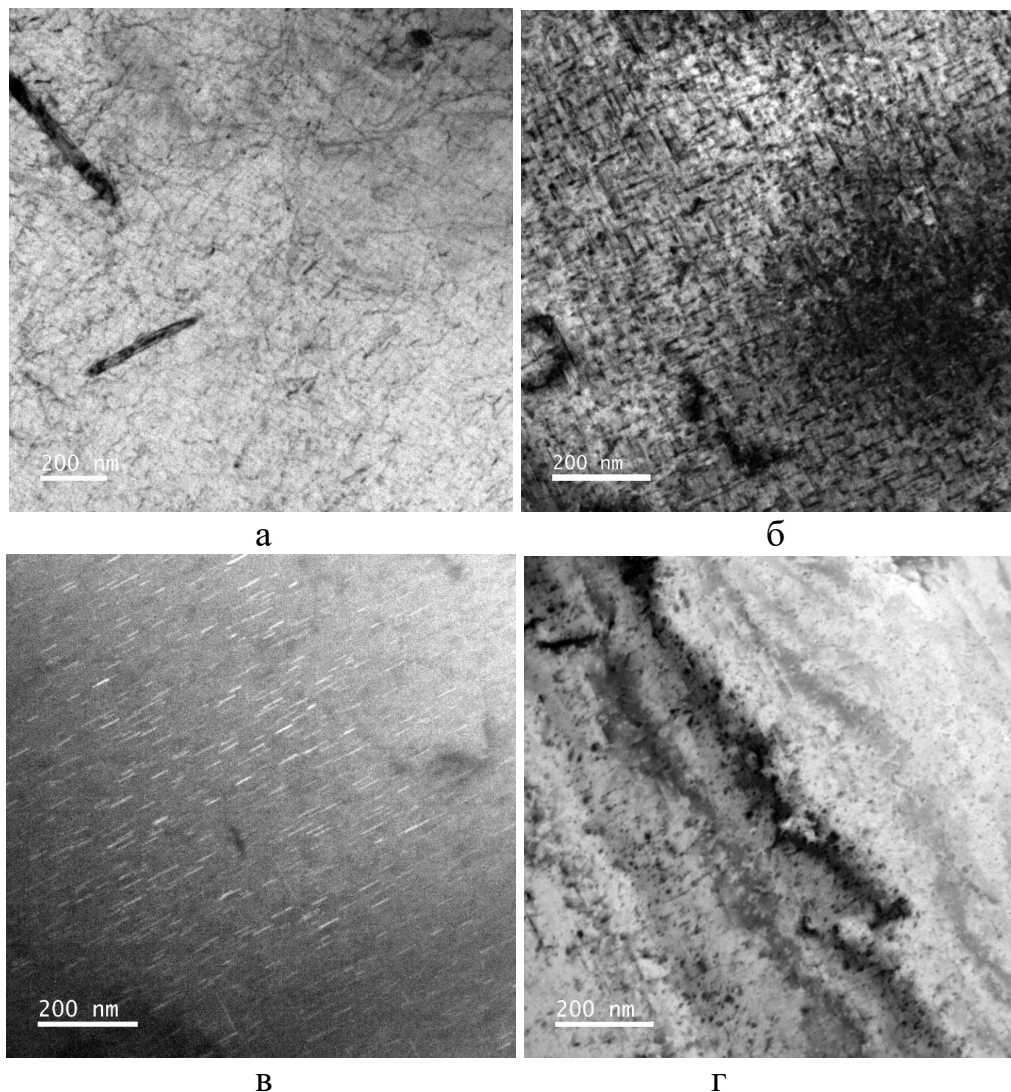
Рисунок 1 – Микротвердость сплава $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$ - а) после отжигов; б) после прокатки и отжигов

Термообработка сплава $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$ при температуре $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ведет к понижению прочностных свойств, что вероятнее всего связано с тем, что метастабильные $(\text{AlSi})_3\text{Sc}$ быстро превращаются во вредные равновесные AlSi_2Sc_2 . При повышении температуры обработки до $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается меньшее падение микротвердости, это явление можно связать с тем, что цирконий начинает при данной температуре выделяться из твердого раствора, образуя вокруг $(\text{AlSi})_3\text{Sc}$ защитную оболочку, и тем самым замедляя дальнейший рост данных частиц. Еще одной причиной может быть недостаточное количество скандия для их образования.

При термообработке, где первая ступень выдержки $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов с закалкой в воду с целью растворения максимального количества магния и скандия в твердом растворе и последующей выдержкой при $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов, также показывает снижение прочностных свойств. Это так же можно объяснить образованием крупных фаз типа Si_2Sc или AlSc_2Si_2 в течение второй ступени выдержки. Последующая выдержка при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 0,5ч и искусственное старение ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$ -5ч) приводит к незначительному росту микротвердости. В целом, после четырехступенчатой термической обработки, микротвердость возрастает лишь на 5 HV. В то же время использование прокатки приводит к значительно более ярко выраженным результатам микротвердости, которая повышается на 13 HV. Такой эффект может быть связан с появлением дополнительных источников роста упрочняющих частиц β'' (Mg_5Si_6). В то же время роста свойств от частиц $(\text{AlSi})_3\text{Sc}$ так и не наблюдается.

Многоступенчатая термическая обработка с заключительным этапом в виде искусственного старения при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 ч приводит к распаду пересыщенного твердого раствора алюминия с образованием метастабильных фаз β'' (Mg_5Si_6) и β' (Mg_2Si), характеризующихся высокой плотностью распределения и объемной долей (рисунок 2). Высокодисперсные частицы β'' -фазы когерентные с алюминиевой матрицей равномерно распределены в объеме зерен в виде очень тонких игл длиной до 50 нм (рисунок 2 а, б). На фоне их наблюдаются частицы большего диаметра и длиной до 70 нм β' -фазы (рисунок 2 в, г). Наночастицы $(\text{AlSi})_3\text{ScZr}$ обнаружены не были, что может говорить о том, что содержания скандия недостаточно для их образования. Необходимо отметить, что хотя скандий напрямую и не вызывает роста прочности и образования упрочняющих частиц $(\text{AlSi})_3\text{ScZr}$, но он может ускорить выделение β'' (Mg_5Si_6). Так, повышение его концентрации будет способствовать образованию β'' (Mg_5Si_6). Однако для проверки этой теории нужны дополнительные исследования, в том числе и изменение количества ступеней термической обработки.

Просвечивающая электронная микроскопия



а, б, г – светлопольные изображения; в – темнопольные изображения в рефлексе – $(200)_{\beta'}$

Рисунок 2 – Электронно-микроскопические изображения микроструктуры $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$ - 550°C , 8 ч + 440°C , 8 ч + 500°C , 0,5 ч + 180°C , 5 ч

Выводы

Согласно результатам исследований, многоступенчатая термическая обработка сплава $0,6\text{Mg}1\text{Si}0,05\text{Sc}0,15\text{Zr}$ вызывает лишь выделение частиц β'' (Mg_5Si_6), в то же время $(\text{AlSi})_3\text{Sc}$ не дают упрочнения, а отжиг с целью их выделения приводит даже к уменьшению свойств. Это может быть связано с тем, что скандия для их выделения недостаточно. В то же время скандий может косвенно способствовать выделению β'' (Mg_5Si_6), однако это предположение нуждается в дополнительной проверке. Использование деформационной обработки в целом благоприятствует выделению частиц β'' (Mg_5Si_6).

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, №21-19-00548, <https://rscf.ru/project/21-19-00548/>.

Библиографический список

1. Sizyakov V.M., Bazhin, V.Y., Vlasov, A.A. Status and Prospects for Growth of the Aluminum Industry. *Metallurgist* 2010, 54, 409–414.
2. Edwards G.A., Stiller K., Dunlop G.L., Couper M.J. The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta materialia* 1998, 46(11), 3893-3904.
3. Meyruey G., Massardier, V., Lefebvre, W., Perez, M. Over-ageing of an Al-Mg-Si alloy with silicon excess. *Materials Science and Engineering: A* 2018, 730, 92-105.
4. Захаров В.В. Комбинированное легирование алюминиевых сплавов скандием и цирконием. *Металловедение и термообработка* 2014 , 56(5) , 281-286.
5. Wang F., Qiu D, Liu Z.L., Taylor J.A., Easton M.A., Zhang M.X. The grain refinement mechanism of cast aluminium by zirconium. *Acta materialia* 2013, 61(15), 5636-5645.
6. Суханов А.В., Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р. Построение границ Al-твердого раствора при температурах 550 и 500° С в системе Al-Sc-Si // *Металлы*. – 2011. – №. 6. – С. 48-48.
7. Рохлин Л.Л. и др. Исследование фазовых равновесий при кристаллизации богатых алюминием сплавов тройной системы Al-Sc-Si // *Металлы*. – 2012. – №. 4. – С. 63-69.

УДК 595.76

БИОМАССА СЕМЕЙСТВ ЖЕСТКОКРЫЛЫХ ПРИРОДНОГО ПАРКА «ДОНСКОЙ» ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Близгарева С.А., Брехов О.Г.

*Волгоградский государственный социально-педагогический университет,
г. Волгоград, vetervgolove2002@mail.ru*

В настоящей работе приведены данные, необходимые для характеристики экологической ситуации энтомофауны Иловлинского района Волгоградской области и основанные на оценке биомассы семейств жесткорылых на различных биотопах, встречающихся на данной территории.

Ключевые слова: биомасса, биотоп, герпетобионты, хортобионты, кошение, ловушечный сбор, экология, энтомофауна.

Показатели биомассы — один из главных аспектов изучения мира Insecta. Значение биомассы позволяет оценить общую динамику и развитие всей биосферы, ее реакцию на происходящие на планете климатические процессы. Как пространственное распределение биомассы, так и ее распределение между различными видами насекомых может служить важным показателем при оценке экологических взаимодействий или пищевых цепей.

Несмотря на важность данного экологического параметра, статей, по-

священных изучению биомассы насекомых нашей области, недостаточно для полноценной оценки региона. Тем не менее, исследования уже проводились на территории природного парка «Нижнехоперский» Кумылженского района [3], поймы реки Калдаир Новониколаевского района [4], долины реки Большая Голубая Калачевского района [2], природного парка «Цимлянские пески» Чернышевского района [11], верховья реки Хопер [13]. В связи с этим сбор показателей биомассы неизученных районов Волгоградской области актуален и необходим для полноценной оценки энтомофауны и общей экологической ситуации в регионе.

Важность изучения биомассы осознается энтомологами повсеместно, поэтому статьи, затрагивающие этот вопрос, описываются не только в нашем регионе, но и во многих других – песчаные степи центральной части приволжской возвышенности [1], степные биотопы Забайкалья [14], поля Закарпатской области [9], Южный Ямал [9], Западно-Сибирская равнина [12].

Целью проведенного исследования стала оценка биомассы семейств отряда Coleoptera на территории особо охраняемой природной территории – парка «Донской» Иловлинского района Волгоградской области. Природный парк занимает наиболее возвышенную правобережную часть малой излучины Среднего Дона, пойму и песчаную равнину в устье Иловли. Парк уникален своими многочисленными родниками, самыми высокими в Европе меловыми горами, заливными лугами, пойменными и нагорными лесами и, конечно, неповторимой флорой и фауной.

Объекты исследования и методы

Исследования проводились на различных биотопах с различными экологическими условиями – луговых участках, в степи и степи на плакоре, в овраге между меловыми горами и в пойменном лесу. Для оценки биомассы исследовались две экологические группы насекомых – герпетобионты и хортобионты.

В процессе сбора жесткокрылых были применены такие методы, как ловушечный сбор и кошение. Ловушки были установлены на 9 участках, которые экспонировались 5 дней, в результате чего было отработано 815 ловушко-суток. Кошение проводилось на 24 луговых участках и 26 участках остепенённых лугов. Биотопы для установки ловушек и проведения кошений устанавливались с учетом охвата всех возможных вариаций мест обитания жесткокрылых.

Результаты и обсуждение

За время изучения герпетобионтных жесткокрылых всего отработано 815 ловушко-суток, в результате чего было поймано 757 экземпляров из 17 семейств, биомасса которых в сумме составила 92,409 г, а средний вес составил 11,339 г/на 100 ловушко-суток. Среди герпетобионтов преобладающими семействами по числу экземпляров стали чернотелки (51,1 % от общего числа экземпляров) и пластинчатоусые (14 % от общего числа экземпляров) и жужелицы (11,8 % от общего числа экземпляров), основную биомассу так же составили чернотелки (76,6 % от общей биомассы), карапузики заняли вто-

рое место по показателям биомассы с большим отрывом (7,9 % от общей биомассы), а биомасса пластинчатоусых заняла всего 3,2 %, что даже меньше биомассы усачей (5,7 %), хотя по количеству пластинчатоусых было собрано в 4 раза больше. Самыми малочисленными семействами среди герпетобионтов стали: рогачи, пыльцееды, зерновки, плеснееды – пойманы всего по одному экземпляру.

Для изучения хортобионтных жесткокрылых было проведено 50 кошений на лугах и остепенённых лугах, благодаря чему было собрано 932 экземпляра 23-ех различных семейств жесткокрылых. Общая биомасса составила 9,596 г. Основу комплекса хортобионтов составили долгоносики (53,43 % от общего числа экземпляров), божьи коровки (13,95 % от общего числа экземпляров), листоеды (8,05 % от общего числа экземпляров) и зерновки (6,87 % от общего числа экземпляров). По показателям биомассы среди хортобионтов преобладают почти те же семейства: долгоносики (54,75 % от общей биомассы), листоеды (14,05 % от общей биомассы), пластинчатоусые (10,5 % от общей биомассы), божьи коровки (6,73 % от общей биомассы). Меньше всего в результате кошения удалось собрать следующие семейства: блестянки, чернотелки, мягкотелки, пыльцееды, пестряки – всего по одному экземпляру.

Сбор насекомых производился на различных биотопах Донского парка (таблица 1). Ловушки были расставлены на луговых, степных участках, в степи на плакоре, в пойменном лесу и, конечно, в овраге между меловыми горами. Биомасса насекомых преобладает на территории оврага, также крупные сборы вышли на луговых и степных участках. Рассмотрим каждый участок отдельно:

Пойменный лес

На территории пойменного леса (участок 1 и 2) было поймано в общей сложности всего 4,079 г, составивших 4,4 % от общей биомассы, что не удивительно, ведь подобного рода участки с каменистой и сырой почвой не пользуются популярностью среди герпетобионтных жесткокрылых, в отличие от плавунцов, водолюбов и прочих водных семейств, жизнь которых напрямую связана с водоемами. На первом участке было поймано 18 пластинчатоусых, а на втором – всего 2. Также в значительных количествах встретились кожееды и чернотелки.

Луг

Биомасса пойманных на территории луга жесткокрылых в пределах четырех участков суммарно составила 32,89 г: 3 участок – 7,26 г (7,9 % от общей биомассы), 4 участок – 8,833 г (9,6 % от общей биомассы), 5 участок – 1,473 г (1,6 % от общей биомассы), 6 участок – 15,32 г (16,6 % от общей биомассы). Занимательно, что 6 участок занял третье место по показателям биомассы среди всех 9-ти участков, хотя численно (114 экземпляров) его превосходит 4 участок (158 экземпляров). Основной объём биомассы на обоих участках составляют чернотелки, но средняя масса одной чернотелки на 4 участке равна 0,035 г, а на 6 участке она значительно больше – целых

0,186 г. Причиной тому, скорее всего, стало попадание более молодых и, соответственно, мелких особей в ловушки на 4 участке.

Степь

Сбор на территории степи занял второе место по показателям биомассы среди 9-ти участков. Биомасса 7 участка равна 21,61 г, что составило 23,4 % от общей биомассы. 94 % биомассы данного участка принадлежит чернотелкам со средним весом 0,211 г.

Степь на плакоре

Ловушечный сбор в степи на плакоре не принес весомых результатов. Показатели биомассы 8 участка составили всего 1,82 г (2% от обеих биомассы). Собрано было только три семейства – чернотелки, жужелицы и долгоносики.

Овраг

Самый крупный сбор пришелся на 9 участок в овраге между меловыми горами. Биомасса собранных жесткокрылых составила 32,01 г (34,6 % от общей биомассы). Несмотря на то, что на данном участке было собрано 96 экземпляров чернотелок и 57 экземпляров пластинчатоусых, биомасса первых составила 93 %, а вторых только 1,4 %. Получается, что средний вес одной чернотелки, пойманной на территории оврага, составил 0,31 г, а средний вес пластинчатоусых – 0,008 г.

Таблица 1 – Показатели биомассы семейств по участкам

Семейства Coleoptera	Биомасса, г				
	Пойменный лес	Луг	Степь	Степь на плакоре	Овраг
Tenebrionidae	1,862	17,148	20,271	1,737	29,783
Scarabaeidae	0,656	1,846	0	0	0,463
Lucanidae	0,541	0	0	0	0
Alleculidae	0	0	0	0	0,07
Carabidae	0,784	5,208	0,328	0,021	0,94
Histeridae	0	1,347	0	0	0,001
Cerambycidae	0	3,771	0,872	0	0,661
Chrysomelidae	0	0,011	0	0	0,043
Curculionidae	0,06	1,069	0,051	0,062	0,049
Staphylinidae	0,001	0,035	0	0	0
Dermostidae	0,096	2,291	0,033	0	0
Coccinellidae	0	0,149	0,001	0	0
Elateridae	0,079	0,011	0	0	0
Bruchidae	0	0,001	0,048	0	0
Buprestidae	0	0,001	0	0	0
Malachidae	0	0,002	0	0	0
Endomychidae	0	0	0,006	0	0

Кошение проводилось на луговых территориях (1-24 участок) и остепенённых лугах (25-50 участок), отличающихся разнообразием форм луговой растительности, в составе которых принимают заметное участие степные растения из разнотравья и злаков. Основу комплекса хортобионтов составили долгоносики – 5,254 г (54,75 % от общей биомассы), листоеды – 1,348 г (14,05 % от общей биомассы), пластинчатоусые (10,5 % от общей биомассы) и божьи коровки – 0,646 г (6,73 % от общей биомассы). Хотя численно среди хортобионтов преобладают долгоносики (498 экземпляров), божьи коровки (130 экземпляров), листоеды (75 экземпляров) и зерновки (64 экземпляра), а пластинчатоусых всего 13 экземпляров. Оставшиеся 13,97 % от биомассы составили следующие семейства: точильщики, щелкуны, шипоноски, зерновки, семяеды, стафилиниды, жужелицы, узконадкрылки, златки, блестянки, чернотелки, нарывники, мягкотелки, усачи, пыльцееды, пестряки.

Как уже замечено выше, лидирующими по показателям биомассы и численности среди герпетобионтов оказались чернотелки. Это семейство распространено по всему миру. Существует несколько факторов в жизненном цикле данных жесткокрылых, позволивших им получить столь широкое распространение на территории Волгоградской области, в частности Донского парка. Во-первых, чернотелки предпочитают лишённые излишней влаги территории и наиболее широко представлены в фауне засушливых областей, особенно пустынь и полупустынь [7].

Во-вторых, жуки ведут скрытый образ жизни, забираются под различные прикрития – растительные остатки, мусор, поэтому на полях не образуют массовых скоплений.

В-третьих, самки чернотелок чрезвычайно плодовиты. Они откладывают 100 – 300 яиц у самой поверхности земли ежегодно, а живут жуки по несколько лет.

В-четвертых, чернотелки питаются разнообразной растительной и животной пищей. Они поедают корешки растений, выгрызают зародыши посеянных семян злаков. Ряд видов повреждает пищевые запасы человека и является вредителем. Часто чернотелки поселяются в домах, на складах зерна и муки, портят пищевые продукты. Лесные виды предпочитают главным образом гнилую древесину и грибы. Встречаются среди них и хищные насекомые.

Конечно, есть и факторы, влияющие на сокращение численности этих насекомых. Например, при избыточном увлажнении они погибают в большом количестве, что крайне маловероятно в условиях жаркого, сухого лета Волгоградской области. Чернотелки известны как промежуточные хозяева гельминтов, симбионты микроорганизмов, на них паразитируют двукрылые, селятся клещи.

Среди экологической пользы чернотелок стоит отметить, что они участвуют в гумификации почвы, круговороте минеральных и органических соединений, являются звеньями пастбищных и детритных трофических цепей.

Помимо чернотелок, широко распространены в парке и пластинчатоусые. Жизнь почти всех представителей пластинчатоусых биологически свя-

зана с почвой. Имаго этого семейства – прекрасные землекопы. Основной особенностью биологии семейства является копрофагия, то есть питание экскрементами животных [5].

Некоторые виды пластинчатоусых являются важнейшими природными санитарами, очищающими поверхность почв от разнообразных экскрементов. Утилизация жуками масс навоза способствует их перемещению в нижние слои почв, которые разрыхляются и удобряются [5].

Отрицательное значение также заметно. Личинки и жуки ряда видов пластинчатоусых являются вредителями лесных, плодовых и сельскохозяйственных культур. Например, некоторые виды майских хрущей являются одними из основных вредителей плодово-ягодных и лесных насаждений. В годы массового размножения эти жуки могут полностью объедать листья деревьев [10].

Многие крупные представители пластинчатоусых могут являться промежуточными хозяевами ряда видов гельминтов, в том числе патогенных для животных (свиней, рогатого скота, домашней птицы, оленей и разных хищников) и реже – человека [5].

Как среди герпетобионтов, так и хортобионтов, распространено семейство долгоносиков. Долгоносики питаются почти всеми видами растений. Большинство Долгоносиков является вредителями сельскохозяйственных культур. Личинки минируют листья, их развитие происходит в плодах, бутонах, цветках, черешках, молодых побегах и в ветках; прогрызают ходы под корой на различной глубине как в здоровых, так и в засохших или трухлявых деревьях [8].

Долгоносики тесно связаны с определёнными видами кормовых растений. Взрослые жуки чаще всего питаются зелёными частями растений, пыльцой, тканями цветков или развивающихся плодов, грызут древесину, поражённую грибами, и поедают мицелий грибов. Многие околоводные долгоносики питаются тканями водных растений даже под водой. Часто эти виды используются в качестве биологического средства борьбы с вредоносным водным растением – сальвинией вредной.

Долгоносики часто являются источником пищи для земноводных и птиц, хищных и паразитических членистоногих из различных таксонов.

Жужелицы обитают на весьма разнообразных ареалах. Есть виды, предпочитающие берега водоемов, которые невозможно встретить вдали от воды или в засушливой местности. А среди рода *Nebria* и вовсе встречаются представители, живущие в самих водоемах. В то же время нередко среди жужелиц и ксерофилы, встречающиеся на аридных ландшафтах, и геофилы, проводящие большую часть времени на поверхности почвы или вовсе в ней. Также среди жужелиц есть виды, специализированные под обитание в солончаках и пещерах. Большая группа жужелиц относится к фитофилам, жизнеобитание которых тесно связано с растительностью. Это вовсе не говорит об обязательном питании таких представителей растительной пищей. Среди фитофилов встречаются как обычные фитофаги, так и хищники, охотящиеся на растениях. Что и оправдывает нахождение жужелиц как среди герпето-

бионтов, так и среди хортобионтов. Крупные размеры этих жуков и особенности ротового аппарата свидетельствуют о преимущественно хищном образе жизни. Но, как уже сказано выше, среди них встречаются и фитофаги, и паразиты, и миксофаги. Специализированные хищники были успешно интродуцированы человеком для борьбы с вредителями. А вот среди миксофагов и фитофагов некоторые виды являются вредителями сельскохозяйственных культур.

Особенности данного семейства, связанные с обитанием и питанием, позволили ему относительно широко распространиться по территории парка «Донской».

Основу комплекса хортобионтов составили долгоносики, листоеды и божьи коровки.

Все листоеды являются в той или иной степени фитофагами, в основном узкоспециализированными, и их тесная связь с кормовыми растениями определила процессы формообразования, исторического развития и филогении, т.е. становления семейства как единого целого.

Характерной особенностью этих жуков является их связь с высшими и почти исключительно с покрытосеменными растениями. Листоеды не питаются низшими растениями. Преимущественно в пищу идут растения семейств сложноцветные и ивовые. Из травянистых растений, кроме сложноцветных, в качестве кормовых растений широко используются крестоцветные, гречишные, розоцветные, маревые.

Листоеды наносят значительный вред сельскому и лесному хозяйству. Они повреждают все части растения. Наиболее распространено повреждение листьев и молодых побегов, что приводит к уменьшению ассимилирующей поверхности растений. Часто встречаются повреждения корней личинками листоеда. Повреждения цветов довольно редки, но некоторые виды регулярно поедают пыльцу и лепестки цветов. Повреждения плодов не характерны для листоедов, за исключением единичных случаев.

Тем не менее, польза от листоеда тоже есть - некоторые виды используются человеком для уничтожения сорных растений.

В регионах с развитым сельским хозяйством представители семейства зерновок являются обычными, ведь жизненный цикл этих жуков тесно связан с зерновыми культурами, начиная от развития личинок в семенах культурных растений и заканчивая питанием всеми его частями. К тому же зерновки являются дневными насекомыми, теплолюбивыми. Поэтому на территории Волгоградской области с жарким климатом и большим количеством зерновых, масличных полей созданы все условия для развития данного семейства.

В противовес к вредоносным с точки зрения человека зерновкам на территории парка «Донской» 6,73 % от общей биомассы заняли божьи коровки, которые являются чрезвычайно прожорливыми хищниками. И имаго, и личинка божьей коровки в больших количествах уничтожает тлю, листоблошек, червецов, щитовок и клещей. Растительоядных видов среди этого

семейства практически нет. Опасность для божьих коровок представляют только ежи, некоторые хищные богомолы и *Dinocampus coccinellae*, паразитирующая в теле жуков, но представители семейства Braconidae не были встречены на территории парка.

Вывод

Среди герпетобионтов особенно выделяются по показателям биомассы крупные жуки семейства чернотелки. Для чернотелок на территории Волгоградской области существуют подходящие, засушливые условия обитания. Являясь плодовитым и неприхотливым в пище насекомым, они получили огромное распространение в регионе. Основу биомассы хортобионтов составило семейство долгоносиков, хотя и среди герпетобионтов они встречались нередко. Долгоносики, являясь фитофагами, получили большое распространение на территории парка. Значения биомассы прочих семейств связаны чаще всего с теплым климатом в регионе, полупустынным ареалом с преимущественно ксерофитными растениями, в основном злаковыми или же, как в случае божьих коровок, практически полным отсутствием естественных врагов.

Библиографический список

1. Агафонов, М. М. Энтомофауна песчаных степей центральной части Приволжской возвышенности / М. М. Агафонов // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2015. – Т. 24, № 4. – С. 72 – 94.
2. Брехов О. Г. оценка биомассы семейств жесткокрылых в разных районах волгоградской области / О.Г. Брехов // Природные системы и ресурсы журн. – 2019. – Т. 9, № 4. – С.5 – 11.
3. Брехов О.Г. биомасса семейств жесткокрылых массива «Шакин лес» / О.Г. Брехов // Изучение, сохранение и восстановление естественных ландшафтов: сборник статей VII всероссийской с международным участием научно-практической конференции (9 – 13 октября 2017 г., г. Волгоград). – М.: Планета, 2017. – С. 142 – 147.
4. Брехов, О. Г. Биомасса семейств жесткокрылых пойменной дубравы (Новониколаевский район) / О. Г. Брехов, Е. Д. Макаренко // СтРИЖ. – 2018. – № 6 (23). – С. 126 – 129.
5. Кабаков О. Н. Пластинчатоусые жуки подсемейства Scarabaeinae фауны России и сопредельных стран / О. Н. Кабаков // М., Товарищество научных изданий КМК. – 2006. – С. 374.
6. Коваль, А. Г. К изучению жужелиц (Coleoptera, Carabidae) – энтомофагов колорадского жука картофельных полей Закарпатья / А. Г. Коваль // Энтомологическое обозрение. – 1999. – Т. 78, № 3. – С. 527 – 536.
7. Крыжановский О. Л. Насекомые и клещи - вредители сельскохозяйственных культур. Том II. Жесткокрылые. / О. Л. Крыжановский // Издательство "Наука". – 1974. – С. 336.
8. Лер П. А. Определитель насекомых Дальнего Востока России. Т. III. Жесткокрылые, или жуки. Ч. 3 / под общ. ред. П. А. Лера // Владивосток:

Дальнаука. – 1996. – С. 249—251.

9. Ольшванг, В. Н. К оценке влияния метеорологических факторов на динамику численности и биомассы членистоногих Южного Ямала / В. Н. Ольшванг // Регуляция численности и плотности популяций животных Субарктики : сб. науч. тр. – Свердловск : Урал. науч. центр АН СССР, 1986. – С. 3 – 9.

10. Савковский П. П. Атлас вредителей плодовых и ягодных культур – 5-е издание, дополненное и переработанное. / П. П. Савковский // Киев: Урожай. – 1990. – С. 96.

11. Сапишева, Д. Р. Биомасса семейств жесткокрылых природного парка «Цимлянские пески» / Д. Р. Сапишева, Л. Г. Панченко // СтРИЖ. – 2019. – № 6 (29). – С. 17 – 20.

12. Сергеев, М. Г. Пространственное распределение биомассы беспозвоночных животных Западно-Сибирской равнины / М. Г. Сергеев, В. В. Молодцов // Сиб. экол. журн. – 2004. – Т. 11, № 5. – С. 665 – 670.

13. Силина, А. Е. Фауна и структура сообществ макрозообентоса верховья Хопра в условиях заповедного режима / А. Е. Силина // Науч. ведомости Белгор. гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. – 2017. – № 25 (274). – С. 59–69.

14. Численность, биомасса и сезонная динамика беспозвоночных животных чиевой степи Западного Забайкалья / Л. Ц. Хобракова [и др.] // Вестник Бурят. гос. с.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. – 2010. – № 2 (19). – С. 112–122.

УДК 669.713.017:538.9

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЬ МАРКИ С2, РАЗРУШЕННОГО ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

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

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: aserebrakova87@gmail.com*

На основании выполненных исследований ползучести Рb марки С2, без магнитного поля и в магнитном поле с индукцией 0,3Тл обнаружен эффект влияния магнитного поля на механические характеристики Рb марки С2. Установлено, что эффект влияния магнитного поля выражен увеличением скорости ползучести и снижением процента деформации образцов, относительно испытаний без магнитного поля. Морфология поверхности разрушения Рb показывает более однородный характер, при воздействии магнитного поля с индукцией 0,3Тл на разрушаемый образец.

Ключевые слова: магнитное поле, Рb марки С2, скорость ползучести, морфология поверхности, ямки отрыва.

Целью данной работы является исследование влияния магнитного поля, применяемого в процессе пластической деформации Рb (стационарная ползучесть), на механические и морфологические характеристики. Влияние

такого энергетического воздействия, как магнитное поле, способствует преобразованию структуры и свойств материала, позволяет упрочнить или повысить пластичность исследуемого материала, для дальнейшего использования в производстве [1]. Pb был выбран в качестве материала для исследований в связи с широким распространением в различных отраслях промышленности и в медицине [2]. Преимуществами этого металла являются его антикоррозионные свойства и стойкость к воздействию радиации. Однако, есть отрицательная особенность Pb - высокая предрасположенность к пластической деформации, что, несмотря на его преимущества, не позволяет расширить сферу его применения. Учитывая вышесказанное, достаточно интересной задачей становится исследование морфологии поверхности и механических характеристик Pb марки С2, разрушенного при воздействии магнитного поля, для возможной последующей разработки способа регулирования пластических свойств.

В качестве материала для исследований процесса ползучести использован свинец марки С2 (проволока диаметром 2 мм) 99,98 % чистоты, содержание примесей не превышало 0,12%. Процесс ползучести исследовали на установке, разработанной и изготовленной в СибГИУ, с электромагнитом и датчиком движения [3]. Значение индукции МП составило 0,3Тл. Морфологию поверхности разрушения образцов, подвергнутых пластической деформации в магнитном поле, анализировали посредством растрового электронного микроскопа TESCAN Vega SB. Обработка данных по результатам выполнена в программах Excel и Origin Pro 8.

В процессе механических испытаний получены данные по изменению длительности процесса ползучести $t_{\text{проц}}$ и проценту относительного остаточного удлинения образца δ .

Без воздействия магнитного поля длительность процесса ползучести свинца составила 5,69 ч, с применением магнитного поля с индукцией 0,3Тл в процессе ползучести длительность процесса практически не изменилась и составила 5,47ч. Процент относительного остаточного удлинения образца δ снизился. Без воздействия магнитного поля $\delta = 6,18 \%$, а с применением магнитного поля с индукцией 0,3 Тл $\delta = 4,6 \%$ что в 1,3 раз меньше. Влияние магнитного поля привело к снижению деформации образцов.

По полученным в процессе ползучести данным проанализировано изменение скорости ползучести Pb на линейной стадии.

В результате расчета, скорость ползучести свинца без применения магнитного поля составила $v=0,902$ мм/ч, а с применением магнитного поля с индукцией 0,3 Тл скорость ползучести увеличилась до $v=1,6$ мм/ч. Таким образом, под влиянием магнитного поля характер кривой ползучести изменился, что повлияло на увеличение скорости ползучести на 43,6 %.

Таким образом, по результатам механических испытаний, выявлено, что увеличилась скорость ползучести на линейной стадии, снизился процент относительного остаточного удлинения. Предположительно, процент де-

формации может быть снижен благодаря изменению скорости образования дефектов в структуре металла [4].

Рассмотрим результаты SEM-анализа поверхности разрушения Pb (рисунок 1).

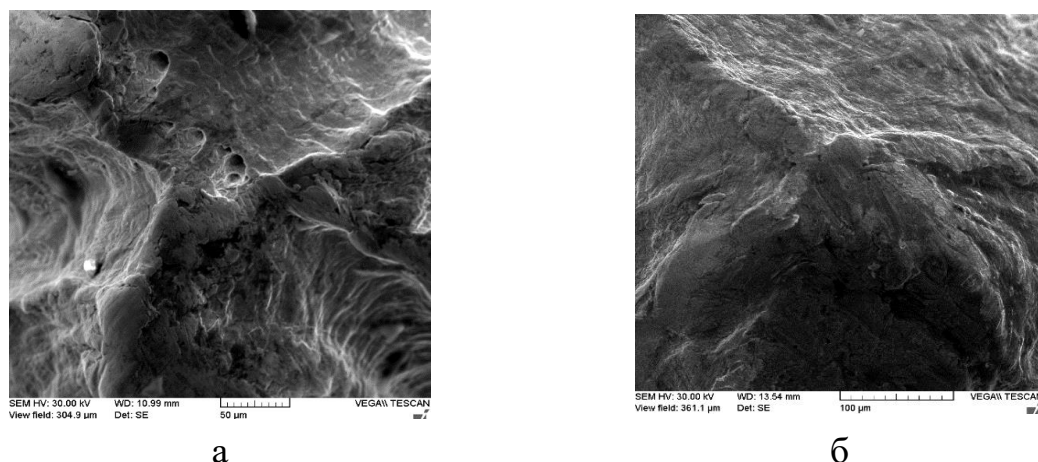


Рисунок 1 – SEM-изображения поверхности разрушения Pb, без применения магнитного поля (а), при воздействии магнитным полем 0,3Тл (б)

Характер разрушения: вязкий, неоднородный. Цвет поверхности серый, тусклый, без блеска. В центре излома обнаружены 3 ямки отрыва (микроуглубления) внутри излома, диаметром от 10 до 20 мкм. Образование подобных микроуглублений характерно при пластическом течении металла в процессе ползучести. Как правило, очагом зарождения микроуглублений являются частицы неметаллических включений или вторых фаз. На рисунке 1а видны вязкие усталостные бороздки по плоскостям излома, в виде повторяющихся выступов и впадин, которые не пересекаются между собой. Вязкие бороздки образованы путем чередования сдвигового и отрывного локального разрушения.

С применением магнитного поля 0,3 Тл характер излома не изменился, излом вязкий (рис.1б). В центре поверхности излома показан гребень, образовавшийся в результате пластической деформации и разрушения перемычек между другими элементами излома. Высота гребня около 10мкм, ширина около 25 мкм. Обнаружены изменения морфологии, поверхность разрушения стала более однородной. Нет ямок отрыва, ярко выраженных бороздок, что демонстрирует влияние магнитного воздействия на морфологию Pb марки С2 в процессе стационарной ползучести.

Благодарности: Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Библиографический список

1. Shlyarov, V.V. Evolution of the Fracture Surface of Commercially Pure VT1-0 Titanium Subjected to Multicycle Fatigue in a Constant Magnetic Field / V. V. Shlyarov, K. V. Aksenova, D. V. Zaguliaev, and A. A. Serebryakova // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.

2023. - Vol. 17(1). - pp. 144-149.

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

3. Коновалов С.В. [и др.] Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. №8. – С. 64–66.

4. William Dr., Harrison J. Creep of Non-Ferrous Metals // Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. 2022. - Vol. 1. - pp. 494–504.

УДК 538.911

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА СТРОЕНИЕ ОЦК-КРИСТАЛЛА ЖЕЛЕЗА

Гостевская А.Н., Маркидонов А.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: lokon1296@mail.ru*

В данной работе приведены результаты исследования влияния высокоэнергетического воздействия на строение структуры ОЦК кристалла. Было установлено, что при более высоких значениях

Ключевые слова: ОЦК-кристалл, молекулярно-динамическое моделирование, лазерная абляция, высокоинтенсивное воздействие.

Введение

Короткоимпульсная лазерная абляция металлических мишеней лежит в основе многих практических приложений, начиная от высокоточной резки и сверления, заканчивая наноструктурированием поверхности и генерацией наночастиц с узким распределением по размерам и хорошо-управляемый состав.

Физика режимов абляции, свойственных лазерному облучению металлов, моделируется с помощью метода молекулярной динамики [1, 2]. Лазерная абляция, или облучение ультракороткими лазерными импульсами, имеет практический интерес, затрагивающий как экспериментальные, так и теоретические исследования [3- 5]. На данный момент существуют теоретические методы, которые основываются на построении тепловых моделей [6], разборе баланса энергии испускания лазера [7], что позволяет оценить воздействие лазерной абляции на поверхностное строение материала. В ходе литературного анализа было обнаружено, что метод молекулярно-динамического моделирования позволяет совместить теоретические прогнозы в области физики лазерной абляции и сопоставить их с экспериментально полученными данными.

Методика исследования

В рамках работы проводилось исследование изменения структуры, которое наблюдается в ОЦК-кристалле при влиянии высоких температур на по-

строении моделей методом молекулярной динамики. В ходе проведения исследования была построена расчетная ячейка в виде параллелепипеда прямоугольной формы со сторонами $15a_0 \times 100a_0 \times 10a_0$, где a_0 – это равновесный параметр решетки. В работе для направлений по X и Z применяются периодические граничные условия, для оси Y свободные. Расчетная ячейка подразделялась на слои по оси Y (10 слоев) с определенной температурой, которая уменьшалась при углублении в глубь моделируемого кристалла. Применение модели теплопроводности для представления распространения тепла возможно в период достижения теплового равновесия между электронами и фононами. При применении модели полубесконечного твердого тела возможно получение решения тепловой задачи за счет интегральных преобразований. Определение температуры по глубине металла можно обусловить как функцию координат (при $t < \tau$) при постоянных физических параметрах, которые рассчитываются по формуле:

$$T_c(y, t) = \frac{2Aq}{\lambda} \sqrt{at} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{at}} \right), \quad (1)$$

где A – поглотительная способность;

q – плотность энергии;

λ – теплопроводность;

a – температуропроводность;

τ – длительность воздействия.

Функция $\text{ierfc}(x)$, входящая в уравнение (1), выражается через интеграл от функции интеграла вероятности:

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} \text{ierfc}(x) dx. \quad (2)$$

После завершения влияния лазером ($t > \tau$) идет стадия охлаждения, когда распределение температуры высчитывается как:

$$T_c(y, t) = \frac{2Aq}{\lambda} \left[\sqrt{at} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{at}} \right) - \sqrt{a(t-\tau)} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right) \right]. \quad (3)$$

Температура определялась по следующим параметрам: $A = 0.68$; $q = 3.0$; $3.5; 6.0 \text{ МВт/см}^2$; $\lambda = 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $a = 2.621 \cdot 10^5 \text{ М}^2/\text{с}$; $\tau = 10 \cdot 10^{-12} \text{ с}$.

Результаты исследования

Время нагрева ячейки кристаллической решетки составляет 10 пс, после чего температура начинает падать. На рисунке 1 показано изменение $T_{\text{ср}}$ ячейки кристаллической решетки во время моделирования.

При достижении расчетно ячейкой температуры, превышающей температуру плавления ОЦК-кристалла, происходит фазовый переход, который способствует образованию границы твердой и жидкой фазами, понижая температуру в сторону более низкой.

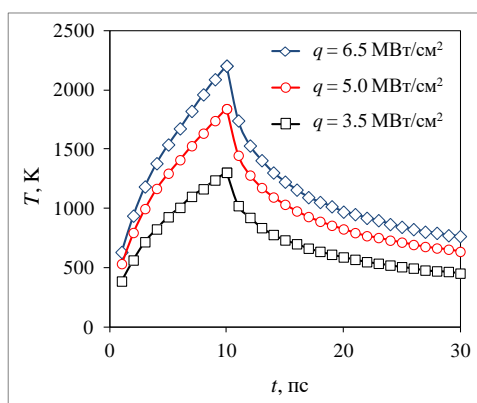


Рисунок 1 – Среднее изменение температуры ячейки, рассчитанное при моделировании при различных плотностях энергии лазерного излучения

Проводя повышение температуры в расчетной ячейке дальше, приводит к отслоению атомов от поверхностного слоя ОЦК-кристалла и образуя на их месте облако испаренных частиц. Стадия охлаждения включает локализацию разбавленных областей, образовавшихся на предыдущей стадии нагрева (рисунок 2, а), их слияние и образование сферических пор (см. рисунок 2, б, в, г).

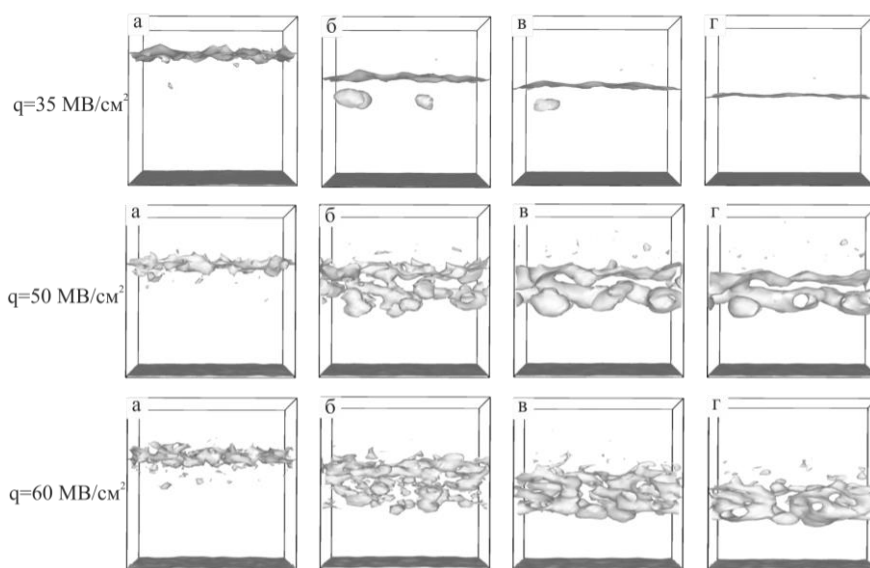


Рисунок 2 – Визуализированная моделируемая плотность энергии лазерного излучения моделирования 11 (а), 15 (б), 19 (в) и 22 (г) пс см после свободной поверхности, образованной расчетными ячейками

Более подробно образование пор на наномасштабном уровне под влиянием лазерной абляции на поверхность образцов можно увидеть в работе [6]. Из представленных результатов на рисунке 2 видно, что поры в строении металла наблюдаются при плотности энергии $q=3.5 \text{ МВт/см}^2$ и больше. При моделировании различной плотности поглощенной энергии излучения, достигаемого варьированием параметра q в формулах (1) и (3), наблюдаются различные структурные изменения в приповерхностных слоях расчетной

ячейки. Как правило, для количественной оценки подобного рода изменений используют коэффициент пористости, выражаемый через плотности аморфной и кристаллической структуры.

Заключение

Высокоэнергетическое воздействие на поверхностные слои металлов на сегодняшний день изучаются и исследуются как в практической области, так и при помощи построения моделей. Нами было проведено исследование методом молекулярно-динамического моделирования процессов изменения строения поверхностного слоя ОЦК-кристалла под воздействием лазерной абляции. В построенных моделях было установлено, что поры образуются в структуре при всех значениях плотности энергии $q \geq 3,5$ МВт/см², и остаются в конце построения модели.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021- 0013.

Библиографический список

1. Гостевская А.Н. Молекулярно-динамическое моделирование структурных изменений ОЦК-кристаллов при кратковременном высокоэнергетическом лазерном воздействии / А. Н. Гостевская // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 6-10.

2. Гостевская А.Н., Маркидонов А.В. Выявление преобразования структурных изменений в ОЦК кристалле при лазерном воздействии методом молекулярной динамики // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4(42). С. 11-18. DOI 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-11-18.

3. Markidonov A.V., Starostenkov M.D., Gostevskaya A.N., Lubyany D.A., Zakharov P.V. Modeling by a Molecular Dynamics Method of Structural Changes of a BCC Metal Surface Layer with Short-Term High-Energy External Action // Metal science and heat treatment. 2022. Vol. 64, No. 5-6. P. 258-263. DOI 10.1007/s11041-022-00796-9.

4. Гостевская А.Н., Маркидонов А.В. Изменение внутреннего строения металлов при воздействии лазерных импульсов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении. - Пермь: Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2021. - С. 60 – 63.

5. Kuo J.K., Huang P.H., Chien S.-K., Huang K.Y., Chen K.T. Molecular Dynamics Simulations of Crater Formation Induced by Laser Ablation on the Surface of α -Fe Substrate – Matec Web of Conferences, 2018. V.167. 03011.

6. Гордеев Г.А. Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : дис. на соискание ученой степени док. физ.-мат. наук / Г. А.

Гордеев ; науч. конс. к Родионову В. И. ; Удмуртского государственного университета – Ижевск : Изд. центр УдГУ. 2020. с. 189

7. Willis D. A., Grosu V. The effect of melting-induced volumetric expansion on initiation of laser-induced forward transfer // Applied Surface Science. 2007. Vol. 253. №10. Pp. 4759 – 4763.

УДК 538.9

ХАРАКТЕР БЛИЖНЕГО УПОРЯДОЧЕНИЯ ШУНГИТОВОГО УГЛЕРОДА

Киселев В.В., Логинова С.В.

*Петрозаводский государственный университет,
г. Петрозаводск, e-mail: xatab3451@gmail.com*

В данной работе приведены результаты построения модели ближнего порядка шунгитового углерода. Установлено, что стопки искаженных и разориентированных графеновых листов толщиной 10Å и размерами $29\text{Å} \times 39\text{Å}$ определяют области ближнего упорядочения. Достоверность модели подтверждена данными, полученными методами рентгенографии.

Ключевые слова: шунгит, ближний порядок, методы рентгенографии.

В работе предложена модель описания характера ближнего упорядочения шунгитового углерода, после его кислотной интеркаляции и последующей термической обработки. Терморасширенные шунгиты имеют больший объем пор по сравнению с исходным, а значит обладают большей сорбционной способностью. В целом, шунгит обладает избирательной сорбцией.

По данным рентгеновской дифракции исследуемый образец имеет аморфно-кристаллическую структуру. На рисунке 1 представлена рентгенограмма исследуемого образца, типичная для аморфно-кристаллических материалов. Кривая распределения интенсивности рассеяния $I(s)$, представленная на рис. 1, приведена в электронных единицах, s – длина дифракционного вектора ($s = \frac{4\pi \cdot \sin\theta}{\lambda}$).

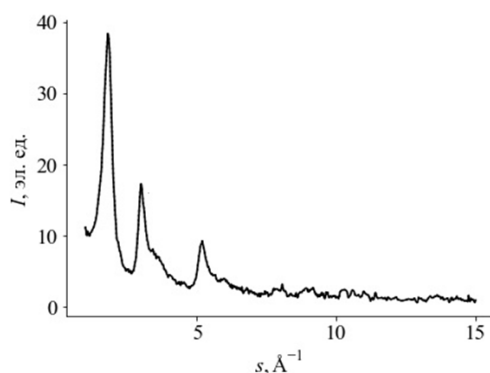


Рисунок 1 - Кривая распределения интенсивности рассеяния исследуемого образца шунгитового углерода

Как показано в работах [1-3], для анализа достоверности моделей структуры природных и синтезированных углеродных материалов удобно использовать сравнение кривых s -взвешенных интерференционных функций $H(s)$ исследуемого образца и модельного кластера, так как кривая $H(s)$ является более контрастной по сравнению с кривой распределения интенсивности рассеяния. Кривые s -взвешенных интерференционных функций можно рассчитать следующим образом:

$$H(s) = si(s) \exp(-a^2 s^2) g^{-2}(s), \quad (1)$$

где $i(s)$ – интерференционная функция рассеяния;

$\exp(-a^2 s^2)$ – множитель затухания;

$g^{-2}(s)$ – фактор обострения для повышения контрастности интерференционной картины при больших значениях s .

Сравнение кривых $H(s)$ проводят визуально и путем расчета R -фактора недостоверности. Значение фактора недостоверности ниже 15 % позволяет говорить о том, что подобранная модель корректно описывает структуру объекта исследования.

На рисунке 2 показана кривая s -взвешенных интерференционных функций образца терморасширенного шунгита.

В работе [4-5] показано, что структура шунгитового углерода может быть описана как глобулярная, которую можно рассматривать состоящей из некоторого числа турбостратных стопок с размерами $26\text{Å} \times 27\text{Å}$. Размер глобул порядка десятки нанометров.

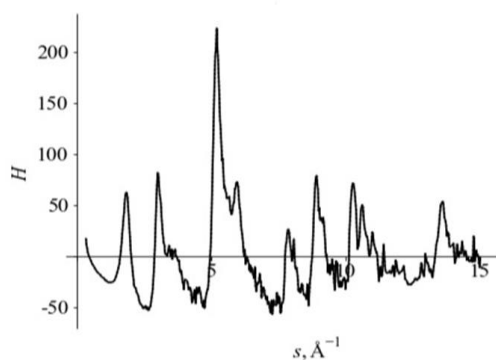


Рисунок 2 - Кривая $H(s)$ исследуемого образца

В данной работе представлены результаты первого этапа построения глобулярной модели, который заключается в поиске наиболее вероятной модели ближнего упорядочения исследуемого образца. Поиск осуществляли путем построения модельного кластера, представляющего собой набор из искаженных, разориентированных относительно друг друга графеновых листов. Также варьировали расстояние между листами в стопке и число вакантных атомных позиций. Далее проводили геометрическую оптимизацию сформированных кластеров.

В результате была получена модель, корректно описывающая структуру областей ближнего упорядочения модифицированного шунгитового угле-

рода. Модель представляет собой кластер из 985 атомов, в котором порядка 3 % атомных позиций углерода оказывается вакантной. Кластер образован четырьмя слоями с размерами $29\text{Å} \times 39\text{Å}$. Слои разориентированы относительно друг друга следующим образом. Углы разориентировки первого и второго, а также последующих слоев составили 10° , 5° , 7° . Расстояние между первым и вторым слоем составило 3.37Å , между вторым и третьим – 3.45Å , а между третьим и четвертым – 3.52Å .

На рисунке 3 представлено сравнение кривых $H(s)$ для модифицированного шунгита и итогового кластера. Значение R-фактора составило 10.6 %.

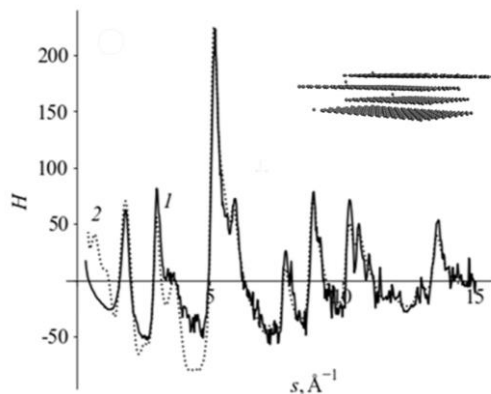


Рисунок 3 - Функции $H(s)$ для модифицированного шунгита (—) и итогового кластера (.....)

Таким образом, получена модель, корректно описывающая области ближнего упорядочения модифицированного шунгитового углерода. Достоверность модели подтверждена данными рентгеновской дифракции. Области ближнего упорядочения термически модифицированного шунгитового углерода образуют турбостратные стопки искаженных и разориентированных графеновых листов размером $29\text{Å} \times 39\text{Å}$. Толщина стопок 10Å .

Библиографический список

1. Логинов Д.В., Алешина Л.А., Фофанов А.Д. // Уч. зап. Петрозавод. гос. ун-та. 2010. № 8. С. 99-104.
2. Алешина Л.А., Логинов Д.В., Фофанов А.Д. и др. // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. Вып. 8. С. 16.
3. Алешина Л.А., Мелех Д.В., Логинов Д.В., Некоторые перспективные материалы Северо-Запада Российской Федерации на основе целлюлозы, углерода и силикатов // учебное пособие / издательство Петрозавод. гос. ун-та. 2012. С. 115-125.
4. Шека Е.Ф., Рожкова Н.Н. Шунгит – природный источник наноразмерного восстановленного оксида графена // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 2. С. 89–104.
5. Е.Ф. Шека, Е.А. Голубев О техническом графене – восстановленном оксиде графена – и его природном аналоге - шунгите // Журнал технической физики, 2016. Т 86. Вып. 7. С. 75-80.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ
ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ
FeCoCrNiMn И FeCoCrNiAl**

**Коновалов С.В., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А.,
Черепанова Г.И., Громов В.Е., Панченко И.А.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru*

В статье были сформированы покрытия на подложке из сплава 5083 высокоэнтропийными сплавами Fe-Co-Cr-Ni-Mn и Fe-Co-Cr-Ni-Al неэквивалентных составов. Способами современного физического материаловедения сделан анализ структурно-фазовых состояний элементного состава, дефектной субструктуры и свойств зоны контакта покрытий с подложкой.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, Fe-Co-Cr-Ni-Mn, Fe-Co-Cr-Ni-Al, подложка, зоны контакта, наночастицы, холодный перенос.

Введение

Одной из задач физического материаловедения считается разработка новых материалов и технологий их получения с комплексом важных физико-математических и эксплуатационных характеристик [1]. В самом конце XX века появились первые работы по созданию и комплексному исследованию новых, так называемых высокоэнтропийных полиметаллических сплавов (ВЭС), включающих до 5-6 основных элементов. Первыми из таких материалов были выбраны сплавы систем AlCoCrFeNi, MnCoCrFeNi и др. [2].

Целью данной работы является анализ структуры и свойств, элементного и фазового составов, дефектной субструктуры зоны контакта с подложкой (сплав 5083) покрытий (высокоэнтропийные сплавы Fe-Co-Cr-Ni-Mn и Fe-Co-Cr-Ni-Al), сформированных на подложке методом холодного переноса металла.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использованы образцы системы «покрытие/подложка». Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквивалентного элементного состава Mn-Fe-Cr-Co-Ni, который был сформирован на подложке методом холодного переноса металла [3]. В таблице указан химический состав сплава 5083, который являлся подложкой на основе алюминия. Исследование элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры зоны контакта покрытия и подложки осуществляли методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100) электронной микроскопии (ПЭМ) [4].

Таблица 1 – Химический состав сплава 5083 вес %

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Другие элементы	Al
<0,25	<0,10	<0,40	4,0÷4,9	<1,0	<0,10	<0,15	<0,25	<0,15	Остальное

Результаты исследования

Фазовый состав и состояние дефектной субструктуры зоны контакта покрытия и подложки анализировали методами ПЭМ. На рисунке 1 приведены характерные электронно-микроскопические изображения структуры зоны контакта покрытия и подложки в области, прилегающей к подложке, свидетельствующие об образовании включений пластинчатой формы.

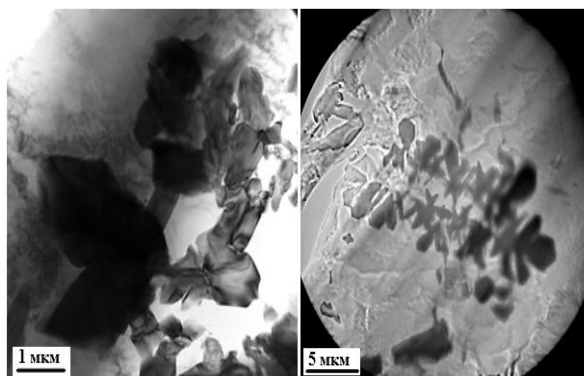


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические изображения включений структуры зоны контакта покрытия и подложки

На рисунке 2 представлено изображение STEM, где изображено образование пластинчатой формы, формирующегося в зоне контакта. Микрорентгеноспектральный анализ данного участка фольги выявил следующий набор химических элементов (ат. %): 3,2Mg-93,2Al-0,4Cr-0,6Mn-1,3Fe-1,1Co-0,2Ni. Анализ данного участка фольги с выбранных площадей позволил количественно оценить элементный состав включения (таблица 2). Отчетливо видно, что включение обогащено атомами, формирующими ВЭС (спектры 1, 2, 5). Включение расположено в сплаве 5083 (спектры 3 и 4). Элементы ВЭС в сплаве 5083 не обнаруживаются [5].

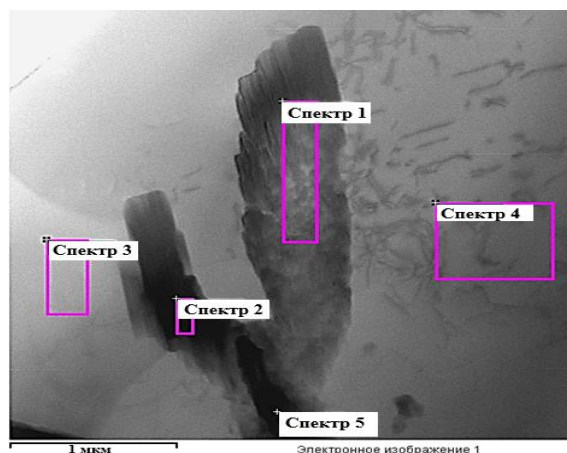


Рисунок 2 – STEM изображение образования пластинчатой формы

Таблица 2 – Элементный состав участков зоны контакта, указанных на рисунке 2

Спектр	Mg,ат.%	Al,ат.%	Cr,ат.%	Mn,ат.%	Fe,ат.%	Co,ат.%	Ni,ат.%
Спектр 1	4,48	88,56	0,43	1,26	2,92	1,57	0,77
Спектр 2	0,08	81,25	1,31	3,62	8,84	3,51	1,40
Спектр 3	5,93	94,07					
Спектр 4	3,10	96,90					
Спектр 5	0,95	81,24	1,26	3,59	8,27	3,47	1,22

В заключение можно сказать, что методом холодного переноса металла были сформированы системы «покрытия (ВЭС Fe-Co-Cr-Ni-Mn и Fe-Co-Cr-Ni-Al)/(сплав 5083) подложка». Выявлено существенное увеличение микротвердости материала зоны контакта покрытия с подложкой. Основываясь на результатах исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры, высказаны суждения о физических механизмах повышения твердости материала в зоне контакта покрытия ВЭС Fe-Co-Cr-Ni-Mn с подложкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 20-19-00452, № 19-19-00183, <https://rscf.ru/project/19-19-00183/>.

Библиографический список

1. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 8. Р. 807– 841.
2. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy alloys / Springer. Advanced structured materials. 2021. Vol. 107. 110 p.
3. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Изв. вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258.
4. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel, 2016. 196 p.
5. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Ефимов М.О., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Гостевская А.Н. Структура и свойства покрытий из высокоэнтропийных сплавов FeCoCrNiMn и FeCoNiCrAl // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2022. № 2. С. 88-97.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА

Кузнецова В.А., Панова В.С., Коваленко В.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: vikt.kovalenko@yandex.ru*

В статье рассматривается применение метода наименьших квадратов (МНК) для математической обработки экспериментальных данных при исследовании уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Приведены теоретические положения фотоэффекта и метода наименьших квадратов. Показано применение МНК для аппроксимации экспериментально наблюдаемой зависимости.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, фотоэффект, уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

Фотоэффект играет важную роль в некоторых областях науки и техники. На основе фотоэффекта работают солнечные батареи, рентгеновские аппараты, фотоэлементы (электронные компоненты, используемые для обнаружения света), фотокамеры и многие другие приборы [1].

Фотоэффект – это явление, при котором фотон света выбивает электрон вещества, являющееся результатом трех последовательных процессов:

- поглощение фотона и появление электрона с высокой (по сравнению со средней) энергией;
- движение электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеиваться;
- выход электрона в другую среду через поверхность раздела.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта имеет большое значение для понимания природы излучения и взаимодействия света с веществом, оно описывает связь между энергией фотона и энергией электрона, вырываемого из поверхности вещества [1]. Оно имеет вид:

$$h\nu = \hbar\omega = A + E_{k,max}, \quad (1)$$

где A – работа выхода электрона из вещества,

ν, ω – линейная и циклическая (круговая) частота соответственно,

$$\omega = 2\pi\nu, \quad (2)$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка,

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $0,6582 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – приведенная

постоянная Планка,

$E_{k,max}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Из закона сохранения энергии следует, что

$$E_{k,max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = eU_3, \quad (3)$$

где $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона,
 U_3 – запирающее (задерживающее) напряжение [1].

Из уравнений (1) и (3) можно получить:

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e}, \quad (4)$$

$$E_{k,max} = \hbar\omega - A. \quad (5)$$

Полученные выражения (4) и (5) аналогичны линейной зависимости типа $y = ax - b$.

Цель настоящего исследования заключается в проверке зависимостей запирающей разности потенциалов от частоты света $|U_3|(\nu)$ и максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света $E_{k,max}(\omega)$. Исследование закономерностей фотоэффекта проводят на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

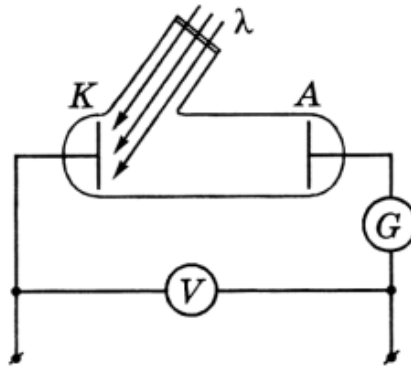
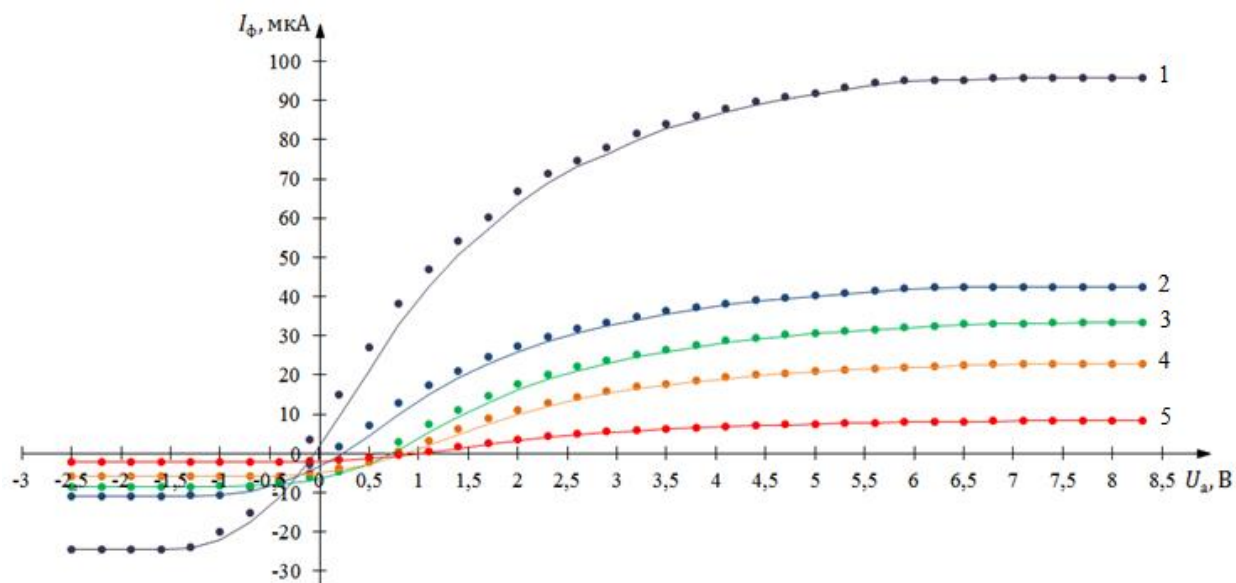


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для наблюдения и исследования закономерностей фотоэффекта

В процессе эксперимента проведены измерения значений напряжения U_a на аноде фотоэлемента с шагом 0,3 В и значения фототока I_Φ для светодиодов пяти цветов. Измерения проводились до тех пор, пока значения фототока не стали выходить на постоянное значение.

По результатам эксперимента построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлемента для разных длин волн с учетом плавного перехода кривых, подтверждающего различную скорость электронов (рисунок 2).

В работе для каждой длины волны λ вычислена частота света $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), при которой наблюдается фотоэффект. Из графика (рисунок 2) для каждой из ветвей найдено напряжение U_3 , соответствующее полной задержке электронов. С помощью выражений (2) и (3) были рассчитаны значения максимальной кинетической энергии фотоэлектронов $E_{k,max}$ и циклической частоты ω соответственно. Результаты измерений представлены в таблице 1.



1 – фиолетовый светодиод, 2 – синий, 3 – зеленый, 4 – оранжевый, 5 – красный

Рисунок 2 – ВАХ фотоэлемента для разных длин волн

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Окраска линии	λ , нм	ν , ТГц	U_z , В	$E_{k,max}$, аДж	ω , ТГц
Фиолетовая	410	732	1,3	0,208	4590,68
Синяя	450	667	1,0	0,160	4188,76
Зеленая	540	556	0,5	0,080	3491,68
Оранжевая	580	517	0,3	0,048	3246,76
Красная	650	462	0,2	0,032	2901,36

По результатам эксперимента (таблица 1) были построены эмпирические линии регрессии, отражающие экспериментальные зависимости задерживающей разности потенциалов от частоты света (рисунок 3) и максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от циклической частоты света (рисунок 4).

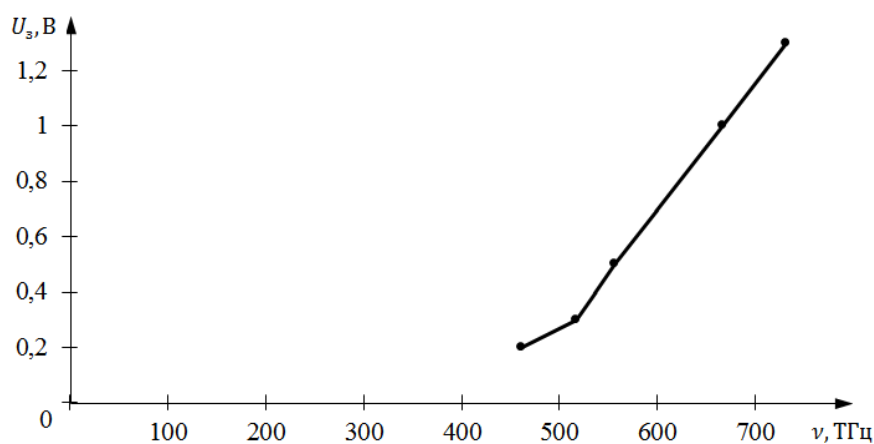


Рисунок 3 – Эмпирическая зависимость задерживающей разности потенциалов от частоты света

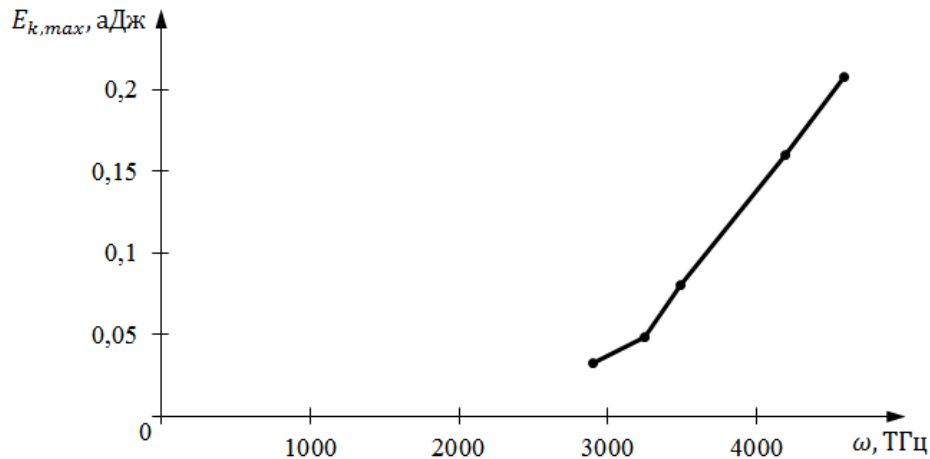


Рисунок 4 – Эмпирическая зависимость максимальной кинетической энергии от циклической частоты света

На графиках (рисунки 3 и 4) наблюдается отклонение хода кривых от известных теоретических зависимостей, так как экспериментальные точки не ложатся на прямую, следовательно, эмпирические линии регрессии не удовлетворяют уравнениям (4) и (5), отражающим линейную зависимость между физическими величинами. Для установления вида теоретического уравнения регрессии было выполнено аналитическое решение, основанное на методе наименьших квадратов (МНК).

Метод наименьших квадратов – это математический метод нахождения теоретической зависимости, соответствующей эмпирическим закономерностям [2]. Идея метода состоит в том, чтобы найти линейную функцию, которая наиболее точно проходит через заданный набор точек.

Решение системы уравнений [2]:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n (x_i^2) + b \sum_{i=1}^n (x_i) = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i), \\ a \sum_{i=1}^n (x_i) + n \cdot b = \sum_{i=1}^n (y_i). \end{cases} \quad (6)$$

позволяет рассчитать коэффициенты a и b по формулам:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n (x_i) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i)}{n \sum_{i=1}^n (x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^2) - \sum_{i=1}^n (x_i) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i)}{n \sum_{i=1}^n (x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (8)$$

В первом случае за x принимаем частоту света ν , за y принимаем задерживающее напряжение U_3 . Во втором случае x – циклическая частота ω , y – максимальная кинетическая энергия $E_{k,max}$. Количество измерений n равно 5.

Таким образом, были получены значения коэффициентов a и b теоретических уравнений регрессии (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчетов и теоретические уравнения регрессии

	$ U_3 (\nu)$	$E_{k,max}(\omega)$
a	0,0042	0,0001
b	-1,8314	-0,2940
Теоретическое уравнение регрессии	$ U_3 = 0,0042 \cdot \nu - 1,8314$	$E_{k,max} = 0,0001 \cdot \omega - 0,2940$

На рисунках 5 и 6 представлены теоретические линии регрессии, удовлетворяющие экспериментальным данным зависимости задерживающей разности потенциалов от частоты света $|U_3|(\nu)$ и максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от циклической частоты света $E_{k,max}(\omega)$, соответственно.

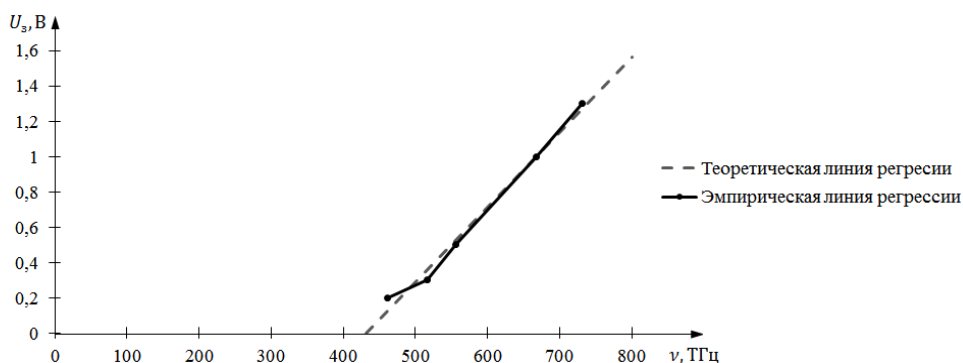


Рисунок 5 – Зависимость задерживающей разности потенциалов от частоты света

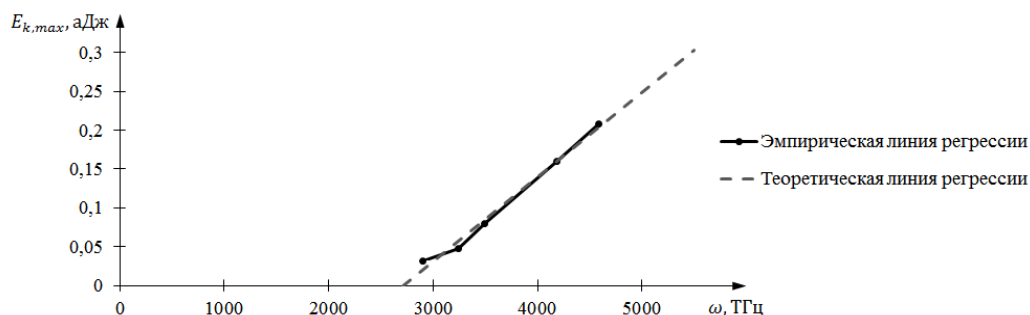


Рисунок 6 – Зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от циклической частоты света

Для оценки «тесноты связи» эмпирической и теоретической линий регрессии был рассчитан коэффициент парной корреляции по формуле (9):

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (9)$$

где $\sigma_x = \sqrt{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}$ – среднее квадратичное случайной величины x ,

$\sigma_y = \sqrt{\overline{y^2} - (\bar{y})^2}$ – среднее квадратичное случайной величины y .

Результаты расчета коэффициента парной корреляции представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Коэффициент парной корреляции для зависимости $|U_s|(\nu)$

	x	y	x·y	x ²	y ²
	732	1,3	951,6	535824	1,69
	667	1,0	667,0	444889	1,00
	556	0,5	278,0	309136	0,25
	517	0,3	155,1	267289	0,09
	462	0,2	92,4	213444	0,04
Сумма	2934	3,3	2144,1	1770582	3,07
Среднее	586,8	0,66	428,82	354116,4	0,614

Таблица 4 – Коэффициент парной корреляции для зависимости $E_{k,max}(\omega)$

	x	y	x·y	x ²	y ²
	4590,68	0,208	954,8614	21074342,86	0,043264
	4188,76	0,160	670,2016	17545710,34	0,025600
	3491,68	0,080	279,3344	12191829,22	0,006400
	3246,76	0,048	155,8445	10541450,50	0,002304
	2901,36	0,032	92,84352	8417889,85	0,001024
Сумма	18419,24	0,528	2153,085	69771222,77	0,078592
Среднее	3683,848	0,1056	430,6171	13954244,55	0,015718

Таким образом, в работе с применением методов экспериментальной физики и регрессионного анализа проведено исследование уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Экспериментально подтверждены зависимости задерживающей разности потенциалов от частоты света $|U_s|(\nu)$ и максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света $E_{k,max}(\omega)$. Методом наименьших квадратов получены теоретические уравнения регрессии, подтверждающие линейную зависимость в уравнении Эйнштейна (коэффициент парной корреляции равен 0,99).

Библиографический список

1. Леденев А.Н. Физика: учебное пособие для вузов. В 5 кн. Книга 5. Основы квантовой физики / А.Н. Леденев. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 248 с.
2. Коваленко В.В. Основы метрологии и обработки результатов измерений: учебное пособие / Сиб. гос. индустр. ун-т ; сост. В.В. Коваленко. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2016. – 96 с.

УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СПЛАВА АК5М2 ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНКИ Тi

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

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: shlyarov@mail.ru*

В работе выполнены усталостные испытания образцов силумина марки АК5М2 с предварительно напыленной на рабочую поверхность пленкой титана различной толщины. Показано, что с увеличением толщины пленки титана усталостная долговечность сплава АК5М2 возрастает.

Ключевые слова: пленка Ti, усталость, литейный сплав Al-Si, АК5М2, вакуумно-дуговое напыление.

Алюминиевые сплавы широко применяются в различных условиях эксплуатации в автомобильной промышленности, а литые сплавы Al-Si привлекательны для деталей, работающих в тяжелых условиях при тяжелых условиях нагрузки, таких как головки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, благодаря их высокой удельной прочности, легкий вес и хорошая способность к забросу [1, 2]. Литейные сплавы Al-Si состоят из множества микроструктур размером от нескольких микрон до сотен микрон. Эти микроструктуры влияют на механические свойства сплавов, что приводит к разбросу механических свойств и вызывает проблемы в прогнозировании механических характеристик.

Литейные сплавы Al-Si в основном включают три типа микроструктуры, а именно матрицу α -Al, твердые частицы и дефекты [3]. Большинство литых сплавов Al-Si, извлеченных из компонентов, неизбежно содержат поровые дефекты, в основном вызванные объемным сужением, недостаточной подвижностью жидкого металла и захватом газа в процессе литья [4], а усадочные поры обычно имеют более сложную форму, чем газовые поры [5]. Пористые дефекты оказывают большое влияние на усталостное поведение, особенно на поведение зарождения трещин и поведение малых усталостных трещин. Многочисленные исследования [6, 7] сосредоточились на влиянии дефектов на усталостное поведение. Как правило, усталостные трещины зарождаются из пор на поверхности или под поверхностью сплавов из-за концентрации напряжений и слабого ограничения циклического скольжения на поверхности [8].

Таким образом, поиск новых методов упрочнения классических алюминиевых сплавов системы Al-Si, в частности сплава АК5М2, является весьма актуальной задачей современного материаловедения. В литературе достаточно подробно рассмотрено влияние конвертированных потоков энер-

гии на структуру и свойства сплавов системы Al–Si [9-12]. Целью данной работы было исследование усталостной долговечности сплава АК5М2 после процесса вакуумно-дугового нанесения покрытия из технически чистого титана марки ВТ1-0. Образцы для исследований усталостной долговечности имели форму параллелепипеда размерами 4x12x130 мм с двумя концентраторами напряжений в виде полукруга радиусом 20 мм. Для качественной оценки усталостных характеристик образцов, изготовленных по ГОСТ 25.502-79, их подвергали механической шлифовке наждачной бумагой с уменьшением дисперсности абразивных частиц, поскольку, как показывают исследования, качество подготовки поверхности изделий влияет на показатели сопротивления усталости [13]. Формирование пленки титана осуществляли методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения на установке «КВИНТА» [14]. С этой целью использовали катод из технически чистого титана марки ВТ1-0. На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной (1, 3, 5) мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах: образцы располагались напротив дугового испарителя, напыление производилось без вращения образца, ток дугового испарителя $I_D = 80$ А (ток электродинамической стойкости), $I_P = 20$ А (пусковой ток), $I_H = 135$ А (номинальный ток), $\gamma = 75$ %, $U_{см} = 35$ В, $p = 0,3$ Па, $t = 10$ мин. Пленки были получены при использовании электромагнитного фильтра капельной фракции. Элементный состав полученного покрытия определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор EDAХ ECON IV, установленный на сканирующем электронном микроскопе SEM 515 Philips). Результаты исследований, представленные на рисунке 1, свидетельствуют о том, что покрытие сформировано титаном и не содержит примесей.

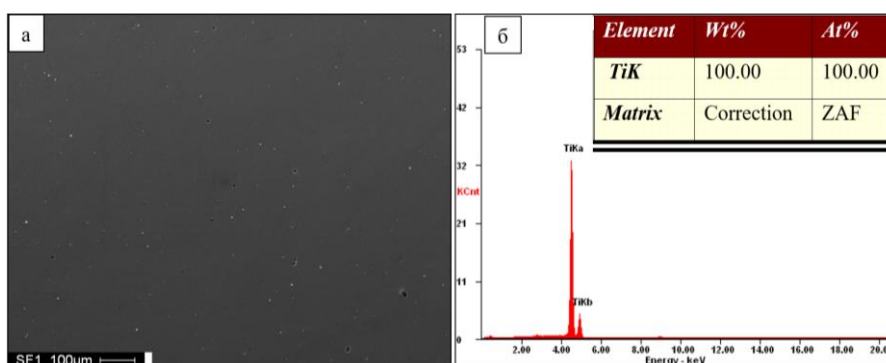


Рисунок 1 - Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца силумина марки АК5М2 с напыленной пленкой титана (а).

На (б) приведены энергетические спектры, полученные с участка покрытия, представленного на (а)

Состояние фазового состава, дефектной субструктуры системы «пленка/подложка» изучали методами просвечивающей электронной микроскопии. В результате исследований установлено, что вакуумно-дуговое напыление пленки титана сопровождается формированием многослойной системы.

Сформированная на сплаве АК5М2 пленка титана является нанокристаллическим многофазным столбчатым образованием (рисунок 2). Размеры кристаллитов изменяются в пределах (5-7) нм. Индицирование микроэлектроннограммы, полученной с напыленной пленки, выявило присутствие, кроме рефлексов α -Ti, рефлексов кремния, алюминиды титана состава Al_3Ti , силицида титана состава Ti_5Si_3 . Учитывая факт многофазности напыленной пленки и переходного слоя, можно констатировать наличие термодиффузионных процессов, имеющих место при напылении пленки титана на сплав.

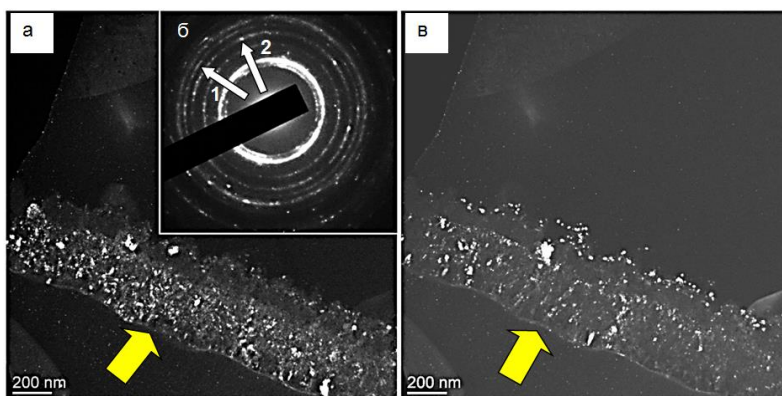


Рисунок 2 - Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя сплава АК5М2 с напыленной пленкой титана: а – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах $[100]\alpha\text{-Ti} + [211]\text{Si} + [211]\text{Al}_3\text{Ti}$, б – микроэлектроннограмма, в – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах $[100]\text{Ti}_5\text{Si}_3 + [211]\text{Si}$; на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (а), 2 – для (в); на (а) и (в) стрелками указана поверхность пленки

В результате усталостных испытаний установлено, что в литом состоянии сплав АК5М2, подвергнутый испытаниям в условиях многоциклового усталости, разрушается в среднем через 113427 ± 13289 циклов после приложения асимметричной нагрузки с частотой $\sim 3,8$ циклов/с. Максимальное значение числа циклов до разрушения, которое выдержал образец сплава АК5М2 в исходном состоянии – 165454 циклов. Формирование на поверхности образцов системы пленка «(Ti)/(АК5М2) подложка» приводит к качественному изменению усталостной долговечности сплава. Установлено, что с увеличением толщины пленки титана, предварительно напыленной на поверхность рабочей области образцов, усталостная долговечность силумина возрастает от $N_1 = 110784$ ($h = 1$ мкм) до $N_5 = 245274$ ($h = 5$ мкм).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

Библиографический список

1. Javidani M. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. / M. Javidani, D. Larouche // International Materials Reviews. – 2014. – Vol. 59 (3). – pp. 132-158.
2. Pierce D. High temperature materials for heavy duty diesel engines: his-

torical and future trends/ D. Pierce, A. Haynes, J. Hughes, R. Graves, P. Maziasz, G. Muralidharan, et al.// Progress in Materials Science. – 2019. – Vol.103. – pp. 109-179.

3. Viet-Duc L. Osmond Simulation of the Kitagawa-Takahashi diagram using a probabilistic approach for cast Al-Si alloys under different multiaxial loads / L. Viet-Duc, F. Morel, D. Bellett, N. Saintier // International Journal of Fatigue. – 2016. – Vol. 93. – pp. 109-121.

4. Zerbst U. Material defects as cause for the fatigue failure of metallic components / U. Zerbst, C. Klinger // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol.127. – pp. 312-323.

5. Yang Z. Wilkinson 2D and 3D characterization of pore defects in die cast AM60 / Z. Yang, A. Maurey, J. Kang, D.S. Wilkinson // Materials Characterization. – 2016. – Vol.114. – pp. 254-262.

6. Effect of casting imperfections on the fatigue life of 319-F and A356-T6 Al-Si casting alloys. Material Science Engineering: A. –2008. – Vol. 473. – pp. 65-75.

7. Dezecot S. Microstructural characterization and high cycle fatigue behavior of investment cast A357 aluminum alloy. / S. Dezecot, M. Brochu // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 77. – pp. 154-159.

8. Wang M. Influence of microstructures on the tensile and low-cycle fatigue damage behaviors of cast Al₁₂Si₄Cu₃NiMg alloy/ M. Wang, J.C. Pang, H.Q. Liu, S.X. Li, Z.F. Zhang // Material Science Engineering: A. –2019. – Vol.759. – pp. 797-803.

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

10. Zaguliaev D.V. The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of Al-Si alloys with different silicon content / D.V. Zaguliaev, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, V.V. Shlyarov, Yu.A. Rubannikova // Progress in Physics of Metals. – 2021. – Vol. 22. – No. 1. – pp. 129-157

11. Шляров, В.В. Увеличение механических характеристик сплава АК5М2, упроченного методом вакуумно-дугового нанесения металлических покрытий/ В.В. Шляров, А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев, Иванов Ю.Ф., Устинов А.М.// Инженерная физика. – 2023. – №4. – С. 38-47.

12. Huakang B. Microstructure refinement for superior ductility of Al–Si alloy by electron beam melting. / B. Huakang, A. Kenta, Z. Yufan, M. Chikatoshi, M. Toshihiro, C. Akihiko // – Vol. 32. – 2020. – pp. 100982.

13. X. Qian Fatigue and Fracture: Understanding the Basics (ASM TECHNICAL BOOKS, 2012

14. Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys / ed. ed. N.N. Koval and Yu.F. Ivanova. – Tomsk: NTL Publishing House, 2016. – 312 p.

УДК 669.71:537.8:620.17

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕДИ МАРКИ М1 В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

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

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: shlyarov@mail.ru*

В настоящее время установлено, что внешние энергетические воздействия на твердые тела, подвергаемые деформации, способны существенно изменять как кинетику протекания процесса, так и интегральные, прочностные и пластические характеристики. Можно предположить, что наложение магнитного поля оказывает влияние на эволюцию (скорость накопления и аннигиляции, механизмы зарождения и схему перестройки) дефектной субструктуры объема и приповерхностного слоя образцов при ползучести технически чистой меди по сравнению с ползучестью меди без магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле, разрушение, индукция, медь, разрушение, М1, сканирующая электронная микроскопия.

Многие медные компоненты, такие как обмотки преобразовательного трансформатора, используемого в передаче сверхвысокого напряжения (СВН) [1, 2], и рельсы в электромагнитном пуске [3, 4], неизбежно работают в условиях сопряжения электрического тока высокой плотности и сильного магнитного поля. Возьмем, к примеру, преобразовательные трансформаторы передачи сверхвысокого напряжения, плотность электрического тока через медь, при возникающем время от времени коротком замыкании, может достигать 10^4 А/см² и выше [5] (эта величина может достигать 10^6 А/см² при электромагнитном пуске), а индукция магнитного поля составляет несколько тесла (Тл). Котлы, работающие в таком состоянии, всегда имеют нежелательную механическую деформацию, которая может привести к преждевременному выходу из строя или даже полной гибели всего оборудования [6]. В последние годы были предприняты большие усилия для изучения влияния отдельных электрических или магнитных полей [7-9] на механическую деформацию металлических материалов. Однако мало что известно о механических свойствах проводящих материалов при одновременном воздействии электрических и магнитных полей, особенно с количественной точки зрения, учитывая сложность испытаний.

В связи с этим данное направление исследований является весьма актуальным с практической и научной точек зрения. Ранее в работах показано из-

менение механических характеристик парамагнитных материалов в постоянном магнитном поле до 0,6 Тл [10-12].

Целью данной работы является проведение фрактографического анализа поверхности разрушения технически чистой меди марки М1, разрушенной в условиях действия постоянного магнитного поля.

При анализе поверхности изломов гладких образцов, испытанных на растяжение, как правило, выделяют три зоны, называемые волокнистая, радиальная и зона среза. Волокнистая зона расположена в центре излома и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения или рядом с ней. Она отвечает области медленного роста трещины. Эта зона состоит из области случайно расположенных волокон. Распространение трещины в волокнистой зоне происходит в результате слияния микропор при разрушении перемычек между ними. Очаг излома расположен в центре волокнистой зоны. При переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению образуются радиальные рубцы, которые совпадают с общим направлением распространения трещины. Зона среза состоит из участка, смежного со свободной поверхностью образца. Общий вид поверхности разрушения меди М1 представлен на рисунке 1.

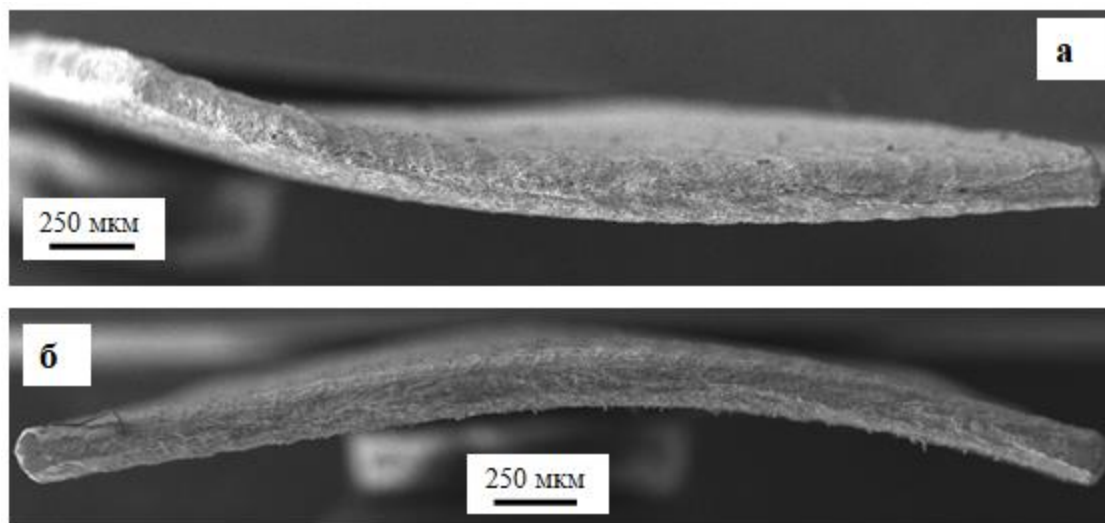


Рисунок 1 – Фрактограммы поверхности разрушения технически чистой меди; а – ползучесть в условиях магнитного поля; б – ползучесть без магнитного поля

Ямки разрушения, как правило, разделяют на три группы – равноосные, ямки сдвига и ямки отрыва. Зона боковых скосов часто содержит систему овальных ямок, вытянутых в одном и том же направлении – направлении сдвига (это ямки сдвига) (рисунок 2 а). Ямки отрыва формируются в условиях внецентрального напряженного состояния, присущего, например, образцам с надрезом, испытываемых в условиях плоской деформации. В этих условиях образуются вытянутые ямки, имеющие вид парабол, развернутых в направлении зарождения трещины (рисунок 2 б, стрелкой указано

направление зарождения трещины). Следует отметить, что в наших экспериментах ямки отрыва наиболее отчетливо наблюдались на поверхности разрушения образцов меди, деформированных при ползучести в магнитном поле. Равноосные (квазиравноосные) ямки разрушения в исследуемых образцах наблюдались преимущественно в волокнистой зоне в центральной области излома (рисунки 2 в, г).

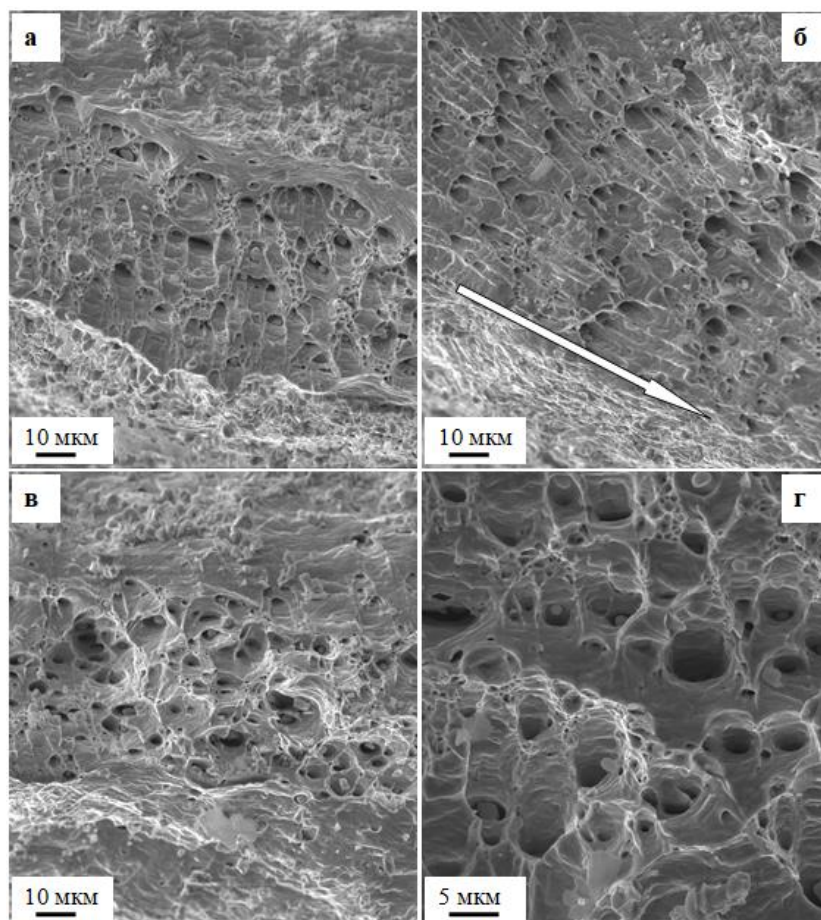


Рисунок 2 – Ямки разрушения, формирующиеся при ползучести плоских гладких образцов меди; а – ямки сдвига; б – ямки отрыва; в, г – равноосные ямки; на (б) стрелкой указано направление зарождения трещины

На больших ямках разрушения часто видны признаки деформации в виде серпантинного скольжения и волнистости, а также зоны вытяжки. Возникновение зоны вытяжки, т.е. сравнительно безрельфной поверхности разрушения, обусловлено так называемой вытяжкой, когда в процессе длительной деформации по существу стираются детали рельефа. Иногда в качестве причины образования таких областей рассматривается декогезия материала по плоскости скольжения или вязкий скол. Следует отметить, что ямки разрушения с элементами вытяжки присутствуют преимущественно в образцах меди, разрушенной при наложении магнитного поля.

Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Библиографический список

1. Ahn H.M. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer / H.M. Ahn, Y.H. Oh, J.K. Kim, J.S. Song, S.C. Hahn // IEEE Xplore: IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48(2). – pp. 819-822.
2. Ahn H.M. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer / H.M. Ahn, J.Y. Lee, J.K. Kim, Y.H. Oh, S.Y. Jung, S.C. Hahn // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47(3). – pp. 1267-1272.
3. Fair H.D. Progress in electromagnetic launch science and technology / H.D. Fair // IEEE Xplore: IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – Vol. 43(1). – pp. 93-98.
4. Li Q. Simulation on controlled strong magnetic environment for electronic fuze during railguns launching / Q. Li, M. Wei, Q.A. Lv, H. Xiang, B. Lei // 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). – 2011. – Vol. 47(3). – pp. 1121-1125.
5. Chen B. Analysis on influence of winding layout on leakage magnetic field and electromagnetic force of high-frequency transformer / B. Chen, X. Liang, Q. Xiao, Z. Liu, N. Zhang, D. Zhan // High Voltage Appar. – 2022. – Vol. 58(2). – pp. 95-102.
6. Li Y. Electromagnetic force analysis of a power transformer under the short-circuit condition / Y. Li, Q. Xu, Y. Lu // IEEE Xplore: IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Vol. 31(8). – pp. 1-3.
7. Li G.R. Influence of a high pulsed magnetic field on the tensile properties and phase transition of 7055 aluminum alloy / G.R. Li, J.F. Cheng, H.M. Wang, P.S. Li, C.Q. Li // Materials Research Express. – 2016. – Vol. 3(10).
8. Li G.-R. Influence of high pulsed magnetic field on tensile properties of TC4 alloy / G.-R. Li, F.-F. Wang, H.-M. Wang, R. Zheng, F. Xue, J.-F. Cheng // Chinese Physics B. – 2017. – Vol. 26(4). – pp. 046201.
9. Guo Y. Magneto-plasticity in micro-cutting of single-crystal copper / Y. Guo, Y.J. Lee, Y. Zhang, H. Wang // Journal of Materials Science and Technology. – 2022. – Vol. 124. – pp. 121-134.
10. Шляров В.В. Анализ изменения микротвердости, скорости ползучести и морфологии поверхности разрушения титана ВТ1-0, деформируемого в условиях действия постоянного магнитного поля 0,3Тл/ В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, А.А. Серебрякова // Frontier Materials and Technology. – 2022. – № 1. – С. 91–100.
11. Шляров В.В. Особенности деформации технически чистого титана в постоянном магнитном поле / В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, В.Е. Громов, А.М. Глезер, А.А. Серебрякова // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 3. – С. 25-31.

12. Шляров В.В. Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля / В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, К.В. Аксенова// Вестник СибГИУ.– 2022.– № 2 (40).– С. 10-16.

УДК 669.295:537.8:620.17

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА МАРКИ VT1-0 В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Шляров В.В., Серебрякова А.А., Аксенова К.В., Шлярова Ю.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: shlyarov@mail.ru*

Циклические испытания на многоцикловую усталость технически чистого титана проводили в нормальных условиях (без магнитного поля) и после воздействия постоянного магнитного поля различной плотности ($B = 0,3, 0,4, 0,5$ Тл). Показано, что наложение постоянного магнитного поля различной плотности привело к кратному увеличению среднего числа циклов до разрушения образцов титана VT1-0 на 64, 123 и 163 % соответственно.

Ключевые слова: магнитное поле, многоцикловая усталость, индукция, титан VT1-0, усталостные бороздки, субзеренная структура, микроскопия.

Внешние энергетические поля широко используются для увеличения срока службы металлических элементов и конструкций, которые в основном подвергаются усталостным воздействиям, коррозии и износу [1, 2]. К традиционным методам внешнего энергетического воздействия можно отнести - термические, термохимические, электронно-лучевые, плазменные, лазерные и другие, которые влияют на структуру, физико-механические свойства металлов, в том числе на их сопротивление усталости, за счет перестройки дислокационная субструктура и фазовый состав металлов. Экспериментальные результаты по влиянию электроэрозионной обработки на рост усталостных трещин в алюминиевых сплавах, полученные авторами [3, 4], позволили сделать вывод о том, что увеличение усталостной долговечности связано с эффектом экранирования трещин за счет локализованному плавлению, вызванному импульсным электрическим током силой 90 А/мм^2 . В работах [5, 6] установлено, что после лазерного упрочнения сплава Ti-6Al-4V наработка увеличивается на 2,4–42,7 % в зависимости от числа проходов лазера и достигает своего максимума (33 200 циклов) после 3. В работе [7] лазерная ударная обработка сплава Ti-17 привела к росту его сопротивления усталостным трещинам с $1,68 \cdot 10^5$ до

$4,05 \cdot 10^5$ и $2,90 \cdot 10^5$ циклов после обработки лазерной энергией 20 и 30 Дж соответственно.

Существуют и другие, не менее эффективные, но менее изученные способы внешнего энергозаклада, например магнитные поля. В качестве эффективного параметра воздействия магнитное поле чрезвычайно полезно для модификации микроструктуры и оптимизации свойств материала [8]. Применение магнитного поля при обработке поверхности заэвтектического силумина приводит к измельчению первичного кремния, что повышает его твердость и микротвердость [9]. В сплаве Mg-Al-Gd, подвергнутом воздействию постоянного магнитного поля 1 Тл при гомогенизации при температуре 525 °С, наблюдались изменения микроструктуры и улучшение механических свойств [10].

Можно сделать вывод о недостаточной изученности характера воздействия постоянных и импульсных магнитных полей на структуру и деформационные свойства, особенно на сопротивление усталости. Ранее нашим научным коллективом были проведены исследования влияния постоянных магнитных полей на микротвердость и скорость ползучести титана ВТ1-0 [11-13]. В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование влияния постоянного магнитного поля плотностью от 0,3 до 0,5 Тл (in situ) на усталостную долговечность технически чистого титана ВТ1-0 при циклических асимметричных нагрузках.

Зависимость среднего числа циклов до разрушения N от параметров внешнего магнитного поля (индукция B) представлена на рисунке 1. Анализ представленной зависимости позволяет говорить о том, что приложение постоянного магнитного поля с плотностью 0,3, 0,4 и 0,5 Тл привели к увеличению усталостной долговечности титановых образцов ВТ1-0 на 64, 123 и 163 % соответственно.

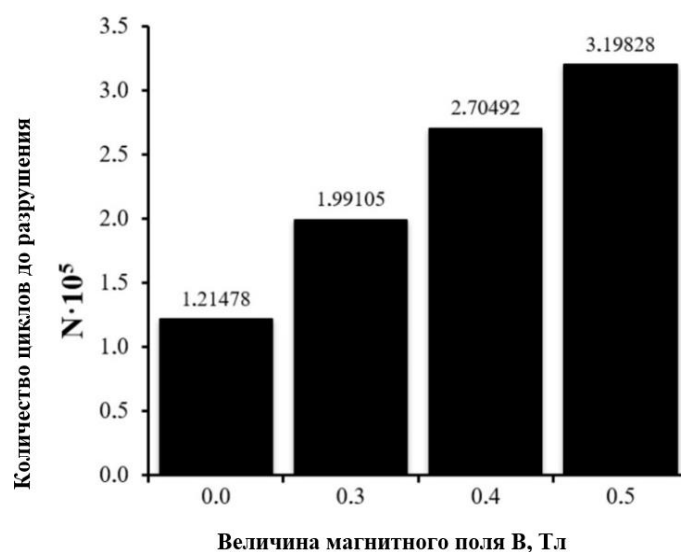


Рисунок 1 - Зависимость среднего числа циклов до разрушения N от величины индукции поля B при испытаниях на циклическую усталостную долговечность технически чистого титана ВТ1-0

В условиях усталостного нагружения развивается процесс формирования упрочненного поверхностного слоя. На рис. 2 представлены изображения структуры поверхностного слоя разрушенных образцов титана (зона роста усталостной трещины). Особенностью зоны роста усталостной трещины является образование субзеренной (фрагментарной) структуры. Размеры субзерен зависят от величины индукции магнитного поля и варьировались от 0,56–0,87 мкм для образца, разрушенного в отсутствие магнитного поля (рис. 2а), до 0,47–0,65 мкм для образца, разрушенного в магнитном поле при $B = 0,5$ Тл (рисунок 2 г).

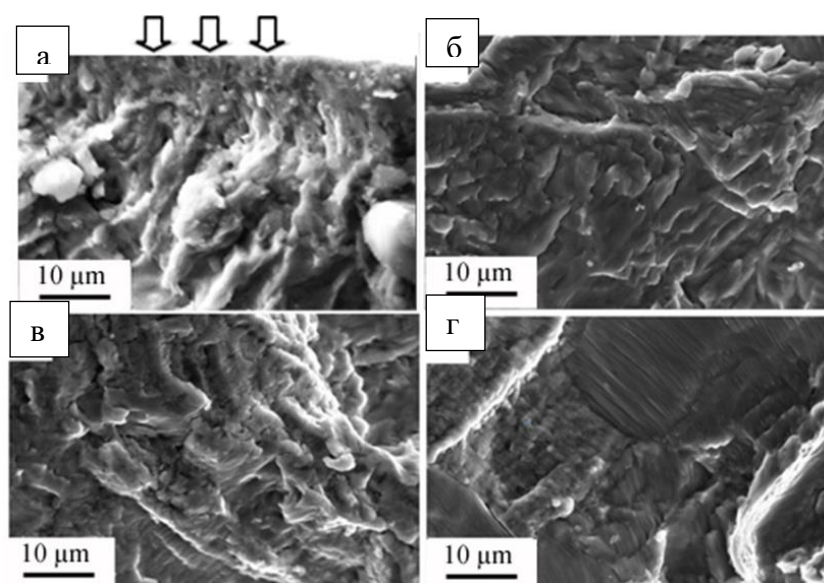


Рисунок 2 - Блочная (субзеренная) структура, сформированная в поверхностном слое титана, разрушенного при усталостных испытаниях в магнитном поле: (а) 0 Тл; (б) 0,3 Тл; (в) 0,4 Тл; (г) 0,5 Тл. Стрелки на (а) указывают на поверхность образца

Проведенные исследования показывают, что формирование субзеренной структуры в зоне усталостного роста излома влияет на распространение микроразрушения. А именно, расстояние между усталостными бороздами соответствует размеру субзерен. Анализ результатов указывает на то, что усталостные борозды в поверхностном слое разнесены на расстояние, соответствующее размеру субзерен. Следовательно, границы субзерен в зоне роста усталостной трещины оказывают тормозящее влияние на распространение микротрещины.

Факты, выявленные в результате анализа поверхности разрушения, свидетельствуют о более высоком сопротивлении материала распространению усталостной трещины и увеличении срока его службы при усталостных испытаниях в магнитном поле. Это коррелирует с данными об увеличении среднего числа циклов до разрушения образцов титана ВТ1-0.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 21-79-00118, <https://rscf.ru/project/21-79-00118>.

Библиографический список

1. Peralta P. Fatigue of Metals/ P. Peralta, C. Laird, // In: Physical Metallurgy, 5th ed.; Laughlin, D.E., Hono, K., Eds.; Elsevier: Amsterdam, Netherlands. – 2014. – pp. 1765-1880.
2. Li G. High-temperature failure mechanism and defect sensitivity of TC17 titanium alloy in high cycle fatigue. / G. Li, C. Sun // Journal of Materials Science and Technology. – 2022. – V. 122. – pp. 128–140.
3. Jung J. Effect of pulsed electric current on the growth behavior of fatigue crack in Al alloy. / J. Ju., Y. Jung, Y. Morita, Y. Toku // Procedia Structural Integrity. – 2016. – № 2. – pp. 2989–2993.
4. Mohin M. Effect of electromagnetic treatment on fatigue resistance of 2011 aluminum alloy/ M. Mohin, H. Toofanny, A. Babutskyi, A. Lewis, Y. Xu // Journal of Multiscale Modelling. – 2016. – V.7. – pp. 1650004.
5. Huang S. On the influence of laser peening with different coverage areas on fatigue response and fracture behavior of Ti–6Al–4V alloy/ S. Huang, J. Sheng, J.Z. Zhou, J.Z. Lu, X.K. Meng, S.Q. Xu, H.F. Zhang// Engineering Fracture Mechanics. –2015. – V.147. – pp. 72–82.
6. Ren X. Fatigue behavior of double-sided laser shock peened Ti-6Al-4V thin blade subjected to foreign object damage/ X. Ren, B. Chen, J. Jiao, Y. Yang, W. Zhou, Z. Tong // Optics & Laser Technology. – 2020. – V.121. pp. 105784.
7. Sun R. Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy. / R. Sun, L. Li, W. Guo, P. Peng, T. Zhai, Z. Che, B. Li, C. Guo, Y. Zhu // Materials Science & Engineering: A. – 2018. – V.737. pp.94–104.
8. Qi K. Effect of magnetic field on the microstructure and wear properties of TiB₂/metal composite layers synthesized in situ by laser cladding on Ti–6Al–4V alloy/ K. Qi, Y. Yang, W. Liang, K. Jin, L. Xiong // Ceramics International. – 2021. – V. 47. – pp. 29463–29474.
9. Donii O. Influence of the external magnetic field on the structure and properties of the hypereutectic aluminum-silicon alloy/ O. Donii, T. Narizhna, M. Voron, D. Berest // Non-Equilibrium Phase Transformations. – 2018. – № 4. – pp. 79–82.
10. 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.
11. Шляров В.В. Особенности деформации технически чистого титана в постоянном магнитном поле / В.В. Шляров, Д.В. Загуляев, В.Е. Громов, А.М. Глезер, А.А. Серебрякова // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 3. – С. 25-31.
12. Серебрякова А.А. Процесс стационарной ползучести алюминия А85, титана ВТ1-0, свинца С2 / А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев, В.В. Шля-

ров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2021. – № 3(37). – С. 27-30.

13. Шляров, В.В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов / В.В. Шляров, Д.В. Загуляев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 394-398.

УДК 536.425:539.25:539.351

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: rubannikova96@mail.ru*

Используя технологию проволочно-дугового аддитивного производства, был изготовлен высокоэнтروпийный сплав неэквивалентного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni. Методами современного физического материаловедения выполнен анализ структуры поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате комплексного модифицирования, сочетающего напыление пленки (В+Cr) и облучение импульсным электронным пучком в среде аргона.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, Al-Cr-Fe-Co-Ni, аддитивная технология, система «пленка/подложка», электронно-ионно-плазменная обработка.

В последние два десятилетия внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к исследованию структуры, свойств, методов получения и стабильности так называемых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1-4], содержащих не менее 5 основных элементов. Такой интерес обусловлен уникальными физико-механическими свойствами ВЭС (коррозионной и износостойкостью, жаро- и криопрочностью, особыми магнитными и электрическими свойствами и т.д.), что делает их перспективными для различных областей использования [5-7].

Одним из наиболее эффективных методов поверхностного упрочнения является электронно-пучковая обработка, обеспечивающая сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения (до 10^6 К/с), в результате чего образуются субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния [8, 9].

Целью работы является анализ структуры поверхностного слоя ВЭС (Al-Cr-Fe-Co-Ni), сформированного в результате комплексного модифици-

рования, сочетающего напыление пленки (В+Cr) и облучение импульсным электронным пучком.

В качестве материала исследования использован высокоэнтропийный сплав элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni, полученный с помощью технологии проволоочно-дугового аддитивного производства WAAM [4]. Размеры образцов 15x15x5 мм. Обработка поверхностного слоя ВЭС проводилась следующим образом: (1) формировали систему «пленка/подложка» (напыляли пленку бора толщиной 0,5 мкм, поверх пленки бора напыляли пленку хрома толщиной 0,5 мкм), (2) облучали систему «пленка (В)+пленка (Cr) / (ВЭС) подложка» импульсным электронным пучком. Облучение системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов (20-40) Дж/см², длительность импульса 200 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, давление рабочего газа (аргон) 0,02 Па. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка (Cr+В) / (ВЭС) подложка» проводили методами сканирующей электронной микроскопии.

Высокоэнтропийный сплав, сформированный методом аддитивных технологий, имеет дендритное строение и содержит химические элементы в следующем составе (ат. %): 33,4% Al; 8,3% Cr; 17,1% Fe; 5,4% Co; 35,7% Ni). Методом картирования осуществлен анализ распределения атомов в объеме сплава (рис. 1). Установлено, что границы зерен (средний размер зерна 12,3 мкм) и дендритов обогащены атомами хрома и железа; объем зерен обогащен атомами алюминия и никеля; атомы кобальта распределены в объеме сплава квазиоднородно.

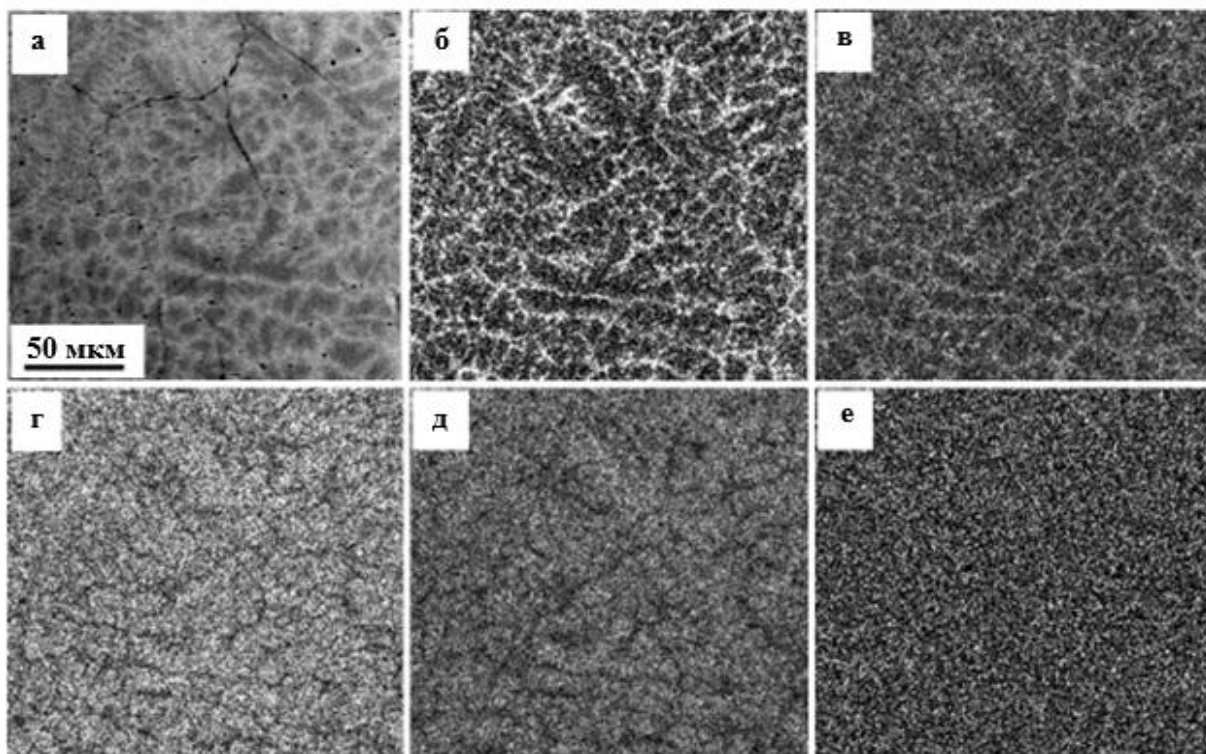


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС (а); б-е – изображения участка образца (а), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Cr (б), Fe (в), Ni (г), Al (д), Co (е)

При облучении системы «пленка/подложка» пучком электронов с плотностью энергии 20 Дж/см^2 поверхность образца фрагментируется сеткой микротрещин (рисунок 2, а). Размер фрагментов изменяется в пределах от 40 мкм до 200 мкм при среднем размере 104 мкм. В объеме фрагментов выявляется зеренная структура (рисунок 2, в). Средний размер зерен 2,7 мкм, что в 4,5 раза меньше среднего размера зерен ВЭС в исходном состоянии.

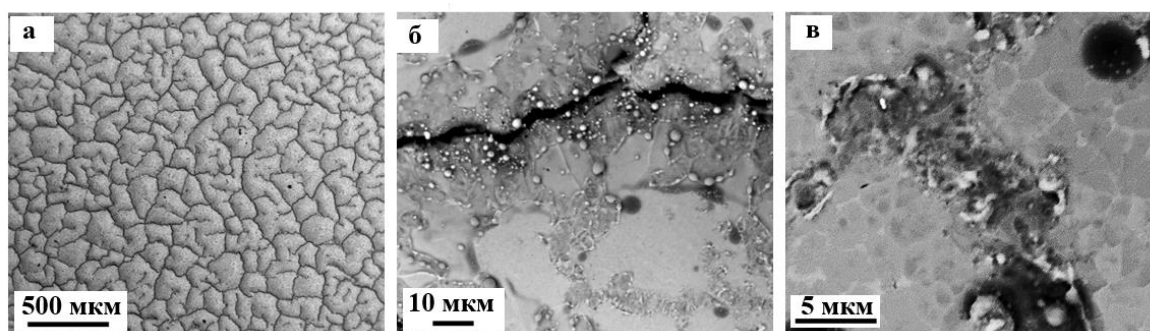


Рисунок 2 – Структура системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 20 Дж/см^2

С увеличением плотности энергии пучка электронов (E_S) средний размер зерен поверхностного слоя ВЭС возрастает и при $E_S = 40 \text{ Дж/см}^2$ составляет 19 мкм. Очевидно, что многократное уменьшение среднего размера зе-

рен поверхностного слоя ВЭС при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ является одной из причин повышения прочностных свойств сплава (эффект Холла-Петча).

Облучение системы «пленка/подложка» импульсным электронным пучком при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ не приводит к растворению пленки. Наблюдаются протяженные прослойки пленки, расположенные в объеме и вдоль границ фрагментов, и островки пленки, расположенные в стыках фрагментов (рисунки 2, б, в).

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 30 Дж/см^2 и, далее, до 40 Дж/см^2 приводит к полному растворению пленки (В+Cr). Как и при $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ поверхность образцов фрагментируется сеткой микро-трещин, что указывает на высокий уровень растягивающих напряжений, формирующихся в поверхностном слое образцов при облучении сплава.

Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к формированию субзеренной структуры (структура высокоскоростной кристаллизации). При $E_s = 20 \text{ Дж/см}^2$ субзеренная структура наблюдается весьма редко; при $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$ субзеренная структура формируется в стыках границ зерен и фрагментов; при $E_s = 40 \text{ Дж/см}^2$ субзерна формируются по всей поверхности образца. Размер субзерен не зависит от плотности энергии пучка электронов и составляет (150-200) нм.

Библиографический список

1. George E. P. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms / E. P. George, W. A. Curtin, C. C. Tasan // *Acta Materialia*. – 2020. – V. 188. – P. 435–474.

2. Осинцев К.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение/ К. А. Осинцев., В. Е. Громов, С. В. Коновалов, Ю. Ф. Иванов, И. А. Панченко // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 249–258.

3. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов / А. С. Рогачев // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121. – № 8. – P. 807–841.

4. Gromov V. E. Structure and properties of high-entropy alloys / V. E. Gromov, S. V. Konovalov, Yu. F. Ivanov, K. A. Osintsev. – Springer. *Advanced structured materials*, 2021. V. 107. 110 p.

5. Miracle D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // *Acta Mater.* – 2017. – V. 122. – P. 448–511.

6. Alaneme K. K. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review/ K. K. Alaneme, M. O. Bodunrin, S. R. Oke // *J. Mater. Res. Technol.* – 2016. – V. 5. – No. 4. – P. 384–393.

7. Liu K. Extremely high fatigue resistance in an ultrafine grained high entropy alloy/ K. Liu, S. S. Nene, M. Frank, S. Sinha, R. S. Mishra // *Appl. Mater. Today*. – 2019. – V. 15. – P. 525–530.

8. Ivanov Yu. F. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies/ Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, D. V. Zagulyaev, S. V. Konovalov, Yu. A. Rubannikova, A.P. Semin // Progress in Physics of Metals. – 2020. – V. 21. – No. 3. – P. 345–362.

9. Gromov V. E. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V. E. Gromov, Yu. F. Ivanov, S. V. Vorobiev, S. V. Konovalov. – Cambridge International Science Publishing Ltd, 2015. 272 p.

УДК 631.829

СОДЕРЖАНИЕ СЕЛЕНА В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОБЗОР)

Самохвалова О.С., Семина И.С.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: samohvalova_os@sibsiu.ru*

Проведен обзор литературы, изучающей исследования по содержанию селена в почвах и растениях. В большинстве регионов России на почвах с низкой обеспеченностью селеном отмечается его дефицит в урожае сельскохозяйственных культур. Для оптимизации питания растений на почвах с недостатком микроэлемента необходимо внесение селеновых удобрений, что положительно сказывается на продуктивности растений.

Ключевые слова: селен, почва, растения, человек, удобрения, оптимизация.

Введение

Селен – это хрупкий, блестящий на изломе неметалл серого цвета (данный цвет обусловлен устойчивой аллотропной модификацией, неустойчивые аллотропные модификации придают селену различные оттенки красного цвета), является аналогом серы. В последние десятилетия этот микроэлемент очень популярен, научно доказана его жизненная необходимость для животных и растений, входит в состав фермента глутатионпероксидазы, а также способствует укреплению иммунитета и выведению тяжелых металлов из организма. Селен является синергистом витамина Е и йода. При его дефиците йод плохо усваивается организмом, в организме человека возможно возникновение болезни Кешана, выражающейся в аритмии, увеличении размеров сердца, некрозе миокарда. Кроме того, наблюдаются следующие патологии: снижение иммунитета и функции печени, болезни кожи, волос, иногда катаракта, репродуктивная недостаточность. В тоже время доказано, что при превышении допустимых норм селен токсичен для растений, животных и человека. Люди, проживающие в селеновых геохимических провинциях, могут страдать от постоянной усталости и потери аппетита, гастритов [10]. Суточная потребность человека в селене находится в пределах 0,02 – 0,20 мг [13].

От содержания селена в почвах зависит качество, состав сельскохозяйственной продукции и, как следствие, здоровье населения. В связи с увеличением эпидемических заболеваний возникает потребность более углубленного и систематизированного изучения данного элемента.

Проведение научных исследований и дальнейшее внедрение результатов в практическую деятельность будет способствовать повышению содержания селена в растительной продукции, а также увеличению качественных показателей элемента в почвенном покрове.

Цель работы – обзор научных исследований и обобщение сведений о содержании селена в почвах, растениях и природных водах.

Объекты исследования – почвы, растения.

Результаты

Почвы. Кларк селена в земной коре составляет по Виноградову 50 мкг/кг, а по Беусу и Бородину он в 10 раз выше [2].

Наиболее часто в литературе встречаются следующие значения по содержанию селена в почвообразующих породах: для магматических пород 10-50 мкг/кг, для осадочных - 30-600 мкг/кг почвы. Наиболее часто селен встречается и в сульфидных рудах, в ураново-молибденовых и серных месторождениях. Обнаруживается он чаще в комплексе с фосфоритами, а также с минералами, содержащими Pb, Zn, Hg, Ag и Cu. По результатам В.В. Ермакова в известняках содержится до 110 мг/кг селена, в смеси известняка с доломитом - 110-1100 мг/кг, в сланцах 51-110 мг/кг, в сланцевых глинах - 61 мг/кг

Содержание селена в естественных почвах зависит от подстилающих пород, на которых они сформированы. Среднее содержание селена в почвах составляет 400 мкг/кг [2]. Концентрации его в почвах различных генетических типов обычно варьируют в пределах от 10 до 1200 мкг/кг. Как правило, почвы, образованные на элювиальных гранитах и метаморфизованных песчаниках, характеризуются невысоким содержанием селена. Валунные пески и супеси отличаются особенно низкими концентрациями этого элемента. В подзолистых и дерно-подзолистых малогумусированных почвах содержание селена часто незначительно. Отмечено, что в почвах, сформировавшихся на вулканических породах, селена больше по сравнению с почвами, образовавшимися на глинах, песчаниках, известняках [4,16].

Существуют почвы очень богатые селеном. Так, на вулканических почвах о. Гавайи содержится до 6000 мг/кг. Содержание селена в отдельных почвах Шотландии колеблется от 11 до 210 мг/кг, Японии - от 41 до 110, Новой Зеландии - от 71 до 168 (Fisher, 1988), в почвах Ирландии - от 30 до 324. Пониженное содержание селена (1,1 мг/кг) обнаружено А.П. Виноградовым в отдельных образцах почв Русской равнины.

Биогеохимический мониторинг содержания селена в России проведен весьма неравномерно. Тем не менее, были выявлены обширные биогеохимические субрегионы с недостатком селена в Нечерноземной зоне Европейской части России, Южном Урале и Удмуртии [4]. Отдельные очаги недостатка данного элемента выявлены в Ярославской области и других областях лесостепной

зоны [5]. Установлено, что на уровень содержания селена в почках оказывает влияние техногенное загрязнение природных комплексов. Интенсивное применение фосфорных удобрений, интенсивное загрязнение почв тяжелыми металлами могут стать причиной селенодефицита отдельных районов [12].

По результатам анализа почв, в отдельных образцах из пахотного слоя содержание селена составило 0,012-2,20 мг/кг со средним значением 0,24 мг/кг. В образцах почв Иркутской области найдено 0,03-0,18 мг/кг элемента, в Предкавказском черноземе - 0,01-0,03 мг/кг. Сравнительно высоко обеспечены селеном торфяные почвы Латвии - 0,59-1,01 мг/кг, Узбекистана - 0,85-2,2, Южного Урала - 0,7-17 мг/кг селена [5].

Учеными подробно изучено содержание селена в почвах Новосибирской области. На территории приведенной области существуют районы, где содержание селена в почвах невелико и возможен его дефицит в пищевой цепи. Так, в своих исследованиях авторы отмечают, что концентрация элемента в почвах наследуется от свойств материнских пород и убывает в направлении от Кузбасса на север в сторону Новосибирской области [10, 14].

Установлено, что при почвообразовательном процессе теряется 60-80 % селена из материнских пород. Почвы, содержавшие селен в количестве 2-4 мг/кг, образовались из материнских пород, имевших его около 10 мг/кг. Уменьшение содержания селена в процессе почвообразования происходит в результате выщелачивания, которое сопутствует практически любому почвообразовательному процессу. В целом, по результатам отдельных исследований в почвах РФ, можно отметить, что содержание селена в основном сильно варьируется отмечено достаточное количество районов с низким содержанием селена в пахотном горизонте.

Растения. Содержание селена в растениях зачастую варьируется также широко, как и в почвах: от 10 до 1500 мкг на 1 кг воздушно-сухой массы [6]. По данным некоторых ученых, уровень накопления селена в пшенице, выращенной в России, в 6-7 раз меньше, чем в зерне импортируемого из других стран [3]. В целом, по стране обеспеченность сельскохозяйственного производства микроэлементами не превышает 10% от их общей потребности [15].

В растениях селен находится как в неорганических соединениях (селенаты и селениты) так и в органической форме. В кислых почвах и при высоком содержании в них органического вещества селен представлен в виде селенидов и сульфитов, которые являются малоподвижными и труднодоступными соединениями для растений [1]. Встречается он также в форме свободных аминокислот, не связанных с белками, таких как селеноцистатинин, селеногомоцистеин. Промежуточными соединениями селенового обмена являются деметилселенид, триметилселенид, селеносуперсульфид, селенодиглутатион. У растений, не накапливающих селен и растущих в отсутствие избытка его в среде, он связывается в белковые комплексы. При избытке селена в среде, по мере роста наблюдается накопление свободных растворимых аминокислот, которые менее фитотоксичны, чем неорганические соединения. Наблюдается также образование промежуточных, летучих, метилиро-

ванных соединений селена. Последнее характерно для растений-аккумуляторов этого элемента [7]. Основным проявлением биологической активности селена является его способность заменять серу большей частью в аминокислотах. У крестоцветных селен обычно заменяет серу эфирных масел, у мотыльковых - серу белков, точнее, замещает серу цистеина, цистина и метионина.

В листьях и стеблях растений селен находится в растворимой форме и переходит в водные экстракты; однако в семенах злаков он является составной частью резервных белков и находится в связанном состоянии [8].

Общее содержание селена в растениях зависит от ряда факторов: типа почвы, величины рН, окислительно-восстановительного потенциала, запасов селена в почвах, осадков, температуры и от стадии развития самого растения [6].

Все растения по способности усваивать и накапливать селен делятся на 3 группы.

Первая группа - растения-накопители, содержащие максимальное количество элемента - до 1000-15000 мг/кг сухой массы. К ним относятся виды из рода *Astragalus*, *Oenopsis*, *Xylorrhiza*, *Stanleya*, *Brassica*. Характерно, что степень накопления элемента в указанных растениях была в 1000 раз больше, чем в почвах, на которых они произрастают. Наиболее типичными накопителями селена являются моринда, нептуния, акация. Даже на почвах с низким содержанием селена (0,01 мг/кг) в растениях-индикаторах его может быть до 1000 мг на 1 кг сухой массы; в то же время в клевере или райграсе - в пределах 0,01-0,9 мг/кг.

Вторая группа растений включает отдельные виды из родов *Aster*, *Atriplex*, *Castilleja*, *Grindelia*, *Gutierrezia*. Максимальное накопление селена достигается в них до нескольких сотен мг на кг сухой массы, если его немного в среде обитания растений. При умеренном накоплении элемента обычное среднее содержание селена в биомассе растений в 3-10 раз больше, чем в почве.

Третья группа растений накапливает максимально до 50 мг селена в биомассе, но большинство видов в основном содержат менее 10 мг/кг. Сюда относятся все возделываемые сельскохозяйственные культуры, многие дикие злаки, ряд бобовых растений. Обычное среднее содержание селена в растениях составляет 0,1-1,0 мг/кг даже на почвах, богатых селеном. Минимальное содержание приближается к 0,05 мг/кг, ниже которого отмечается дефицит селена). Вне биохимических селеносных районов среднее содержание данного элемента по странам мира в растениях 3 группы изменяется от 0,06 до 1,0 и в большинстве случаев составляет 0,08-0,20 мг/кг [6].

Различие в поглощении селена отдельными видами растений (например, в 1 и 3 группах) при одном и том же содержании его в почве может быть очень большим. Так, при экстремально высоком содержании селена в почве, в растения *Malvastrum coccineum* его поступало 1 мг/кг, а в *Astragalus rectinatus* - 4000 мг/кг [6].

Однако, несмотря на широкий диапазон концентраций в поступлении селена в растения, зависящее от почвенных условий, связь между общим содержанием элемента в почвах и растениях в полной мере не выявлена. Зависимость между содержанием селена в почве и растениях в незначительной степени установлена только при учете количества селенитов в почве как более стабильных и менее растворимых комплексов. Считается, что это более реальный путь прогнозирования количества доступного селена для пастбищного травостоя. Существует прямая связь между водорастворимыми селенитами почвы, и селенитами, усвояемыми растениями. Отмечено, что при одном и том же содержании в почве селена поступает больше всего в крестоцветные культуры, затем в бобовые и зерновые культуры [7]. При широком разнообразии почв РФ о содержании селена в растениях можно судить только по отдельным. В Тувинской АССР при относительно повышенном содержании селена в почвах в растениях его найдено 0,34-13,1 мг/кг. Низкое содержание обнаружено в природных луговых травах Белорусии - от 0,04 до 0,09 мг/кг. В Иркутской области корма (овес, пшеница, сено, луговые растения, кукуруза, комбикорма) содержат селена от 0,016 до 0,13 мг/кг, в Красноярском крае - от 0,12 до 0,18 мг/кг, корма Белгородской области - от 0,033 до 0,067 мг/кг, травы Читинской области - от 0,008 до 0,22 мг/кг [6].

В целом, результаты отечественных исследований позволяют отметить, что на карбонатных почвах селен в растениях накапливается в достаточном количестве. На дерново-подзолистых почвах, особенно при сильном выщелачивании, селена в травостое растений содержится меньше оптимального уровня.

Поэтому целесообразно вносить селеновые удобрения, также торфогуминовые удобрения, которые влияют не только на концентрацию селена в растениях, но и на величину урожая, что доказано в проведенных исследованиях, в частности, с соей, люцерной, кострцом [9].

Заключение

Анализ научных исследований позволяет сделать вывод о том, что содержание селена в почвах и растениях зависит от условий почвообразования, свойств почв, состава почвообразующих пород, количества подвижной формы элемента, климатических условий, антропогенных факторов, биологических и видовых особенностей растений. На почвах с дефицитом селена для улучшения питания растений, повышения качества продукции и урожайности сельскохозяйственных культур необходимо рациональное применение селеновых микроудобрений. Для потребления человеком селена рекомендуется обогащать продукты питания данным элементом, так, например, это нашло активное внедрение в Алтае [11].

Библиографический список

1. Аристархов А.Н. Оптимизация полиэлементного состава в агроэкосистемах России. Эколого-агрохимическая оценка состояния,

дефицита, резерва, способов и средств управления // М.: Изд-во ВНИИА. 2019 г. 832 с.

2. Виноградов А.П. Геохимия рассеянных и редких элементов в почвах // М.: Изд-во АН СССР, 1957. 237с.

3. Голубкина Н.А. Перспектива использования селена в растениеводстве // Вестн. РАСХН. 2006. № 1. С. 49-55.

4. Ермаков В.В. Биогеохимия селена и его значение в профилактике эндемических заболеваний человека // Вестник отделения наук о земле РАН. 2004. № 1. С. 1–17.

5. Ермаков В.В. Миграция селена в биогеохимических пищевых цепях ландшафтов России // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2008. № 2. С. 3–10

6. Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена // М.:Наука. 1974г. 298с.

7. Ермаков В.В., Прошлякова О.Д., Хабаров В.Б., Гаранина Н.С. Миграция селена в системе: почва-растение в условиях Восточной Мещеры // Материалы 5 биогеохимических чтений «Биогеохимическая индикация аномалий». М., 2004. - С. 38

8. Ermakov V.V. Migracija selena v biogeoхимических pishhevyyh serjakh landshaftov Rossii // Problemy biogeoхимии i geoхимической jekologii. 2008. № 2. S. 3–10.

9. Голов В.И., Самохвалова О.С., Ананьева Э.В., Тимофеев А.Н. Условия накопления микроэлементов и тяжелых металлов основными кормовыми культурами на почвах Амурской области // Вестник КрасГАУ. 2007. № 2. С. 59 – 62.

10. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирский области // Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2001 г. 229 с.

11. Наумова Н.Л. Изучение сохранности эссенциального элемента селена при разработке обогащенного пастеризованного молока // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 9. С. 124-126

12. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Особенности содержания селена в системе почва-растение // Вестник КрасГАУ. 2020. № 11. С 95-102

13. Система мелиоративного земледелия в гумидной зоне Сибири // Красноярск: СибНИИГиМ. 1995 г. 114 с.

14. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири // Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2007. 207 с.

15. Ягодин Б.А. Обеспечение сельскохозяйственного производства микроэлементами // Агрохимия. 2000. № 12. С. 45-52

16. Cabata – Pendias A. Trase Elements in Soilsand Plant. 4th Bosa Raton, FL: CrsPress, 2010. 548 p.

УДК 669.112:539.4:669.539.382

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

**Порфирьев М.А., Юрьев А.А., Кормышев В.Е.,
Шлярова Ю.А., Громов В.Е.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: mporf372@gmail.com*

Методами современного физического материаловедения исследована эволюция структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры рельсовой стали при деформации одноосным сжатием до степени 50%. Выявлена фрагментация перлитных зерен, возрастающая с ростом степени деформации, и пластин цементита, размер фрагментов которого 15-20 нм слабо зависит от степени деформации. Проанализировано изменение скалярной и избыточной плотности дислокаций с увеличением степени деформации.

Ключевые слова: деформация сжатием, рельсовая сталь, структура, дислокационная субструктура.

Одним из способов изменения структуры и свойств материалов, характеризующих сопротивление хрупкому разрушению, является деформационное упрочнение [1]. Как известно, пластическая деформация – это сложный процесс, в результате которого вместе с изменением строения и формы исходного состояния материала меняются его физико-химические и механические свойства. При самых различных видах и режимах пластической деформации в кристаллических материалах с различным типом кристаллической решетки наблюдается фундаментальное явление фрагментации, т.е. деформационное измельчение структуры материалов порядка до 100-200 нм [2, 3].

Всестороннее рассмотрение свойств, характеризующих сопротивление разрушению, показало принципиальную возможность эффективного деформационного упрочнения стали перлитного класса. Знание закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и свойств перлитной стали при пластической деформации необходимо для управления процессом деформационного поведения. Важность информации в этой области определяется глубиной фундаментальных проблем физического материаловедения с одной стороны и практической значимостью проблемы с другой, поскольку рельсы производятся из стали перлитного класса [4-6]. Формирование высоких эксплуатационных свойств рельсов должно базироваться на знании механизмов структурно-фазовых изменений при деформационном воздействии. Выявление таких механизмов возможно лишь при анализе закономерностей эволюции параметров тонкой структуры и оценке вкладов структурных составляющих и дефектной субструктуры в упрочнение рельсов при эксплуатации.

Целью настоящей работы является анализ деформационного упрочнения металла рельсов при деформации одноосным сжатием.

В качестве материала исследования использовали сталь дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350 производства АО

«Евраз ЗСМК», полученных из вакуумированной электростали Э76ХФ в соответствии с требованиями ТУ 0921-276-01124333–2021. Из головки рельсов вырезали прямоугольные образцы размером 5×5×10 мм. Деформацию одноосным сжатием осуществляли при комнатной температуре на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин.

Исследования структуры стали проводили, используя методы оптической микроскопии (микровизор металлографический μ Vizo – MET-221P), сканирующей электронной микроскопии (MIRA3 Tescan), рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр XRD-7000S (Shimadzu, Япония)) и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM 2100F). Анализировали структурно-фазовое состояние стали, подвергнутой деформированию на 15, 30 и 50 %.

Образцы стали Э76ХФ при испытании на сжатие не удалось довести до разрушения, поскольку они сплюснулись из-за того, что исследуемая сталь способна достаточно сильно деформироваться без разрушения. Ранее в работах [7, 8] нами было показано, что деформационное упрочнение исследуемой стали при пластической деформации одноосным сжатием носит многостадийный характер. Деформация стали сопровождается фрагментацией перлитных зерен, усиливающейся по мере увеличения степени деформации и достигающей при $\varepsilon = 50\% \approx 0,4$ объема исследуемой фольги. Фрагменты, формирующиеся в пластинах феррита, разделены малоугловыми границами. Установлено, что средние размеры фрагментов пластин феррита при увеличении степени деформации уменьшаются от 240 нм ($\varepsilon = 15\%$) до 200 нм ($\varepsilon = 50\%$). Выявлена фрагментация пластин цементита. Установлено, что размер фрагментов изменяется в пределах 15-20 нм и слабо зависит от степени деформации стали. Обнаружено разрушение пластин цементита, протекающее путем их растворения и разрезания подвижными дислокациями. Показано, что атомы углерода, перешедшие из кристаллической решетки цементита на дислокации, выносятся в межпластинчатое пространство и формируют частицы третичного цементита, размеры которых составляют 2-4 нм [7].

Выявлено формирование в процессе деформации стали неоднородной дислокационной субструктуры, обусловленное торможением дислокаций частицами цементита. Обнаружено, что увеличение степени деформирования сопровождается снижением скалярной и избыточной плотности дислокаций, что может быть обусловлено уходом дислокации в малоугловые границы, а также их аннигиляцией. Установлено, что источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела зерен и колоний перлита, пластин цементита в зернах перлита, расположенные в объеме пластин феррита частицы второй фазы [8].

Выявленные преобразования структуры стали будут существенным образом сказываться на прочностных и пластических характеристиках металла, определяя, в конечном итоге, срок службы изделия. Выявить закономерности, связывающие параметры структуры и прочностные свойства материала,

вскрыть физическую природу процесса эволюции свойств, позволяют оценки механизмов упрочнения. Оценку механизмов упрочнения осуществляли, используя широко апробированные выражения, приведенные ниже.

Библиографический список

1. Громов В. Е. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В. Е. Громов, Э. В. Козлов, В. И. Базайкин, В. Я. Целлермаер, Ю. Ф. Иванов и др. – М.: недра, 1997. 293 с.

2. Raabe D. Tensile deformation characteristics of bulk ultrafine-grained austenitic stainless steel produced by thermal cycling / D. Raabe, R. Kumar // Scripta Materialia. – 2012. – No. 66. – P. 634-637.

3. Skakov M. K. Influence of heat treatment and deformation on the phase-structural state of steel 30CrMnSiA / M. K. Skakov, G. K. Uazyrkhanova, N. A. Popova, M. Scheffler // Key Engineering Materials. – 2013. – V. 531-532. – P. 13-17.

4. Pan R. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear / R. Pan, R. Ren, C. Chen, X. Zhao // Materials Characterization. – 2017. – V. 132. – P. 397-404.

5. Vinogradov A. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation / A. Vinogradov, Y. Estrin // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 95. – P. 172–242.

6. Ivanisenko Yu. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion / Yu. Ivanisenko, W. Lojkowski, R.Z. Valiev, H.-J. Fecht // Acta Materialia. – 2003. – V. 51. – No. 18. – P. 5555-5570.

7. Иванов Ю. Ф. Эволюция структуры рельсовой стали при сжатии / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, К. В. Аксенова, Р. В. Кузнецов, В. Е. Кормышев, Е. С. Ващук // Деформация и разрушение материалов. – 2022. – № 8. – С. 9-14.

8. Аксенова К. В. Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием / К. В. Аксенова, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, Е. С. Ващук, О. А. Перегудов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2022. – № 10. – С. 43-48.

УДК 519.856

ВЫБОР МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕЙНИТНОЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

**Шевченко Р.А., Сафонов С.О., Лихоузов А.М.,
Долгополов А.Е., Шевченко В.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: i@ra-shevchenko.ru*

Приведено описание математических правил и проблем, связанных с применением полнофакторного эксперимента. Также в статье рассмотрены

различные статистические критерии, используемые для оценки адекватности модели, полученной в результате эксперимента. Выводы показывают, что полнофакторное планирование экспериментов является эффективным инструментом для изучения зависимостей между входными и выходными факторами, а правильная оценка адекватности модели позволяет убедиться в ее точности и применимости для дальнейших исследований.

Ключевые слова: полнофакторное планирование экспериментов, математическая модель, адекватность модели, статистические критерии, математические методы анализа данных, оптимизация химического состава рельсовой бейнитной стали.

Планирование экспериментов является важной методологической задачей во многих областях науки и техники. Целью планирования эксперимента является получение максимальной информации о зависимости между изучаемыми факторами и результирующими значениями. Полнофакторный эксперимент является одним из наиболее распространенных методов планирования эксперимента, позволяющим получить информацию о взаимодействии между факторами.

Полнофакторный эксперимент позволяет исследовать влияние нескольких факторов на конечный результат, таким образом, возможно, провести оптимизацию химического состава стали с учетом всех важных факторов. Это позволяет сократить время и затраты на исследования и эксперименты и получить наиболее эффективный и оптимальный результат. Кроме того, использование полнофакторного эксперимента позволяет получить математическую модель взаимосвязей между различными соотношениями массовой доли химических элементов и конечным результатом. Эта модель может использоваться для прогнозирования оптимальных значений факторов, что может значительно улучшить процесс производства и качество конечных продуктов.

При планировании эксперимента необходимо определить, какие факторы будут изучаться, какие уровни этих факторов будут использоваться, и какие будут проводиться наблюдения. Один из способов планирования эксперимента - полнофакторный эксперимент, который позволяет оценить взаимодействие между факторами. Большое количество исследователей используют данный метод при проведении своих экспериментов [1 - 5].

Для проведения планирования полнофакторного эксперимента используются различные математические методы и правила, включая:

- определение факторов и уровней: перед проведением эксперимента необходимо определить, какие факторы будут изучаться и какие уровни этих факторов будут использоваться. Например, для изучения влияния температуры и времени на качество продукции, температура и время являются факторами, каждый из которых имеет несколько уровней.

- определение матрицы планирования: матрица планирования является таблицей, которая определяет, какие комбинации уровней каждого

фактора будут использоваться в эксперименте. Она должна быть сбалансированной, чтобы обеспечить равновесие между количеством наблюдений, необходимых для оценки каждого фактора, и общим количеством наблюдений, необходимых для оценки взаимодействия между факторами.

– анализ результатов: результаты эксперимента анализируются с использованием статистических методов, таких как анализ дисперсии (ANOVA) и регрессионный анализ, для определения влияния каждого фактора и взаимодействия между факторами на результаты эксперимента.

Входящие данные, полученные в результате полнофакторного эксперимента, должны удовлетворять нескольким статистическим критериям для того, чтобы было возможно провести дальнейший анализ и сделать выводы:

– нормальность распределения. Один из основных критериев, который проверяет, насколько хорошо данные распределены по нормальному закону. Этот критерий может быть проверен с помощью статистических тестов, таких как тест Шапиро-Уилка, тест Колмогорова-Смирнова или тест Андерсона-Дарлинга.

– гомогенность дисперсии. Данные должны иметь одинаковую дисперсию, чтобы можно было сравнивать их между собой. Критерий можно проверить с помощью теста Левена.

– отсутствие выбросов. Выбросы могут значительно исказить результаты эксперимента и привести к неправильным выводам. Этот критерий можно проверить с помощью диаграммы размаха или статистических тестов, таких как тест Граббса.

– независимость переменных. Переменные должны быть независимыми, чтобы можно было установить их влияние на исследуемый процесс. Например, если два фактора сильно коррелируют между собой, то трудно будет определить, какой из них оказывает более существенное влияние. Независимость можно проверить с помощью корреляционного анализа.

Все эти критерии должны быть удовлетворены, чтобы можно было провести дальнейший анализ данных и получить достоверные результаты.

Математическая зависимость, описывающая влияние факторов на результаты эксперимента, выражается в виде уравнения регрессии. В линейном случае оно имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + e,$$

где y - зависимая переменная (результат эксперимента);

x_1, x_2, \dots, x_k - независимые переменные (факторы);

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ - коэффициенты регрессии, которые определяют величину влияния каждого фактора на результат эксперимента;

e - ошибка или случайная составляющая.

Определение коэффициентов регрессии производится с помощью статистических методов, таких как метод наименьших квадратов или метод максимального правдоподобия. После определения коэффициентов регрессии можно использовать уравнение регрессии для прогнозирования результатов эксперимента при изменении значений факторов.

Хотя методика полнофакторного эксперимента является достаточно эффективным инструментом для изучения влияния факторов на результаты эксперимента, у нее также есть свои ограничения и проблемы:

Высокая стоимость проведения эксперимента: для проведения полнофакторного эксперимента требуется провести большое количество экспериментов, что может быть очень дорого и времязатратно.

Неучтенность скрытых факторов: при проведении полнофакторного эксперимента нельзя учесть все возможные факторы, которые могут влиять на результаты эксперимента. Это может привести к тому, что некоторые факторы, которые не были учтены, могут влиять на результаты эксперимента и оказывать влияние на выводы исследования.

Проблемы с интерпретацией результатов: иногда результаты полнофакторного эксперимента могут быть трудны для интерпретации, особенно если факторы оказывают влияние на результаты эксперимента взаимно. Кроме того, могут возникнуть проблемы с установлением причинно-следственных связей между факторами и результатами эксперимента.

Ограниченность числа факторов: в зависимости от числа наблюдений, число факторов, которые могут быть изучены, может быть ограничено. Если число факторов превышает число наблюдений, то может возникнуть проблема мультиколлинеарности.

Проблемы с репрезентативностью выборки: для получения точных и надежных результатов полнофакторного эксперимента необходимо использовать репрезентативную выборку, которая отражает разнообразие факторов в реальном мире. Если выборка не является репрезентативной, то результаты эксперимента могут быть смещены.

Результаты полнофакторного эксперимента могут показывать зависимости между входными и выходными факторами, но не всегда они могут быть точными и отражать реальные зависимости в системе. Это может быть вызвано рядом причин, таких как неучтенность скрытых факторов, проблемы с интерпретацией результатов, ограниченность числа факторов и другие факторы. Поэтому важно проводить полнофакторный эксперимент в сочетании с другими методами и подходами, такими как статистический анализ данных, моделирование и экспертные оценки. Только в таком случае можно получить более точную и объективную оценку влияния факторов на результаты эксперимента.

Существует несколько способов оценки адекватности модели, полученной с помощью полнофакторного эксперимента. Рассмотрим некоторые из них: 1. Анализ остатков. Остатки - это разница между реальными значениями выходных параметров и предсказанными значениями, которые были

получены с помощью модели. Анализ остатков позволяет оценить, насколько точно модель описывает реальные данные. Если остатки распределены случайным образом и не имеют видимых закономерностей или трендов, то можно сделать вывод, что модель является адекватной. Если же остатки имеют систематические отклонения от нуля или закономерности, то это может означать, что модель не описывает реальные данные корректно.

2. Сравнение предсказанных результатов с экспериментальными данными, полученными вне рамок полнофакторного эксперимента. Если модель дает хорошее согласование с реальными данными, то можно сделать вывод о ее адекватности.

3. Статистические метрики. Можно использовать статистические метрики, такие как R-квадрат (коэффициент детерминации), корреляция Пирсона и другие. Однако необходимо помнить, что все эти метрики являются приблизительными и не всегда могут дать точную оценку адекватности модели.

4. Моделирование и валидация. Можно использовать моделирование для проверки адекватности модели. Для этого можно использовать данные, полученные в других экспериментах или из открытых источников. Нужно проверить, насколько точно модель предсказывает результаты на этих данных. Валидация модели может помочь убедиться, что модель работает корректно и точно.

5. Экспертная оценка. Эксперты в области, которая связана с данными, могут оценить, насколько точно модель описывает реальные данные. Это может быть особенно полезно в случаях, когда доступных данных недостаточно для проведения статистических тестов или моделирования.

Вывод: в статье была рассмотрена методика планирования полнофакторных экспериментов и оценки их результатов. Были описаны основные математические правила, используемые при проведении таких экспериментов, а также проблемы, связанные с их реализацией.

Было отмечено, что полнофакторное планирование экспериментов позволяет получить реальные зависимости между входными и выходными факторами и позволяет определить важность каждого фактора влияющего на результат эксперимента.

Для оценки адекватности полученной модели были предложены различные статистические критерии, такие как коэффициент детерминации, средняя ошибка аппроксимации и F-критерий Фишера. Эти критерии позволяют оценить степень соответствия модели экспериментальным данным.

Таким образом, полнофакторное планирование экспериментов является эффективным инструментом для исследования зависимостей между входными и выходными факторами. Кроме того, правильное оценивание адекватности полученной модели позволяет убедиться в ее точности и применимости в дальнейших исследованиях.

Исследование выполнено за счет гранта ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор №.К1420006.

Библиографический список

1. Сафонов С.О. Анализ энергосберегающих технологий выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Новокузнецк: СибГИУ, 2020. - С. 273-276.

2. Фадеев В.С., Сафонов С.О. Изучение влияния (положения, интенсивности) фурмы на параметры реакционной зоны // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. - Новокузнецк: СибГИУ, 2021. - С. 193-196.

3. Shevchenko R.A., Yur'ev A.B., Kozyrev N.A., Mikhno A.R. Investigation of processes in spark gap during contact butt welding of railway rails // Izvestiya Ferrous Metallurgy this link is disabled. - 2022. - № 65 (4). - P. 232-239.

4. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н. Разработка и моделирование технологического процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Лабораторные исследования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2020. - №63 (7). - С. 504-511.

5. Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Оптимизация режима контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2022. - №65 (7). - С. 232-239.

II МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 669-1

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

**Хомутинников В.А., Дерябина Ю.А., Лукин Е.В.,
Фейлер Д.Т., Фейлер С.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: rcnupt@list.ru*

В статье выполнено исследование обогатимости образующихся железосодержащих отходов.

Ключевые слова: железосодержащие отходы, концентрат, хвосты, железо, железная руда, использование полезных ископаемых.

В странах с хорошо развитой экологической культурой объем использования промышленных отходов достигает 90 %, в России этот уровень не превышает 50 %. Только на одном ГОК ежегодно образуется около 200 тысяч тонн отходов обогащения железной руды, а общее количество отходов в хвостохранилище достигает 6 млн. тонн.

В лабораторию комплексной переработки отходов металлургического производства (ЛКПОМП) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» поступило техническое задание провести анализ целесообразности повторного использования отходов (хвостов) обогащения железной руды. Поступивший для исследований материал представлял собой камни бурого цвета фракцией 30-120 мм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Отходы обогащения железной руды

Весь поступивший материал был отправлен на трехстадийное измельчение в щековых дробилках. Конечным продуктом дробления являлся материал фракцией 0-5 мм.

После дробления весь материал был усреднен и поделен на 6 образцов. С каждого образца было отобрано по 15 кг для дальнейшего обогащения на установке сухой магнитной сепарации. Сухую магнитную сепарацию проводили с использованием электромагнита при максимальной силе тока

2 ампера. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты магнитной сепарации

№ пробы	Масса полученного материала, кг		Степень извлечения концентрата, %
	Хвосты	Концентрат	
1	14,879	0,121	0,80
2	14,91	0,090	0,60
3	14,912	0,088	0,59
4	14,904	0,096	0,64
5	14,909	0,091	0,61
6	14,915	0,085	0,57

Материалы, полученные в результате обогащения именованы – хвосты 1-6 и концентрат 1-6, соответствующие номерам проб исходного материала. Для определения химического состава полученных материалов было отобрано 12 проб в количестве 50 грамм для концентрата и 150 грамм для хвостов и измельчены до фракции < 0,16 мм с использованием вибрационного истирателя. Все 12 образцов были переданы в научно-исследовательскую лабораторию СибГИУ для проведения химического анализа на содержание Fe_{общее}, Si, S, P. Дополнительно был проведен рентгенофлуоресцентный анализ с использованием анализатора LANScientific TrueXR (рисунок 2). Химический состав полученных материалов представлен в таблице 2.



Рисунок 2 – Рентгенофлуоресцентный анализатор LANScientific TrueXR

Таблица 2 – Химический состав полученных в ходе обогащения материалов

Наименование материала	Fe _{общее}		Si	P	S	Cr	Mn	Ti
	TrueX R	Лаборатория	TrueX R	TrueX R	TrueX R	TrueX R	TrueX R	TrueX R
Концентрат 1	89,128	56,08	10,583	0,142	0,045	0,007	0,005	-
Концентрат 2	91,875	63,89	7,854	0,157	0,017	0,009	0,079	-
Концентрат 3	92,638	65,42	7,069	0,16	0,027	-	0,096	-
Концентрат 4	95,25	62,8	4,485	0,161	0,039	-	0,047	-
Концентрат 5	97,292	65,53	2,511	0,075	0,018	-	0,087	-
Концентрат 6	96,247	62,53	3,461	0,115	0,017	-	0,149	-
Хвосты 1	85,128	45,39	14,458	0,179	0,015	0,154	0,055	-
Хвосты 2	87,546	43,2	11,842	0,153	0,028	0,038	0,165	0,218
Хвосты 3	84,391	43,53	14,613	0,198	0,038	0,111	0,124	0,409
Хвосты 4	83,085	38,72	16,426	0,15	0,036	-	0,08	0,148
Хвосты 5	87,043	44,89	12,642	0,157	0,04	-	0,065	-
Хвосты 6	86,149	45,38	13,413	0,141	0,028	-	0,053	0,147

На основании полученных результатов химического и флуоресцентного анализов содержания железа в продуктах обогащения железосодержащих отходов построены зависимости (рисунок 3) для дальнейшего определения содержания общего железа по показаниям рентгенофлуоресцентного анализатора расчетным путем.

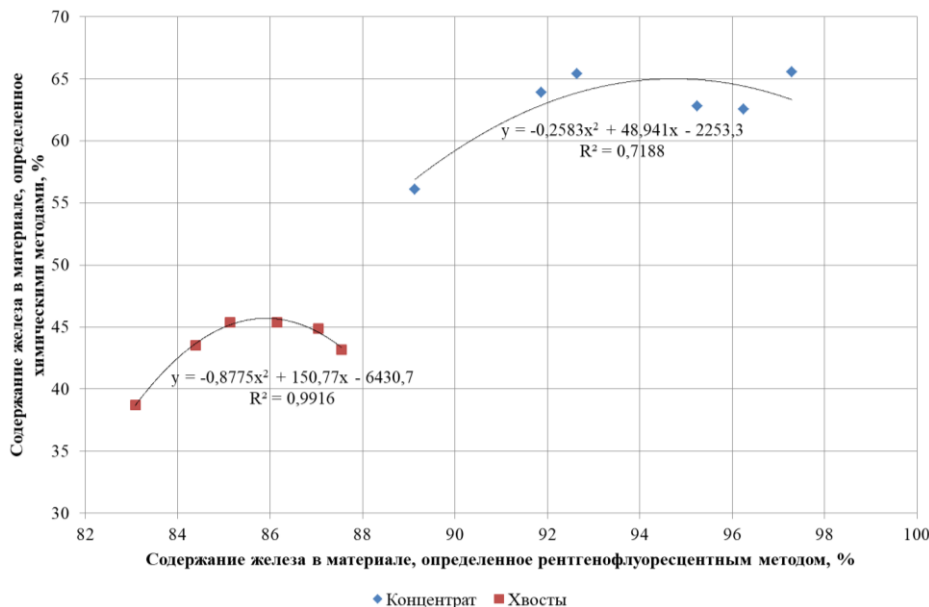


Рисунок 3 – Зависимость содержания железа в материале, определенного химическими методами от определенного рентгенофлуоресцентным методом

Выводы: Из таблицы 2 видно, что все полученные концентраты за исключением концентрата 1, соответствуют требованиям, предъявляемым к железорудным концентратам для металлургического передела по содержанию общего железа ($Fe_{общее} \geq 60\%$) [1-3], содержание $Fe_{общее}$ в хвостах находится на высоком уровне и целесообразно провести дополнительные исследования для повышения степени извлечения железа с более тонки помолом материала и использованием для обогащения установку сухой магнитной сепарации на постоянных магнитах.

Исследование выполнено при поддержке Правительства Кемеровской области – Кузбасса (Постановление №632 от 19 сентября 2022 г.).

Библиографический список

1. Голик В.И. Природоохранные технологии управления состоянием массива на геомеханической основе [Текст] / В.И. Голик, В.И. Комащенко. - М.: КДУ. - 2010. - 555 с.
2. Голик В.И. Повышение экологической безопасности утилизацией отходов горного производства [Текст] / В.И. Голик, И.Д. Алборов, Т.Ф. Цгоев. - Владикавказ: ИПО СОИГСИ. - 2010. - 217 с.
3. Голикин, Н.И. Железные руды КМА [Текст]: Монография / Н.И. Голикин, Н.Д. Кононов, В.П. Орлов [и др.]. - М.: Геоинформмарк, 2001. – 615 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Сафонов С.О., Шевченко Р.А., Долгополов А.Е.,
Лихоузов А.М., Наумченко Д.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru*

Проведены экспериментальные плавки бейнитной рельсовой стали в печи типа УИ-35П. В ходе плавки определялись наиболее эффективные технологические приемы ведения плавки в индукционной печи. Определялся фактический угар ферросплавов в зависимости от способа подачи.

Ключевые слова: Флюсы, окисление, ферросплавы, легирование, рафинирование, дегазация.

С повышением эффективности грузопассажирских перевозок повышается требования к качеству рельсовой стали. Данное повышение требований приводит к ужесточению условий обслуживания железнодорожного полотна, которое в свою очередь приводит к необходимости улучшения качества рельс. Рельсы чаще всего подвергаются дефектам контактно-усталостного происхождения, смятию, износу, термомеханическим повреждениям.

В связи с этим, вопрос выбора химического состава в целях достижения требуемых механических и технологических свойств рельсов из бейнитной стали является актуальным и приобретает особо важное значение.

Выплавка бейнитной стали проводилась в индукционной транзисторной печи. Индукционные печи позволяют получить металл высокого качества без внесения дополнительных примесей.



Рисунок 1 – Общий вид установки УИ-35П

В ходе экспериментов применялись шихтовые материалы данного химического состава (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав шихтовых материалов

Материал	C	Si	Mn	P	S	Fe	Cr	V	Mo	Al
Лом	0,3	0,17	0,538	0,025	0,037	98,93	-	-	-	-
Ферромарганец	0,1	4,295	83,314	0,08	0,045	10,082	1,804	0,28	-	-
Технический кремний	-	97,199	0,197	0,1	0,01	1,664	0,022	0,05	-	-
Феррохром	-	0,18	-	0,026	0,12	32,074	67,4	-	-	0,2
Феррованадий	-	4,816	2,624	0,07	0,02	9,733	0,3	73,831	0,5	8,1
Ферромolibден	-	0,792	1,312	0,131	0,015	48,263	0,487	-	36	13

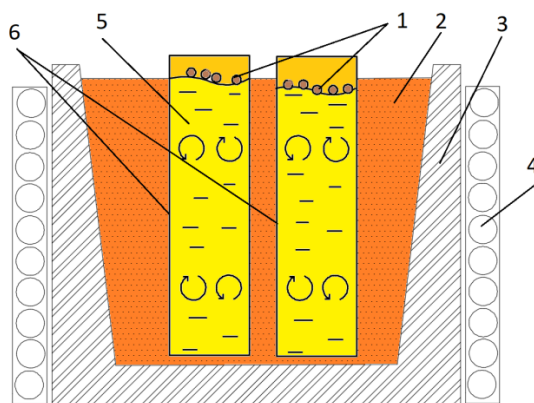
Технология выплавки

Металлический лом загружался в алундовые тигли вместе с плавиковым шпатом (ФК-75) и науглероживателем графитом. По загрузке металлолома включается постепенный нагрев с целью равномерного теплораспределения между шихтой и тиглями. Продолжительность прогрева 60 мин, далее печь работает на полную мощность. По расплавлению загруженного лома производится подвалка (рисунок 2).



Рисунок 2 – Шихтовка плавки и подвалка металлического лома

Когда весь металлический лом расплавлен, проводится окислительный период с целью дегазации расплава. Окислителем выступал окомкованный шлак конвертерного производства фракцией 3мм. Продолжительность периода 5 мин. В ходе окислительного периода полностью окисляется кремний, марганец окисляется на 75 %, углерод окисляется на заданные 0,3 % от содержания в исходной шихте. Перемешивание металлической ванны происходит за счет электромагнитной индукции и реакций окисления углерода. Восстановительный период начинался с диффузионного раскисления шлака ферросилицием и повторной добавки плавикового шпата.



1 - шламовые окатыши, 2 – кварцевый песок, 3 – магнетитовый тигель,
4 – индуктор, 5 – железоуглеродистый расплав, 6 – алундовые тигли

Рисунок 3 – Схема выплавки бейнитной стали в индукционной печи

После полного раскисления шлака вводятся добавки графита, ферромарганца, технического кремния, феррохрома, ферромolibдена и феррованадия. Материальный баланс плавки приведен на таблице 2. По окончании восстановительного периода, печь выключается, и металл кристаллизуется в тигле.

Таблица 2 – Материальный баланс индукционной плавки

Поступило	г	Получено	г
Металлический лом	455,70	Жидкий металл	439,62
Плавиковый шпат	5,00	Шлак	38,79
Конвертерный шлак	10,00	Газы	9,11
Науглероживатель	1,00	Угар раскислителей	0,92
Раскислители внесли	16,74		
Всего	488,44	Всего	488,44

Результатом плавки был получен слиток (рисунок 4) данного химического состава (таблица 3).



Рисунок 4 – Слиток бейнитной стали

Таблица 4 – Химический состав слитка бейнитной стали

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
Количество, %	0,270	1,382	1,467	0,394	0,208	0,04	0,023	0,024

Особенности выплавки бейнитной стали в индукционной печи в тигле заключаются в том, что плавку можно вести как с окислительным, так и без окислительного периода. Если плавка ведется без окислительного периода ферросплавы с флюсами загружаются под металлический лом. При выплавке в алундовом тигле нагрев необходимо производить медленно, а при кристаллизации тигель всегда будет деформироваться и разрушаться, поэтому необходимо засыпать огнеупорную массу вокруг тигля, чтобы избежать протечек расплава.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор №.К1420006.

Библиографический список

1. Электрометаллургия и металлургия стали: учебник / В.Е. Рошин, А.В. Рошин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021.- 576 с.
2. Влияние разжижителей шлака на эффективность металлургического процесса получения марганца / А.О. Лопатина, Н.И. Дида, Д.Н. Савичева, Г.Э. Тархнишвили // Научно-исследовательские публикации. 2022. №6. С. 61-66.

УДК 666.9.031

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Фейлер Д.Т., Хомутильников В.А., Фейлер С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: Feyler_dt@sibsiu.ru*

Теплоизолирующие смеси используются в черной металлургии для предотвращения тепловых потерь с поверхности жидких чугуна или стали и защиты от вторичного окисления при транспортировке и выдержке металлического расплава. В работе выполнен анализ современного состояния производства и потребления теплоизолирующих смесей для черной металлургии.

Ключевые слова: теплоизолирующие смеси, сталь, чугун, расплав, тепловые потери.

Теплоизолирующие смеси (ТИС) применяются в черной металлургии для защиты поверхности металлического расплава (чугуна, стали) при его

выдержке, обработке, транспортировке от тепловых потерь и взаимодействия с атмосферой.

Теплоизолирующие смеси можно классифицировать по нескольким параметрам:

- место применения: заливочный ковш, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, кристаллизатор, изложницы;
- вид основного исходного сырья: органические (зола рисовой лузги, лузга зерновых культур), минеральные (диатомит, вермикулит, перлит, известь, боксит и др.), смешанные;
- фракционный состав (порошкообразная, гранулированная и др.).

К определяющим условиям использования теплоизолирующих смесей, кроме снижения тепловых потерь от излучения и конвекции с поверхности металлического расплава относится и химическая нейтральность к металлическому расплаву и огнеупорной футеровке.

В период 2013-2019 гг. потребление теплоизолирующих смесей металлургическими предприятиями РФ постепенно возрастало (рисунок 1) одновременно с увеличением объемов производства стали в РФ, что является главным фактором, оказывающим влияние на рынок теплоизолирующих смесей. В 2020 году объем рынка теплоизолирующих смесей составил 63,6 тыс. т, что выше на 6,4 % уровня 2019 года, в 2021 году рост объемов рынка составил еще 1,0 % г/г и достиг 64,2 тыс. т. Сложившаяся ситуация в стране и мире на фоне пандемии COVID-19 спровоцировала ценовые изменения, в результате чего произошла корректировка конфигурации спроса и предложения.

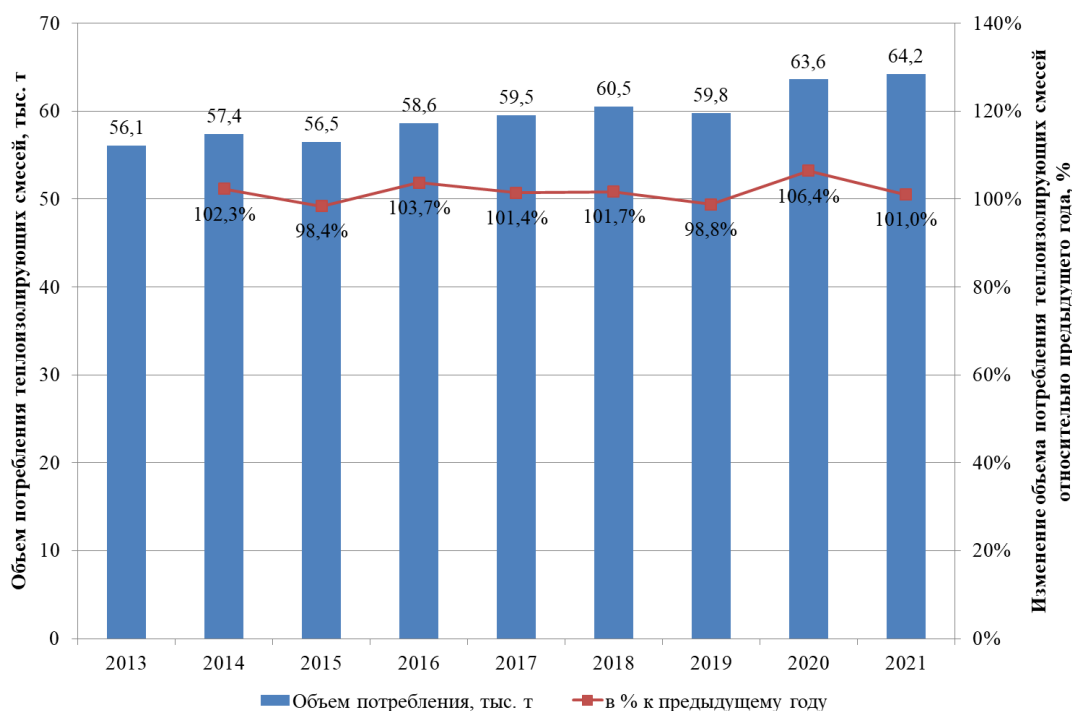


Рисунок 1 – Объем потребления теплоизолирующих смесей в 2013-2021 гг.

По большей части металлургическими предприятиями РФ применяются теплоизолирующие смеси отечественного производства, в 2021 г. доля отечественных производителей ТИС составила 70,7 %. Экспорт ТИС в 2021 г. составил 1600 т, что составляет 3,4 % от всего объема выпущенной продукции. Основной страной-получателем российского экспорта является Казахстан, на его долю в 2021 г. пришлось более 98 % российского экспорта.

Основными потребителями теплоизолирующих смесей в России являются крупные металлургические предприятия, поэтому объем потребления теплоизолирующих смесей определяется количеством произведенного чугуна и стали в конкретном федеральном округе. В 2021 году основной объем потребления теплоизолирующих смесей в РФ пришелся на Уральский (34,8 %) и Центральный (25,9 %) федеральные округа. На третьем месте расположился Северо-Западный федеральный округ (15,6 %). Текущая структура формируется во многом за счет потребностей этих трёх федеральных округов, поскольку на них приходится значительная часть производимого чугуна и стали в России, в том числе на таких крупных предприятиях как Новолипецкий металлургический комбинат, Магнитогорский металлургический комбинат и Северсталь.

На российском рынке теплоизолирующих смесей с 2013 года наблюдается отрицательный баланс производства и потребления, рассчитанный как разница объемов производства и потребления продукции в РФ. Максимальный баланс производства и потребления зафиксирован в 2021 году (-17,2 тыс. т), минимальный в 2013 году (-31,6 тыс. т). Существующее распределение сохранится в будущем периоде – на протяжении всего горизонта прогнозирования до 2025 г. ожидается отрицательный баланс производства и потребления теплоизолирующих смесей в РФ.

В период 2013-2021 гг. наблюдался постепенный рост объемов производства теплоизолирующих смесей отечественными производителями на фоне падения курса рубля по отношению к иностранным валютам, снижением привлекательности импортной продукции и развитием политики импортозамещения. В 2020 году на фоне неблагоприятной эпидемиологической ситуации в стране и мире и стагнации показателей в черной металлургии производство теплоизолирующих смесей имело обратную динамику – увеличение на 3,5% г/г до 44,0 тыс. т. В условиях высокой экономической неопределенности, стагнации выплавки стали и чугуна в 2020 году, и одновременного роста цен импортной продукции, производители теплоизолирующих смесей в течение года не сокращали объемы выпуска, излишки «оседали» на складах в целях избежать дефицита и задержек поставок на металлургические предприятия и оперативно реагировать на рыночные изменения.

В период 2013-2018 гг. лидером по производству теплоизолирующих смесей в России был Уральский федеральный округ, однако после 2018 года Центральный федеральный округ вышел на первое место по объему производства теплоизолирующих смесей. В 2021 году доля Центрального федерального округа в общем объеме производства составила 45,0 %; на втором

месте с небольшим отставанием располагается Уральский федеральный округ, доля которого в 2021 году составила 40,0 %; на третьем месте располагается Северо-Западный федеральный округ (7 %).

Структура производства теплоизолирующих смесей по федеральным округам отображает региональный характер его размещения. Так, наибольшая доля в производстве приходится на округа, которые в наибольшей степени нуждаются в металлургических смесях.

В настоящее время уровень консолидации производителей на рынке теплоизолирующих смесей оценивается как высокий: 4 крупнейших производителя занимают порядка 70 % общероссийского производства теплоизолирующих смесей. Среди основных производителей теплоизолирующих смесей в России можно выделить следующие предприятия: ООО «Евротехмет» с долей в производстве 30,0 %, ЗАО «Барамист-Урал» (15,0 %), ООО «Шлаксервис» (15,0 %), ООО «Корад» (10,0 %). Основной специализацией данных компаний является производство огнеупоров, шлакообразующих и теплоизолирующих смесей для металлургии. Ключевая особенность российского производства теплоизолирующих смесей заключается в сосредоточении значительного количества региональных производителей вблизи основных металлургических баз, что обусловлено тем, что одним из основных факторов, влияющих на стоимость теплоизолирующих смесей, является их транспортировка.

В период 2013-2021 гг. объем импортных поставок теплоизолирующих смесей показывал спад, что было обусловлено значительным ростом курса доллара. Стоит отметить, что импортная продукция составляет 29,3% от общего объема потребления теплоизолирующих смесей в России. В 2021 году объем импортных поставок составил 18,8 тыс. т, в целом, на рынке прослеживается тенденция постепенного снижения импортных поставок, что обусловлено высокой стоимостью зарубежной продукции, ввозимой из Германии и Италии, стоимостью её транспортировки и тем, что российские предприятия постепенно увеличивают обеспеченность спроса на внутреннем рынке.

По итогам 2020 года основной объем импорта теплоизолирующих смесей в натуральном выражении пришелся на Германию (32,5 %). На втором месте идет Китай (23,4 %). На третьем месте располагается Италия (18,5 %).

В 2021 году наибольший объем импортных поставок в натуральном выражении пришелся на ПАО «НЛМК» (22,4 %). На втором месте расположился ПАО «Северсталь» (21,8 %). На третьем месте ООО «Калдерис» (12,1 %).

В период 2013-2015 гг. объем экспортных поставок значительно увеличился на фоне девальвации рубля, развития отечественного производства теплоизолирующих смесей и повышения привлекательности российской продукции на зарубежных рынках (в частности, со стороны Казахстана).

Максимальный объем экспорта был зафиксирован в 2019 г. – 2,7 тыс. т (6,3 % от общего объема производства). Низкая экспортоориентированность

российских производителей объясняется необходимостью конкурировать с крупными производителями с достаточным опытом производства теплоизолирующих смесей, таких как Imerys, Vesuvius, Prosimet, а также демпингом со стороны индийских производителей.

В 2021 году за рубеж было экспортировано 1,6 тыс. т теплоизолирующих смесей. Основной страной-получателем российского экспорта в 2021 году являлся Казахстан – более 99 % от общего объема в натуральном выражении.

Выводы: В общем можно отметить, что рынок теплоизолирующих смесей в России находится на начальном этапе развития, отрицательный баланс производства и потребления теплоизолирующих смесей свидетельствует о значительной емкости рынка и необходимости проводить исследования и разработки новых химических и компонентных составов смесей с увеличением объема внутреннего производства. Сложившаяся геополитическая обстановка и введение санкций против России привели к перераспределению импорта по странам, фактически прекратились поставки из европейских стран и их замена возможна либо за счет увеличения внутреннего производства, либо за счет увеличения импорта из азиатских стран.

Исследование выполнено при поддержке Правительства Кемеровской области – Кузбасса (Постановление №632 от 19 сентября 2022 г.).

Библиографический список

1. Евразийская экономическая комиссия [электронная база данных] (<http://www.eurasiancommission.org/ru/Pages/default.aspx>).
2. Единая Межведомственная Информационно-Статистическая Система [электронная база данных] (<http://fedstat.ru/indicators/start.do>).
3. Единая Товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности Таможенного союза [электронная база данных] (<http://www.tks.ru/db/tnved>).
4. Министерство экономического развития РФ [электронный источник] (<http://economy.gov.ru/minec/documents/vostrebdocs>).
5. Министерство промышленности и торговли РФ [электронный источник] (<http://minpromtorg.gov.ru/>).

УДК 669.18.046.546

ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ СТАЛИ В СОВРЕМЕННОМ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Преснякова Н.В., Пресняков Н.И., Дмитриенко В.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: dmvliv@gmail.com*

В статье сделана попытка представить наиболее распространенные способы внепечной обработки чугуна, показать их рафинирующие способности и резервы. Значительное внимание уделено также новым процессам,

отличающимся повышенными технико- экономическими показателями. Обсуждены некоторые металлургические аспекты этих процессов.

Ключевые слова: десульфурация, сера, сталь.

Десульфурация – (от де... и латинского sulphur – сера), обессеривание – физико-химические процессы, способствующие удалению S из расплавленного металла (например, чугуна, стали).

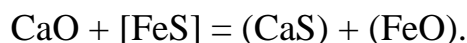
При отвердевании стали в результате избирательной кристаллизации сера, растворенная в расплавленном металле, концентрируется в остающейся жидкости. Обладая очень малой растворимостью в железе, сера выделяется на границах зёрен металла в виде легкоплавких соединений в смеси с оксидами железа. Сталь с повышенным содержанием серы становится красноломкой – хрупкой при температурах горячей обработки (800-1000°C) а в холодном состоянии сталь имеет низкую механическую прочность.

В мировой металлургической практике однозначно решен вопрос о необходимости внепечной обработки чугуна, который является основной шихтой составляющей частью сталеплавильного производства. Повышение качества передельного чугуна позволяет стабилизировать процесс выплавки стали, снизить энергетические и материальные затраты плавильной переработки, улучшить экологию.

Существенное улучшение качества передельного чугуна и доведение его характеристик до уровня, соответствующего требованиям сталеплавильного производства, достигается внепечными процессами десульфурации, деформации и десиликонизации. Особенно эффективно применение методов внепечной десульфурации чугуна, так как повышение его качества сочетается с ростом производительности печей, которые освобождаются от энерго- и материалоемкой операции удаления серы из металлической в шлаковую фазу.

В странах с развитой металлургией все большее распространение получает технология доменной плавки с пониженной основностью шлаков, при которой обеспечивается повышение производительность печей, снижение расхода кокса, уменьшение выхода шлака. При такой технологии с плавильного агрегата снимаются ограничения по содержанию серы в чугуне, удаление серы в соответствии с требованиями осуществляется при внепечной обработке.

На многих металлургических заводах в качестве основного компонента десульфураторной смеси широко используется известь, которая является легкодоступным и достаточно эффективным десульфуратором, хотя для получения хороших результатов к ней предъявляются жесткие требования по чистоте и крупности помола. Реакция десульфурации жидкого железа с помощью извести имеет следующий вид:



Основная трудность такого метода в том, что известь - неплавящийся реагент, что приводит к неудовлетворительному ее смешиванию с чугуном.

Следовательно, при использовании CaO требуются специальные мероприятия по улучшению контакта десульфуратора и металла (использование вращающихся печей, виброковшей, мешалок, подача CaO в струе газа). Обессеривание чугуна (0,15 % S) известью (12 кг/т) в 12-ти тонном ковше путем продувки его азотом (3 м³/мин) около пяти минут (при концентрации извести в струе 9 кг/м³) позволило получить степень десульфурации 50-75 %. С увеличением концентрации извести в газе с 10 до 40 кг/м³ скорость удаления серы, усвоение извести и степень десульфурации повышается. Динамику десульфурации чугуна в этих условиях можно рассчитать по следующей формуле:

$$S_x = 0,005 + 4,05 \cdot (S_n / 2,2 \cdot q) + 0,23 \cdot S_{изв}$$

где S_n - начальная массовая доля серы в чугуне, %;

q - расход извести, кг/т;

$S_{изв}$ - содержание серы в извести, массовая доля, %.

Повышение эффективности десульфурации чугуна в открытых ковшах (74,5 т) при расходе извести (7,6 кг/т), достигается путем ввода в расплав чушкового алюминия (0,4 кг/т). Ввод алюминия в чугун в количестве 0,5- 0,75 кг/т чугуна позволил увеличить степень десульфурации в 2,75 раз по сравнению с вводом извести в струе воздуха и снизить расход извести на единицу удаленной серы в 1,7 раз.

Такие условия обеспечили получение чугуна с содержанием серы ниже 0,01 %. Одновременно применение извести сопряжено с рядом проблем - необходимость постоянного контроля за используемой известью (тонина помола и чистота); высокий расход извести (20-28 кг/т чугуна).

Следует отметить, что способ десульфурации чугуна известью, несмотря на дешевизну и широкое распространение реагента, обладает целым рядом недостатков:

- содержание серы в извести должно быть низким (- 0,007 %);
- необходим помол извести до определенной фракции с исключением пыли;
- для подачи извести пневмотранспортом необходима добавка в нее поверхностно активных веществ или использование гранулированной извести;
- известь следует применять свежееобожженной, так как при наличии влаги в атмосфере она гидратирует;
- известковая пыль при попадании в организм человека вызывает раздражение слизистых оболочек, поэтому при ее применении требуется тщательная очистка отходящих газов.

Десульфурация содой практически заканчивается в момент сильного образования дыма, означающего заметное восстановление натрия. В Ольсен в лабораторных условиях показал, что добавление к соде извести существенно повышает эффективность процесса десульфурации. Было установлено, что десульфурация чугуна содой происходит тем лучше, чем ниже его температура. Сода плавится при температуре 852 °С и затем восстанавливается до

металлического натрия, температура кипения которого 880 °С.

Лабораторными исследованиями эффективности десульфурации чугуна инжектированием в него соды установлено, что содержание серы может быть снижено до 0,005 % но в то же время снижается и содержание кремния в чугуне с 1,3 до 0,78 %. Степень десульфурации при использовании карбоната натрия достигала 30 %, а расход соды на единицу удаленной серы составил примерно 10 кг/кг серы.

Производство высококачественной стали с содержанием серы не более 0,005%, требует десульфурации чугуна и стали на соответствующих технологических стадиях. Обеспечение чистой шихтой составляет 50% от ее потребности. Известно, что термодинамические условия для удаления серы из чугуна более благоприятны, чем при удалении серы, так как при увеличении содержания углерода в металле коэффициент активности серы увеличивается. В связи, с этим, для решения проблем с серой, принимается решение о строительстве установки десульфурации чугуна. Из предложенных вариантов дисульфурации чугуна выбирается способ с использованием магния [4]. Магний имеет следующие преимущества: небольшой расход реагента и масса образующегося шлага; небольшие потери температуры чугуна; незначительные потери чугуна при скачивании шлага; высокая стабильность результатов. Для обеспечения ритмичности работы цеха необходима небольшая длительность обработки чугуна на агрегате внедоменного рафинирования чугуна. Так как на ОА «ЕВРАЗ ЗСМК» ККЦ-2 используют большегрузные чугуновозные ковши, поэтому для сокращения времени продувки необходимо использовать продувку через две продувочные фурмы. Так же для сокращения времени обработки чугуна необходимым интенсивный способ скачивания шлага.

Продувка чугуна осуществляется в 350- тонных чугуновозных ковшах. Масса обрабатываемого чугуна составляет 250-320 тонн, в зависимости от шихтовки плавки. На поверхность чугуна, добавляют смесь извести и плавикового шпата при одновременном перемешивании чугуна азотом. Вводят магнийсодержащую порошковую проволоку, содержащую в качестве наполнителя гранулированный магний (100 %) или смесь гранул магния (70 %) и кальция (30 %). Удельный расход магния составляет 0,7-1,03 кг. Проволоку вводят в расплав со скоростью от 90 до 100 м/мин. Степень десульфурации чугуна 68-71 %. После ввода проволоки производят «магкую» (с пониженным расходом азота) продувку для флотации оставшихся в чугуне включений сульфида магния. Для гарантированного получения конечного содержания серы, равного $0,015 \leq 0,010$ и $\leq 0,005$ %, при исходном количестве серы в жидком чугуне 0,020 % расход наполнителя порошковой проволоки (Mg или 70 %Mg + 30 % Ca) должен составлять соответственно 0,4; 0,75 и 1,0 кг/т чугуна.

Внепечная обработка стали, разливаемой непрерывным способом в ККЦ-2 производится последовательно на установках УДМ, агрегате «ковш-печь» и циркуляционном вакууматоре.

Для проведения десульфурации металла и предотвращения восстановления фосфора из шлака в металл, в ковше должен быть наведен высокоосновный жидкоподвижный шлак. Рекомендуемое содержание закиси железа (FeO) в шлаке в конце обработки не должно превышать 1 % . После получения химического анализа первой пробы металла добавляются легирующие элементы в необходимом количестве и через 5-7 минут после ввода последней порции ферросплавов и легирующих, отбирается проба металла. После получения химического анализа второй пробы производится корректировка химического состава металла с добавлением необходимого количества раскислителей и легирующих элементов с последующей продувкой металла аргоном не менее трех минут.

Библиографический список

1. Воронова Н.Л. Десульфурация чугуна магнием / Н.Л.Воронова. - М.: Металлургия, 1980. — 239с.
2. Шевченко А.Ф. Сопоставление эффективности способов десульфурации чугуна/А.Ф. Шевченко, Б.В. Двоскин, А.С. Вергун.-Сталь, 2000. -14 с.
3. Крупенников С.Л. Определение оптимальной скорости ввода порошковой проволоки с магнием при десульфурации чугуна / С.Л. Крупенников, Ю.П. Филимонов, Е.Ф. Мазуров, А.Г. Кузьменко. — Сталь, 2000. - 8с.
4. Поляков В.В. Ресурсосбережение в металлургии / В.В. Поляков - М.: Машиностроение, 1993. - 142с.
5. Дюкин Д.А. Производство стали. Том 2. Внепечная обработка жидкого чугуна / Д.А Дюкин, В.В. Кисиленко. — М.: Теплотехник, 2008. - 400с.
6. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали: Учебник для вузов / Д.Я. Поволоцкий, В.А. Кудрин, А.Ф. Вишкарев. – М.: МИСИС, 1995. – 256 с.
7. Величко А.Г. Внепечная обработка стали / А.Г. Величко. - Днепропетровск: «Системные технологии», 2005. – 199 с.

УДК 669.168

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОСПЛАВНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

Закурдаев Н.В., Новиков А.Ю., Дмитриенко В.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: dmvliv@gmail.com*

В данной работе рассматривается возможность применения вторичных энергоресурсов, а именно ферросплавного газа, образующегося в качестве побочного продукта от производства ферросилиция в печах закрытого типа на предприятии АО "Кузнецкие ферросплавы". Основное внимание уделено технологии сушки футеровки ковшей при помощи стенов для сушки ковшей, оборудованных газовыми горелками, работающими на ферросплавном

газе. В работе рассматривается возможность реализации данной технологии на основе опыта зарубежных предприятий.

В результате проведенного анализа выявлены положительные аспекты и рассчитан минимальный экономический эффект внедрения новой технологии в условиях предприятия АО "Кузнецкие ферросплавы".

Цель и задачи работы

В данной работе рассматривается перспектива использования ферросплавного газа в качестве топлива. В закрытой печи количество газов, образующихся в зоне реакции, определяется видом выплавляемого сплава, энергетическим режимом работы печи, а также ее габаритами, и составляет примерно 100 – 270 м³/ч из расчета на 1 МВт мощности. Газы закрытых печей в связи с их высокой теплотой сгорания (8 – 10 МДж/м³) можно использовать в качестве топлива или подать на дожигание на свечу, предварительно очистив от пыли.

В условиях производственного процесса АО "Кузнецкие ферросплавы" наиболее эффективным будет использование ферросплавного газа в качестве топлива для сушки ковшей на УРК (участке ремонта ковшей). Для этого необходимо установить дополнительное оборудование - стенды для сушки ковшей. Данная технология позволит полностью отказаться от применения дизельного топлива, что приведет к сокращению финансовых расходов и к уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Описание существующей на предприятии проблемы

На данный момент на территории АО "Кузнецкие ферросплавы" установлены три печи закрытого типа, оборудованные мокрой газоочисткой. В результате работы печей образуется ферросплавный газ - побочный продукт выплавки ферросилиция.

Ферросплавный газ может использоваться в качестве вторичного энергоресурса для обогрева помещений в холодное время года, выработки электроэнергии, сушки и обжига футеровки ковшей после ремонта, прокалки или сушки шихтовых материалов.

Технология, используемая в настоящее время на предприятии, не предусматривает использование вторичных энергоресурсов. Например, для сушки футеровки ковшей используется дизельное топливо.

Существующие методы устранения проблемы. Опыт использования ферросплавного газа на Аксуском заводе ферросплавов

На Аксуском заводе ферросплавов – филиале АО «ТНК «Казхром», в составе Евразийской Группы (ERG), реализован инвестиционный проект – расширение газомазутной котельной теплосилового цеха. Его воплощение позволит предприятию на 460 тонн сократить объем газопылевых выбросов, снизив при этом на 20 тысяч тонн расход угля и на 500 тонн потребление мазута. Ежегодная экономия в ходе отопительного сезона составит в среднем 140 миллионов тенге (25 миллионов рублей).

Поэтапная модернизация на газомазутной котельной (ГМК) началась еще в 2012 году. За это время согласно разработанному проекту в здании

бывшей газоповысительной станции сделали ремонт, закупили и установили два современных котлоагрегата мощностью 25 тонн пара в час и обеспечили высокую степень автоматизации нового производственного объекта. Теперь энергетики Аксуского завода ферросплавов на эффективную работу ГМК возлагают большие надежды, так как другое подразделение теплосилового цеха, РОК-2, уже с трудом справляется с теплоснабжением растущего моногорода. Таким образом, специалисты предприятия и обеспечили хороший резерв, и увеличили объемы использования ферросплавного газа – побочного продукта металлургического производства, образующегося в плавильных печах.

Ежегодно на предприятии образуется порядка 600 миллионов кубометров ферросплавного газа. Для получения тепловой энергии на котельной и производства агломерата в агломерационном цехе сегодня используется лишь половина этого объема. Поскольку технологии накопления и хранения такого газа пока нет, оставшееся количество непродуктивно сжигается на специальных свечах дожига. И чтобы не терять ценное «зеленое» топливо современные предприятия продолжают искать варианты его эффективного использования. Один из них – газомазутная котельная, другой – создание системы подогрева сырья для ферросплавных печей, и третий – перспективный проект установки современных котлоагрегатов.

Внедрение на заводе современных технологий вторичного использования энергоресурсов выгодно не только с экономической точки зрения. Поэтапное сокращение количества попадающих в окружающую среду веществ – главная задача природоохранной программы предприятия. Достижения Аксуского завода ферросплавов в этом направлении уже были отмечены в 2014 и 2016 годах победами в номинациях «Лучшее решение года в области энергосбережения» престижной национальной отраслевой премии «Золотой Гефест».

Для Аксуского завода ферросплавов — филиала АО ТНК «Казхром» (Павлодарская область, Казахстан) ОАО «ВНИИМТ» разработало, изготовило, поставило и выполнило наладку двух стандов сушки футеровки разливочных ковшей. В качестве топлива использовали ферросплавный газ.

Предлагаемые мероприятия по решению проблемы

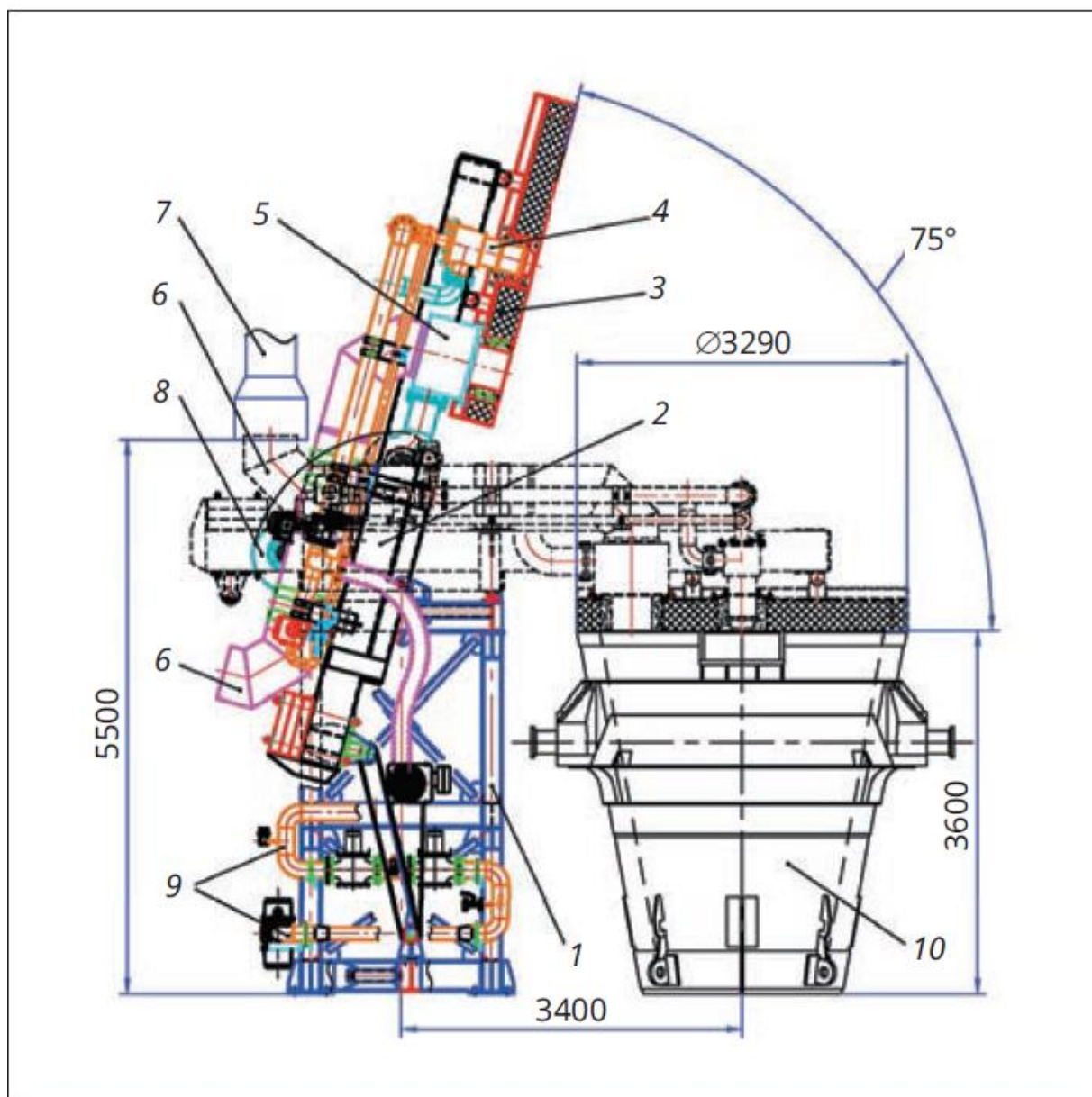
В настоящей работе рассматривается использование ферросплавного газа в качестве топлива совместно со стандом сушки ковшей. В условиях производственного процесса АО "Кузнецкие ферросплавы" можно использовать технологию, разработанную ОАО "ВНИИМТ".

Для реализации проекта потребуется проложить газопровод от свечей дожига до участка ремонта ковшей и установить станды для сушки ковшей, работающие на ферросплавном газе. Ниже описаны устройство и принцип работы стандов. За основу взяты существующие станды для сушки 70-тонных ковшей. В условиях АО "Кузнецкие ферросплавы" потребуется станд для сушки 15-тонных ковшей.

На опорной раме станда (рисунок 1) закреплена подъемная стрела с

крышкой. В рабочем положении крышка плотно ложится на горловину ковша, в нерабочем - отводится в вертикальное положение на 75 – 80 градусов к горизонтальной плоскости. Крышка футерована муллитокремнеземистыми волокнистыми материалами «Морган Термал Керамикс» (Сухоложский огнеупорный завод, г. Сухой Лог Свердловской обл.) с температурой применения до 1350 °С. В крышке установлены: высокоскоростная горелка конструкции ОАО «ВНИИМТ» в комплекте с горелочным тоннелем и воздушный эжектор с дымоотводящим патрубком; имеется также закладная для установки контрольной термопары и смотровое окошко для визирования переносным пирометром температуры футеровки в центре днища ковша при наладочных работах. На подъемной стреле смонтирован дутьевой вентилятор, от которого часть воздуха поступает в горелку, остальной воздух в воздушный эжектор, который используется для отвода дымовых газов, обеспечивая разрежение в полости ковша и снижение температуры газов от 1100-1200 °С до 400-500 °С. Это позволяет осуществлять отвод разубоженных дымовых газов дымоотводящим патрубком без внутренней футеровки - трубой из стали 12Х18Н10Т. Разубоженные дымовые газы отводятся под стационарный зонд и далее - в цеховой дымоотводящий тракт. Газопровод подачи ферросплавного газа оснащен запорно-регулирующей арматурой, оборудованием и приборами, обеспечивающими очистку газа от пыли и влаги, измерение расхода газа на стенд, выполнение теста герметичности узла газовой безопасности, продувку газопровода азотом перед розжигом горелки, регулирование расходов первичного и вторичного газа на горелку, отключение подачи газа и в горелку в следующих аварийных ситуациях: при любом положении крышки стенда, кроме рабочего, когда она полностью ложится на горловину ковша; при погасании факела горелки; при падении/повышении давления газа и воздуха перед горелкой ниже/выше значений, установленных проектом; при отключении электрического напряжения на стенде или в шкафу КИПиА. Горелка обеспечивает номинальный расход ферросплавного газа 450 м³/ч и надежно работает в широком диапазоне суммарного коэффициента избытка воздуха от 1,1 до 17 – 20; при этом эмиссия монооксида углерода и оксидов азота не превышает экологических нормативов. Горелка состоит из корпуса с воздушным патрубком, внутренней огневой камеры и газового сопла с патрубками подвода первичного и вторичного газа. Поступающий в горелку воздух делится на два потока. Первичный воздух поступает в огневую камеру, вторичный проходит по кольцевому зазору между обечайками корпуса и огневой камеры, охлаждая последнюю, и затем истекает из горелки. Ферросплавный газ поступает в газовое сопло горелки и делится на два потока. Первичный газ подается в огневую камеру, смешивается с первичным воздухом в полностью сгорает в пределах огневой камеры. Продукты сгорания на выходе из огневой камеры смешиваются со вторичным воздухом, поступают в огнеупорный горелочный тоннель, сужающееся сопло которого формирует высокоскоростную струю теплоносителя с температурой 130 – 600 °С. Далее температура теплоносителя повышается от

600 до 1600 °С путем дополнительной подачи в горелку по оси огневой камеры вторичного газа, который, надежно воспламеняясь в пределах огневой камеры, сгорает в высокоскоростном факеле уже в полости ковша. Горелку разжигают при помощи высоковольтной электросвечи; факел контролируют посредством ультрафиолетового датчика. На всех режимах горелка работает с постоянным расходом воздуха, равным номинальному, что обеспечивает постоянную аэродинамическую мощность струи теплоносителя (факела).



- 1 - опорная рама; 2 - стрела подъемная; 3 - крышка футерованная;
 4 - горелка; 5 - эжектор воздушный; 6 - патрубок дымоудаления;
 7 - зонд цехового тракта дымоудаления; 8 - вентилятор дутьевой;
 9 - газопровод ферросплавного газа; 10 - ковш

Рисунок 1 - Стенд сушки футеровки разливочных ковшей

Температуру теплоносителя в процессе сушки футеровки повышают по заданному графику, увеличивая расход первичного газа, а затем, допол-

нительно, -вторичного газа. Таким образом, на всех режимах работы горелки обеспечивается высокоскоростная струя теплоносителя и факела длиной не менее 4,5 м от внутренней поверхности крышки. Она формирует интенсивный осесимметричный контур циркуляции газов в полости ковша, омывающих его днище и стенки. Это создает условия для высокой равномерности нагрева всей внутренней поверхности футеровки, что особенно важно в низкотемпературной области сушки, где футеровка нагревается за счет конвекции. В составе стенда горелка работает в режиме автоматического управления по заданному графику сушки. В местный шкаф КИПиА установлена операторская ЖК-панель, на которой отображается весь технологический процесс сушки. Расход ферросплавного газа учитывается с коррекцией по давлению и температуре; контролируемые параметры, работа оборудования и аварийные сигналы архивируются. Контроллер позволяет запрограммировать несколько графиков сушки и вести процесс по любому из них. Предусмотрена возможность ручного управления процессом сушки.

При наладочных работах, контрольных нагревах и гарантийных испытаниях в плавильном цехе Аксуского завода ферросплавов была проведена сушка нескольких 70-тонных ковшей по заданным графикам в автоматическом режиме. Процесс сушки обеспечивается автоматикой регулирования и работой технологического оборудования в полном соответствии с графиком при высокой равномерности поля температуры по всей внутренней поверхности футеровки. Максимальная разница температуры днища ковша по показаниям переносного пирометра и по показаниям контрольной термопары под крышкой не превышает 1 % во всем диапазоне графика сушки. Автоматика безопасности обеспечивает отключение подачи ферросплавного газа в горелку в указанных выше аварийных ситуациях.

Экономический эффект от предлагаемых мероприятий

На данный момент при сушке футеровки ковшей на АО "Кузнецкие ферросплавы" используются горелки на дизельном топливе. Расход дизельного топлива приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Расход дизельного топлива для сушки футеровки ковшей

Расход топлива на сушку одного ковша	Количество ковшей, обжигаемых в сутки	Расход топлива в сутки	Расход топлива в год	Средняя стоимость 1 л дизельного топлива	Расходы на закупку дизельного топлива в год
10 л	14	140 л	51100л	47,9 руб.	2447690 руб.

В таблице 2. приведена теплотворная способность дизельного топлива и ферросплавного газа исходя из этих данных в сутки для сушки ковшей мы используем 1442000 кКал. Производительность газодувки на АО Кузнецкие ферросплавы" равна 3000-5000 м3/ч при использовании ферросплавного газа

за час мы можем получить 7521000 кКал этого более чем достаточно для сушки ковшей.

Таблица 2 - Теплотворная способность дизельного топлива и ферросплавного газа

наименование	единица измерения	кКал
дизельное топливо	литр	10300
ферросплавный газ	м3	2507

Таким образом, использование ферросплавного газа в качестве топлива совместно со стандом сушки ковшей позволит сэкономить 2447690 рублей в год.

Кроме того, предлагаемая в данной работе технология позволит уменьшить объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, что в свою очередь, сократит налоговую базу по экологическому налогу.

Выводы.

Использование ферросплавного газа в качестве топлива для сушки футеровки ковшей позволит:

- снизить расходы на дизельное топливо (до 2,5 млн рублей в год);
- уменьшить объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, образующихся от сжигания дизельного топлива;
- сократить налоговую базу на экологический налог;
- улучшить качество сушки футеровки ковшей (разработанные ОАО «ВНИИМТ» станды сушки 70-т разливочных ковшей при отоплении их ферросплавным газом обеспечивают высокую равномерность нагрева внутренней поверхности футеровки в диапазоне от 50-70 °С до 1100-1200 °С по любому заданному графику в автоматическом режиме;
- обеспечить безопасное производство работ за счет применения современных автоматизированных систем.

В случае модернизации предприятия и реконструкции закрытых печей в печи открытого типа, станды для сушки ковшей могут работать на природном газе.

Библиографический список

1. Рязанов В. Т., Хохлов В. А., Шульгин С. С., Оганесян Ю.М. Опыт модернизации стандов сушки футеровки чугуновозных ковшей // Сталь. 2015. № 3. С. 39 – 41.
2. Рязанов В. Т., Шульгин С. С., Набоких А. А., Шестаков С. Б. Опыт внедрения стандов сушки разливочных ковшей, отапливаемых ферросплавным газом // Сталь. 2020. № 5. С. 24 – 25.
3. Электронный ресурс: Режим доступа.- <https://erg.kz/ru/news/661>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ УГЛЕРОДОМ

Безрукова Е.С., Чернева Е.Н., Полях О.А., Ноздрин И.В., Строкина И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Расчетным путем определены термодинамические параметры восстановления оксидов железа в системе Fe-C-O₂-H₂ и построена диаграмма фазово-химических равновесий. Описаны окислительно-восстановительные свойства газовой фазы как функции значений кислородного потенциала. Показано, что увеличение концентрации водорода до 40 % в газовой фазе повышает эффективность восстановления оксидов железа при снижении температуры начала восстановления.

Ключевые слова: железорудное сырье, углеродотермическое восстановление, термодинамические параметры, диаграмма фазово-химических равновесий.

В современной металлургической промышленности при использовании в шихте металлизированного железорудного сырья, процесс восстановления оксидов железа в 85 % случаев осуществляется конвертированным природным газом, состоящим, в основном, из CO и H₂. Соответствующие установки газофазного восстановления требуют дополнительных конструктивных затрат, связанных с каталитическим конвертированием и подводом газавосстановителя. Оптимальную восстановительную газовую среду можно создать при углеродотермическом восстановлении с добавлением в газовую фазу определенного количества водорода. Твердый углерод в этом случае играет роль регенератора CO и H₂. Такой режим может быть обеспечен при применении в качестве восстановителей полукоксов бурых или длиннопламенных углей, торфа или тощих и слабоспекающихся углей – наиболее дешевых и недефицитных материалов с большим содержанием летучих.

Хорошо изучены закономерности восстановления оксидов железа в отдельных системах Fe-C-O и Fe-O-H [1], а термодинамические показатели комплексной системы Fe-C-O₂-H₂ до сих пор полностью не изучены. В связи с этим целью настоящей работы является определение термодинамических параметров полного и неполного восстановления оксидов железа в системе Fe-C-O₂-H₂.

Обобщение имеющегося материала по количественным характеристикам равновесия реакций восстановления оксидов железа в отдельных системах Fe-C-O и Fe-C-H, показало, что изменения термодинамических характеристик прочности оксидов железа в сложной системе Fe-C-O₂-H₂ закономерны и протекание реакций окисления и восстановления зависит от таких термоди-

намических параметров как температура, давление, состав газовой фазы [2].

В работе представлен анализ результатов расчетов фазово-химических равновесий в системе Fe-C-O₂-H₂, выполненных при помощи программного обеспечения MathCAD по методике термодинамического расчета равновесного состава для случая постоянства температуры и давления [3 - 4].

Результаты анализа представлены на рисунке 1, в виде комплексной диаграммы фазово-химических равновесий, на которой в координатах температура – состав газовой фазы выделены объёмные области существования отдельных твердых фаз (C_{ТВ}, Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO, Fe), сосуществующих с газовой фазой, состав которой представляется на треугольнике концентраций в координатах C_{ТВ}-H₂-O₂ (% , мол). Разделяющие эти области поверхности представляют трехфазные равновесия (Fe-FeO-газ, FeO-Fe₃O₄-газ, Fe₃O₄-Fe₂O₃-газ, Fe-C_{ТВ}-газ), а линии их пересечения – соответствующие четырехфазные равновесия (Fe₃O₄-FeO-C_{ТВ}-газ, FeO-Fe-C_{ТВ}-газ).

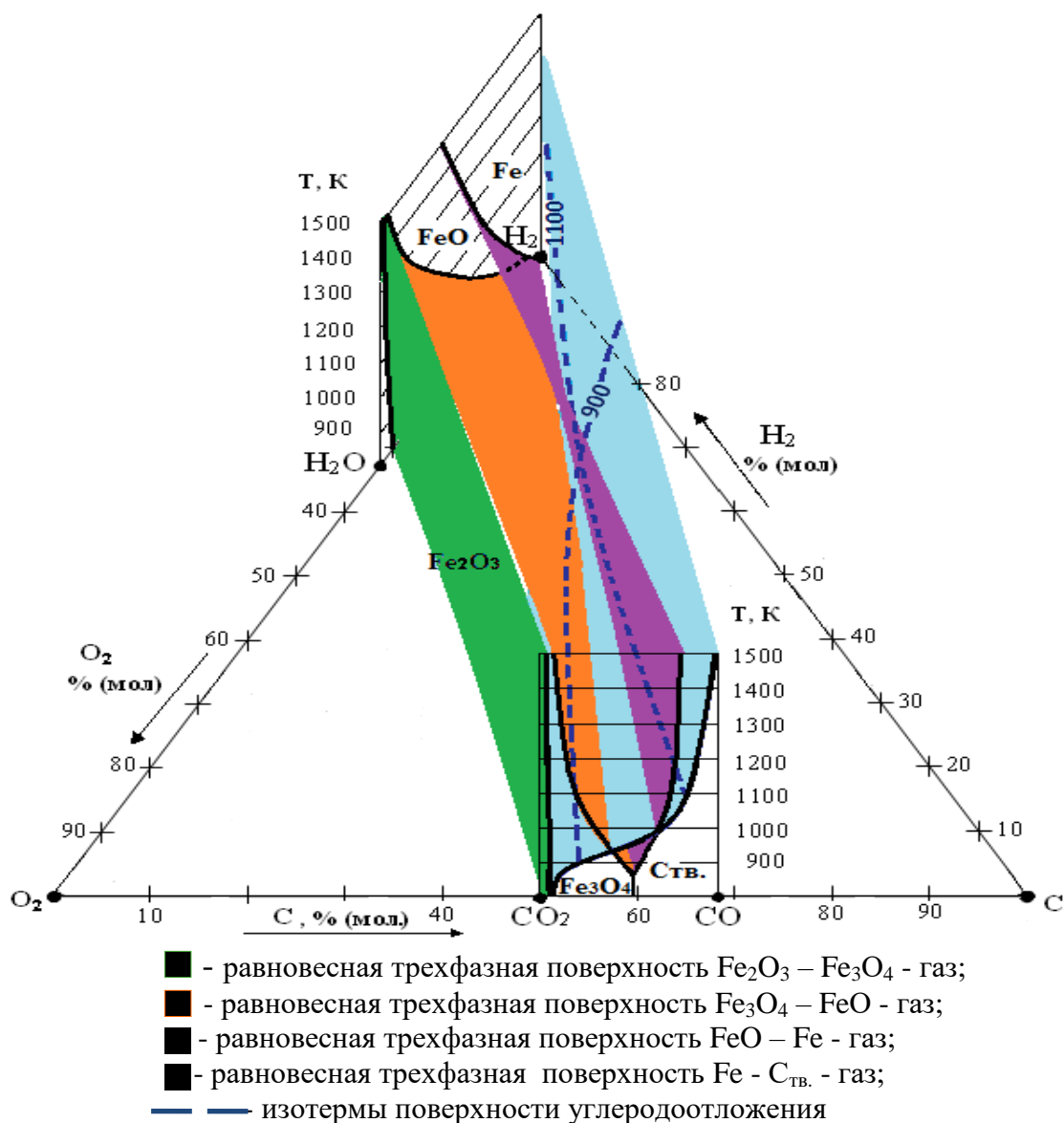


Рисунок 1 - Диаграмма равновесий в системе Fe-C-O₂-H₂

В газовой фазе, содержащей CO, CO₂, O₂, H₂ и H₂O, на довольно широком интервале изменяются состав и свойства газовых смесей от окислительной атмосферы с преимущественным содержанием CO₂ (H₂O) до восстановительной, в которой преобладает CO (H₂). Охарактеризовать состав и окислительно-восстановительные свойства газовой фазы системы Fe-O₂-C-H₂ возможно при помощи величины кислородного потенциала.

В таблице 1 количественно оценено изменение значений lg pO₂ в зависимости от концентрации водорода в системе.

Можно отметить, что при температуре ниже 1000 К и содержании водорода в системе более 50 % восстановительные свойства атмосферы увеличиваются, в основном, за счет протекания реакций с участием водорода, так как изменение отношения концентрации CO к CO₂ сравнительно малы. Вблизи температуры 1100 К равновесный состав газовой фазы изменяется в сторону больших величин CO/CO₂. Для достижения термодинамически наилучших показателей восстановления, достаточная концентрация водорода в газовой фазе системы Fe-O₂-C-H₂ составляет 10-40 %. Дальнейшее увеличение содержания H₂ в газовой фазе не влияет на термодинамику восстановительного процесса.

Таблица 1 - Изменение значений lg pO₂, в %, в зависимости от количества водорода в газовой фазе C-O₂-H₂ и температуры

Концентрация H ₂ в газовой фазе C-O ₂ -H ₂ , % моль	Температурный интервал, К	Уменьшение lg pO ₂ , в %
20	1300-1500	2,0
30	1200-1400	2,5
40	1100-1200	2,7
50	1000-1100	3,0
60	900-1000	6,0
70	800-900	8,0
80	700-800	10,0

Выводы:

1. Рассчитана и построена диаграмма фазово-химических равновесий в системе Fe-O₂-C-H₂.
2. Охарактеризованы окислительно-восстановительные свойства газовой фазы системы Fe-O₂-C-H₂ посредством изменений значений кислородного потенциала, выраженного через lg pO₂.
3. Установлено, что увеличение концентрации водорода до 40% в газовой фазе повышает эффективность углетермического восстановления оксидов железа, а также снижает температуру начала восстановления.

Библиографический список

1. Филиппов, С.И. Теория металлургических процессов / С.И. Филиппов - М.: Металлургия, 1967. - 280 с.
2. Якушевич, Н.Ф. Определение параметров окислительно-

восстановительных процессов в системе Fe-C-O₂-H₂ / Н.Ф. Якушевич, И.В. Строкина, О.А. Полях // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2011. - № 8. - С. 13-18.

3. Страхов, В.М. Получение металлизированных окатышей с использованием буроугольного полукокса / В.М. Страхов, А.Е. Аникин, И.В. Строкина, Н.Ф. Якушевич, Феоктистов А.В. // Кокс и химия. - 2015. - № 1. - С. 20 – 25.

4. Якушевич, Н.Ф. О возможности интенсификации процесса металлизации железорудного сырья / Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А., Ноздрин И.В., Безрукова Е.С., Ноздрин Е.В. // Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2022»: сб. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Часть 1. – СибГИУ. – Новокузнецк, 2022. – С. 162 – 168.

УДК 669.046

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ В ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ

Лепихов В.С., Ильина Ю.В., Марденова А.А., Ноздрин И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Приведены результаты моделирования взаимодействия плазменного потока азота с частицами оксида вольфрама WO₃ различной дисперсности для оценки возможности его использования в качестве исходного компонента при синтезе нанодисперсных порошков вольфрама и его карбида. Установлено, что параметры промышленного плазменного реактора мощностью 150 кВт обеспечивают эффективную переработку оксида вольфрама крупностью до 200 мкм.

Ключевые слова: вольфрам, карбид вольфрама, плазменный реактор, плазмометаллургический синтез.

Вольфрам и карбид вольфрама по праву занимают одно из лидирующих мест в мире сверхтвердых тугоплавких соединений. Использование данных материалов в высокодисперсном состоянии существенно расширяет сферы их применения в современном материаловедении, например, как компонентов новых жаропрочных керамик, композиционных покрытий и др.

К перспективным способам получения высокодисперсных материалов и композиций на их основе следует отнести процессы плазмометаллургического синтеза, реализуемые в струйных реакторах.

Лимитирующей стадией плазменных процессов, использующих в качестве исходного сырья конденсированные материалы, является перевод их в газообразное состояние. Экстремальность условий синтеза, большие скорости и крайне малые времена нахождения компонентов в реакторе затрудняют экспериментальное исследование процесса гомогенизации плазменно-

го потока. В связи с этим в настоящее время разрабатываются и совершенствуются численные методы моделирования струйных процессов, протекающих в низкотемпературной плазме.

Целью настоящей работы является проведение моделирования в условиях промышленного реактора взаимодействия плазменного потока азота с частицами оксида вольфрама WO_3 различной дисперсности для оценки возможности его использования в качестве исходного компонента при синтезе порошков вольфрама и его карбида.

Большинство современных моделей, описывающих процесс взаимодействия частиц сырья с плазменной струей [1] рассматривают идеализированный вариант нагрева отдельных частиц при движении вдоль оси реактора в высокоэнтальпийном газовом потоке и, зачастую, не учитывают влияния концентрации дисперсного материала, изменения теплофизических свойств конденсированного сырья и газового потока в условиях градиента температур по сечению реактора и на поверхности частиц. Температура потока определяется по средним значениям, полученным из экспериментальных данных, или рассчитывается стандартными методами для установившегося турбулентного режима течения газа. Также не принимается во внимание изменение коэффициента теплоотдачи от газового потока к стенкам реактора при образовании гарнисажа или при использовании искусственной футеровки, которые могут снижать теплоотдачу на 11 – 35 % [2]. Такие допущения приводят к значительной погрешности результатов расчетов и завышение размеров испарившихся частиц в несколько раз.

В настоящей работе использовалась программа расчета, созданная в Сибирском государственном индустриальном университете на базе исследований, выполненных под руководством профессора Г.В. Галевского и представленных в [3 - 5]. В использованной математической модели решены следующие вопросы:

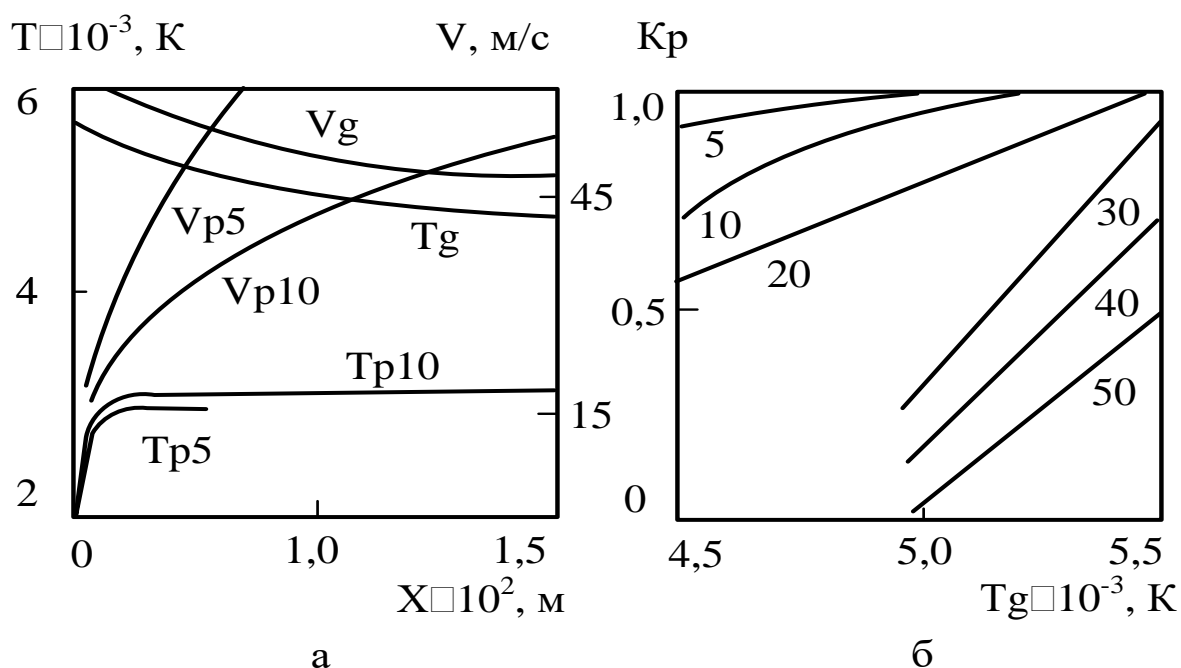
- учтен эффект влияния естественной турбулизации плазменного потока на теплообмен плазмы с конденсированными частицами и «холодной» стенкой реактора;
- определены и использованы параметры снижения интенсивности теплообмена плазменного потока со стенками реактора при формировании гарнисажа и искусственной теплоизоляции канала;
- предусмотрено изменение теплового потока к поверхности отдельных частиц за счет учета влияния «коллективного» фактора.

Программа расчетов оценивает влияние параметров высокоэнтальпийного газового потока и крупности шихтовых материалов на степень их испарения. Результаты расчетов позволяют определить для любой точки плазменного реактора: количество тепла, переданное теплоносителем частицам сырья и стенкам реактора; температуру газопылевого потока, частиц шихты и стенок реактора; степень и время испарения частиц; расстояние, которое прошли частицы материала до полного испарения.

В качестве начальных условий принят режим работы трехструйного

прямоточного плазменного реактора с гарниссажной футеровкой из диоксида циркония мощностью 150 кВт, обеспечивающий начальную расчетную температуру плазменного потока 5400 К. Запыленность плазменного потока на входе в реактор принята равной 0,01 кг WO_3 на 1 кг плазмообразующего газа - азота. Начальная скорость ввода частиц в плазменный реактор составляла 1 м/с.

Рассчитывалась температура и скорость частиц и газового потока, время нагрева частиц до температуры плавления $T_{пл.}$, время плавления, время нагрева от температуры плавления до температуры диссоциации $T_{дис.}$, время нахождения частиц при $T_{дис.}$ и расстояния, пройденное частицами за эти отрезки времени. Программа позволяет оценить, степень диссоциации частиц за время её нахождения при температуре диссоциации. Результаты моделирования параметров переработки порошка WO_3 в плазменном потоке азота приведены на рисунке 1.



- а) распределение температуры компонентов пылегазового потока по длине реактора (T_r –среднемассовая температура азота, $T_{70...T_{200}}$ –температура поверхности частиц оксида вольфрама заданной крупности);
 б) зависимость скорости частиц оксида вольфрама от крупности (70,100, 150, 200 мкм) и скорости плазменного потока

Рисунок 1 – Результаты моделирования параметров переработки порошка WO_3 в плазменном потоке азота

Вывод. Параметры промышленного плазменного реактора мощностью 150 кВт обеспечивают для рассматриваемого технологического вариантов эффективную переработку порошкообразного сырья оксида вольфрама крупностью до 200 мкм при концентрации порошков в плазменном потоке

азота 0,01 кг/кг.

Библиографический список

1. Моссэ, А.Л. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах / А.Л. Моссэ, И.С. Буров. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
2. Ноздрин, И.В. Модельно-математическое исследование условий эффективной переработки хромсодержащего сырья в плазменном реакторе / И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева, М.А. Терентьева. – Изв. вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 2. – С. 13 – 18.
3. Руднева, В.В. Модельно-математическое исследование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе / В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Е.К. Юркова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 5. – С. 52 – 55.
4. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3 т./ науч. ред. Г.В. Галевский: дополнительный том. Плазмометаллургическое производство карбида кремния: развитие теории и совершенствование технологии/ В.В. Руднева.– М.: Флинта: Наука, 2008.– 387 с.
5. Rudneva, V.V. Effective Processing of Disperse Raw Materials in a Plasma Reactor / V.V. Rudneva, G. V. Galevskii, E.K. Yurkova // Steel in Translation. – 2007. – Vol.37. – № 2. – P. 115 – 118.

УДК 004.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ «АЛЮМИНЩИК» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Мартусевич Е.А., Говриленко Д.А., Митягин В.О., Ноздрин И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Представлены результаты разработки и внедрения в учебный процесс автоматизированной информационно-обучающей системы «Алюминщик», позволяющей формировать у обучающихся технологические навыки получения алюминиевых сплавов в миксерах и отрабатывать алгоритмы оптимизации технологических процессов.

Ключевые слова: информационно-обучающая система, алюминиевые сплавы, оптимизация, математическая модель.

Металлургия относится к системообразующим отраслям мировой и отечественной промышленности. Лидирующее положение среди цветных металлов занимает алюминий с мировым производством около 67 млн. тн/год. Отечественные предприятия с производством около 3, 6 млн. тн /год уступают по данному показателю только китайским компаниям.

В чистом виде алюминий применяется редко. Основные потребители

используют его в виде сплавов. Формирование алюминиевых сплавов осуществляется в миксерах или индукционных печах при помощи метода последовательного приближения до заданного химического состава посредством смешивания алюминия-сырца, присадок лигатур и флюсов. Данный этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий при изготовлении расплава в результате неточных расчетов значений параметров смешивания исходного сырья и имеющихся добавок. В результате этого увеличивается время приготовления расплава, снижается производительность работы литейного отделения, повышаются затраты на единицу продукции, что, в свою очередь, предопределяет необходимость совершенствования технологии производства алюминиевых сплавов [1].

Экспериментальная оптимизация технологического процесса формирования алюминиевых сплавов весьма дорогостояща и связана с большим количеством организационных проблем, а зачастую вообще неосуществима. В связи с этим большое значение приобретает использование современного математического аппарата моделирования физико-химических процессов приготовления сплавов [2]. Получение оптимизационных математических моделей позволяет легко трансформировать систему в обучающий тренажер, обеспечивающий как приобретение начальных знаний обучающимися, так и совершенствование профессиональных навыков у технологического персонала.

Целью данной работы является разработка и внедрение в учебный процесс автоматизированной информационно-обучающей системы (АИС) «Алюминщик», позволяющего сформировать у обучающихся технологические навыки получения алюминиевых сплавов в миксерах и отработать алгоритм оптимизации технологического процесса. (АИС) «Алюминщик» была разработана на кафедре прикладных информационных технологий и внедрена в учебный процесс на кафедре металлургии цветных металлов и химической технологии СибГИУ.

Основой АИС является математическая модель технологического процесса, при разработке и описании которой используются не только принципы информационного подобия, но и фундаментальные физико-химические законы, а также экспериментально-статистические методы. Блок-схема АИС «Алюминщик» приведена на рисунке 1, а параметры процесса, учитываемые при выполнении расчетов на рисунке 2.

Программа позволяет моделировать технологический процесс шихтовки алюминиевого расплава до заданной марки алюминия путем варьирования химическим составом исходного алюминия, применением различных легирующих и флюсующих добавок, использованием разных технологических приемов обработки расплава. Конечная цель работы на тренажере – это получение заданной марки алюминия, при различных начальных условиях и ограничениях [3,4].

В качестве критериев оптимизации, по усмотрению руководителя, могут задаваться как технологические параметры – минимизация времени при-

готовления или количества технологических операций, так и экономические – стоимость затрат на получения сплава.

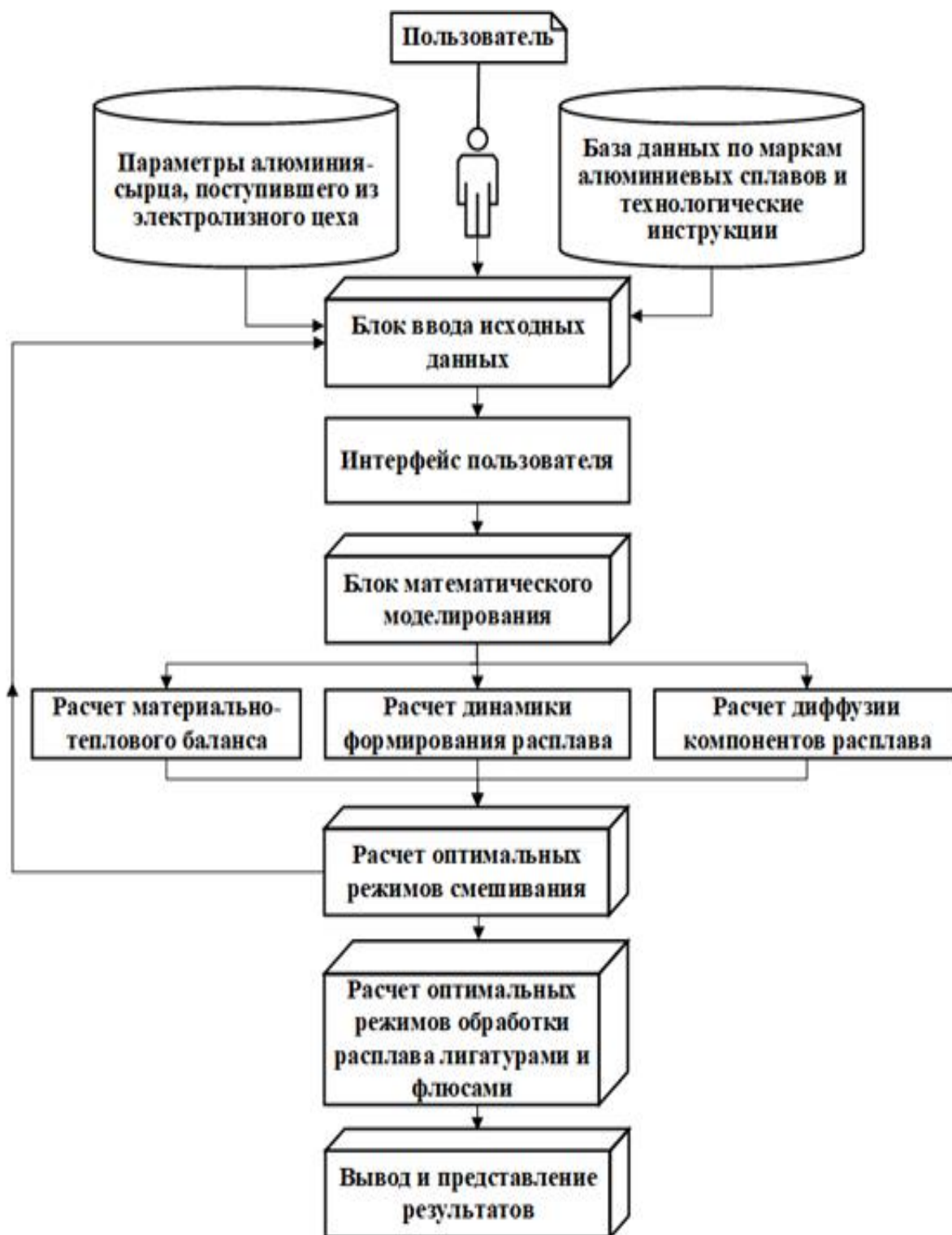


Рисунок 1 - Блок-схема АИС «Алюминщик»

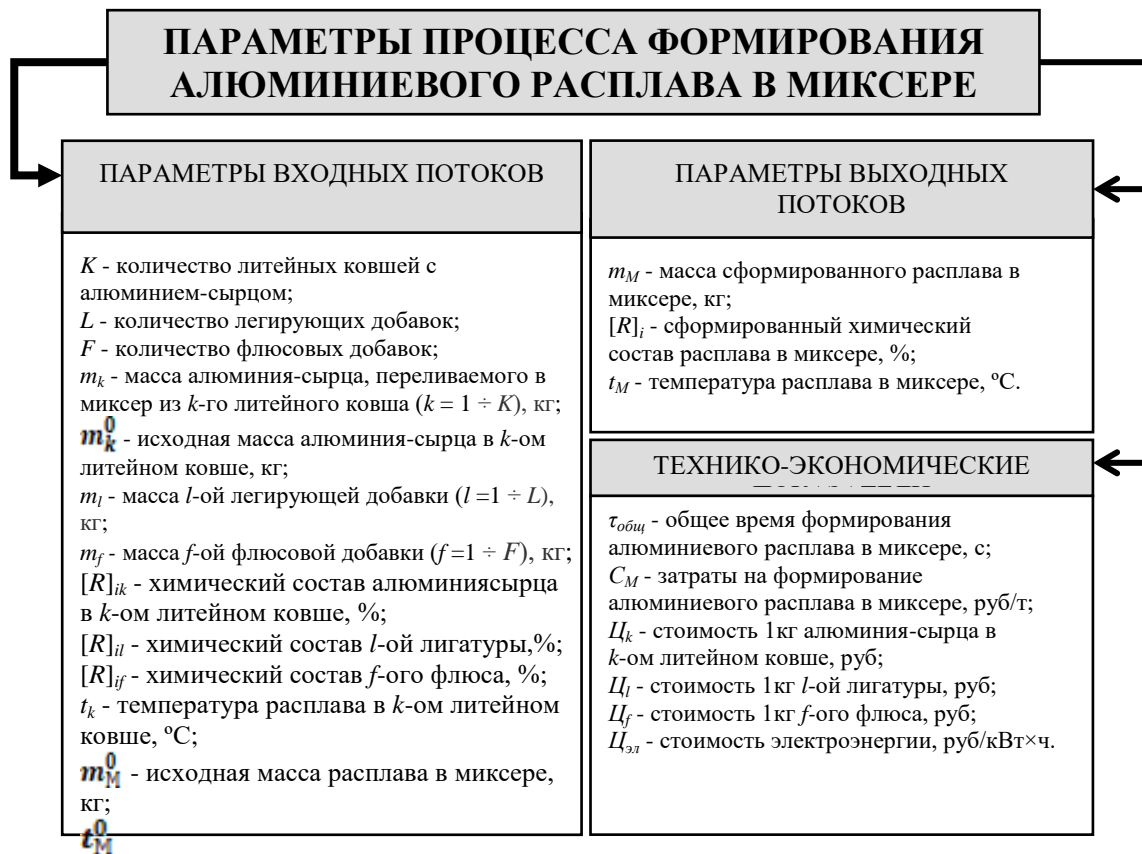


Рисунок 2 – Параметры процесса формирования алюминиевого расплава в миксере

Анимированный интерфейс программы позволяет наглядно представить последовательность технологических операций получения сплавов путем визуализации процессов загрузки алюминия-сырца, легирующих компонентов и флюсов, операций перемешивания, дегазации, съема шлака, выдержки и разлива полученного сплава в требуемых комбинациях. Вид заключительного окна АИС представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Окно финальной страницы АИС «Алюминщик»

Библиографический список

1. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов. – К.: Изд-во «Коминтех». – 2005. – 365 с.
2. 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.
3. Мартусевич Е.А. Изменение образовательных ресурсов под влиянием средств информатизации / Е.А. Мартусевич, С.В. Ковыршина // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2016. – № 4. – С. 35–38.
4. Калашников С.Н. Особенности применения информационных экспертных систем в металлургии на основе интеллектуальной обработки данных и знаний / С.Н. Калашников, В.Н. Буинцев, Е.А. Мартусевич [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2020. – №1. – С. 1–10.

УДК 662.732

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ

Топина К.В., Сюльдина С.А., Ядыкина М.А., Полях О.А., Ноздрин И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Предложена схема физико-химических взаимодействий в системе Si - С - О, построенная на основе термодинамического анализа и результатов кинетических исследований процессов карботермического синтеза карбида кремния в печи Ачесона, достаточно полно описывающая процессы массопереноса.

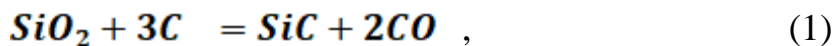
Ключевые слова: карбид кремния, карботермический синтез, печь Ачесона.

Карбид кремния – материал, обладающий большим набором уникальных свойств: тугоплавкостью, химической стойкостью по отношению к газам и кислотам, высокой твердостью, электропроводностью и др., благодаря которым он широко используется в различных отраслях промышленности (металлургии, химии, электротехнике) в качестве восстановителей, абразивных и огнеупорных материалов, высокотемпературных, электронагревателей, полупроводниковых элементов.

Условия образования карбида кремния в наиболее распространенном варианте синтеза в керновых печах Ачесона требуют тщательного теорети-

ческого анализа. Основные представления о механизме образования карбида кремния систематизированы в [1-5]. Целью настоящей работы является уточнение существующей модели на основе современных экспериментальных и расчетных данных.

Несмотря на то, что процесс образования карбида кремния хорошо описывается суммарной реакцией:



химизм процесса, как показывает термодинамический анализ процесса восстановления кремнезема углеродом [2 - 4] и кинетические исследования взаимодействий типа $\text{SiO}_2 + \text{C}$, $\text{SiO}_2 + \text{SiC}$, $\text{SiO} + \text{C}$, оказывается достаточно сложным и предполагает участие в процессе промежуточных продуктов – монооксида кремния, кремнекислородного расплава SiO_{2-x} , а при высоких температурах (более 2500 К) также паров кремния и его карбидов.

Предлагаемая схема физико-химических взаимодействий, построенная на основе термодинамического анализа и результатов кинетических исследований, достаточно полно описывающая процессы массопереноса в печи Ачесона, представлена на рисунке 1.

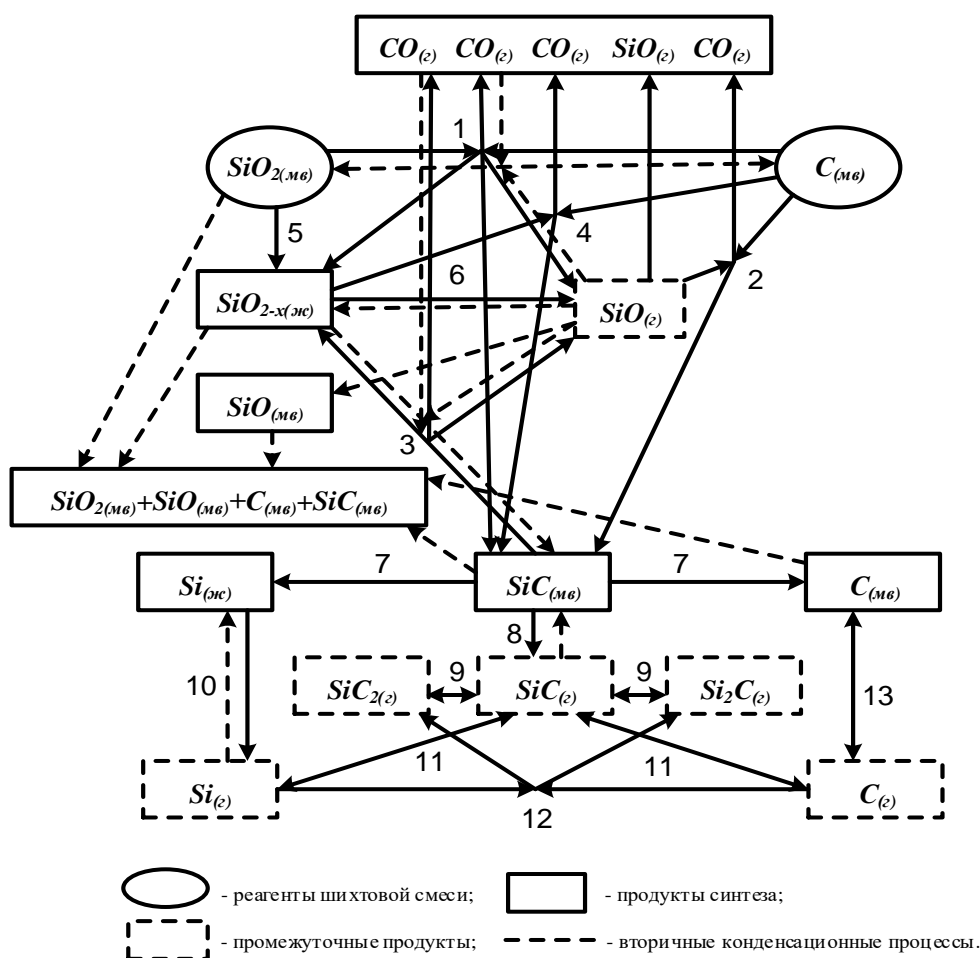


Рисунок 1 – Схема взаимодействий в процессе карботермического синтеза карбида кремния

При использовании достаточно мелких хорошо перемешанных материалов первичным взаимодействием является твердофазное контактное взаимодействие оксида кремния с углеродом $SiO_{2(ТВ)} + C_{(ТВ)}$ (1), в результате которого уже при температуре $\approx 1500\text{K}$ образуются газообразные монооксиды кремния и углерода, а при температурах выше 1800K – карбид кремния и дефицитный по кислороду кремнекислородный расплав.

Карбид кремния может образовываться и за счет взаимодействия газообразного монооксида кремния с твердым углеродом (2). Это взаимодействие также является ведущим в восстановительном процессе и от степени его развития зависит полнота извлечения кремния в карбид.

Восстановление кремния углеродом до карбида в значительной степени осуществляется через образование расплава (4), который при высоких скоростях химических реакций и достаточно длительных выдержках успевает перерабатываться без значительного накопления за исключением случаев, когда в зоне локальных перегревов происходит плавление кварца (5).

Повышение дефицита кислорода в кремнекислородном расплаве приводит к интенсификации процесса испарения монооксида кремния (6), что так же положительно влияет на скорость целевой суммарной реакции. Образовавшийся карбид кремния при дальнейшем повышении температуры взаимодействует с кремнеземом (3), что в значительной степени интенсифицирует процесс газификации кремнекислородного расплава, как за счет непосредственного протекания реакции в зоне контакта с карбидом, так и за счет повышения дефицита кислорода и, как следствие, интенсификации процесса испарения монооксида кремния.

При нагреве до температур выше 2400K карбид кремния начинает частично диссоциировать на жидкий кремний и твердый углерод (7), при этом образующийся графит накапливается на поверхности зерна, а кремний – в блоке карбида кремния. При недостатке углерода в шихте, образовавшемся в локальных зонах при плохом перемешивании шихты или при неправильной шихтовке, могут создаться условия для интенсивного образования кремния при более низких температурах (по реакции $SiO_2 + 2C = Si + 2CO$), в этом случае получается «закремненный продукт».

При еще более высоких температурах (более 2600K) карбид кремния начинает заметно сублимировать (8) (попутно может испаряться кремний, и в очень небольшой степени сублимировать углерод); при этом в газовой фазе протекают химические реакции с образованием газообразных молекул Si_2C, SiC_2 (9), Si_2, Si_3 (11), C, C_2, C_3 (13). Эти процессы обратимы и при незначительном понижении температуры (при диффузии газа в низкотемпературные горизонты) происходит конденсация паров SiC на поверхности мелких кристаллов, за счет чего реализуется их рост до более крупных размеров и осуществляется основная цель высокотемпературного синтеза.

Библиографический список

1. Физико-химические основы карботермического восстановления

оксида кремния в печи сопротивления / Полях О.А., Ноздрин И.В., Строкина И.В. [и др.]. // *Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2022»*: сб. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Часть 1. – СибГИУ. – Новокузнецк, 2022. – С. 180 – 186.

2. Якушевич Н.Ф. Термодинамическая модель углетермического производства карбида кремния / Н.Ф. Якушевич, С.Ф. Павлов // *Сб. науч. трудов «Кремнистые ферросплавы»*. – М., Metallurgia, 1988. – С. 100-106.

3. Якушевич Н.Ф. Физико-химические взаимодействия в руднотермических печах при плавке кремния / Н.Ф. Якушевич, О.А. Коврова // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1997. №8. – С. 3–8.

4. Якушевич Н.Ф. Механизм межфазных взаимодействий в ванне ферросилициевой печи / Н.Ф. Якушевич, О.А. Коврова, Г.В. Галевский, И.М. Кашлев // *Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: матер. Всерос. науч.-техн. совещ.* – Санкт - Петербург: С-ПтТИ, 1998. – С. 59 - 65.

5. Полях О.А. Анализ физико-химических процессов образования и исследование свойств микрокремнезема / О.А. Полях, Г.В. Галевский, Н.Ф. Якушевич // *Вестник ГМС РАЕН. Отделение металлургии*. Москва – Новокузнецк: СибГИУ. 2015. Вып. 15. – С. 49–55.

УДК 669.041

ВАРИАНТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОФОСФОРИСТОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Топина К.В., Строкина И.В., Ноздрин И.В., Полях О.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

В связи со значительной выработкой запасов сибирских месторождений железной руды и необходимостью импортировать её с ближнего и дальнего зарубежья вопрос об увеличении сырьевой базы чёрной металлургии Урала и Сибири в последние годы становится особо актуальным. В связи с нехваткой чистого по примесям железорудного сырья использование высокопримесных, в т. ч. высокофосфористых руд в черной металлургии становится все более актуальным.

Ключевые слова: высокофосфористое месторождение, Бакчарское месторождение, производство удобрений, сталеплавильные шлаки, сталь, чугун.

На данный момент в металлургии существует тенденция к увеличению объемов производства чугуна, стали и металлопроката. Это ведет к значительному росту объемов добычи железной руды, увеличению сырьевой базы металлургических комбинатов, освоению новых месторождений [1]. К примеру, Бакчарское месторождение Томской области, которое является уникальным железорудным месторождением и потенциально долгосрочным ис-

точником сырья для металлургических комбинатов.

Разрабатываемые рудные участки характеризуются геологами как полиметаллические с содержанием благородных редкометалльных и редкоземельных элементов, а также тория, ванадия, фосфора, циркония, титана. Выполненные анализы двух проб Бакчарской руды показали следующее содержание в них ценных металлов [2]:

(Co, Be, Mo, Ge, Sn) < (1-3)·10⁻⁴ %;

(Ni, Hf, Sr, In, Sc, W, Nb, Cu, I, Sb) < (1-3)·10⁻³ %;

(Ta, Ga, La) < 0,01%;

(V, Mn, Ti, Zr, Cr) < 0,2-0,3 %.

Бакчарская железная руда является высокофосфористой, с содержанием P₂O₅ до 1 %, поэтому, технология плавки стали должна быть специфичной – обеспечивающей получение качественного металла и одновременно извлечение фосфора в высокофосфористый шлак с последующей переработкой [3, 4].

Рассмотрены разные варианты организации производства: получение металлизированных окатышей в печах шахтного типа, плавка чугуна в рудотермической печи из необогащенной руды, плавка стали в электропечах с разными вариантами загрузки шихты (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики плавков получения чугуна и стали из железной руды Бакчарского месторождения

Расчетные показатели плавков		Железная руда (ЖР) + кокс	Концентрат ЖР (ЖРК) + кокс	Лом + чугун + окатыши из ЖРК	Лом + окатыши из ЖРК	Лом + чугун + окатыши из ЖРК
Соотношение компонентов:				(1:1:2)	(1:3)	(1:1:2)
Варианты плавков:		1	2	3	4	5
Расход сырьевых материалов на 1 т стали, кг	ЖР	2137,0	-	-	-	-
	ЖРК	-	1685,4	-	-	-
	кокс	377,3	342,1	-	-	-
	лом	-	-	307,5	330,1	301,0
	чугун	-	-	307,5	-	301,0
	окатыши	-	-	615,1	990,4	602,0
	известь	619,7	197,2	123,0	198,1	90,3
Выход чугуна при плавке*, % от руды		50,7	64,1	-	-	-
Состав чугуна, %	Fe	93,61	93,43	-	-	-
	Si	1,21	1,07	-	-	-
	V	0,10	0,22	-	-	-
	C	4,19	4,13	-	-	-
	Mn	0,49	0,42	-	-	-
	P	0,39	0,74	-	-	-
Выход шлака при плавке на 1 т металла, кг		1191,3	421,2	-	-	201,4

Продолжение таблицы 1

Расчетные показатели плавок	Железная руда (ЖР) + кокс	Концентрат ЖР (ЖРК) + кокс	Лом + чугун + окатыши из ЖРК	Лом + окатыши из ЖРК	Лом + чугун + окатыши из ЖРК	
Соотношение компонентов:			(1:1:2)	(1:3)	(1:1:2)	
Варианты плавков:	1	2	3	4	5	
Состав низкофосфористого шлака, %	SiO ₂	43,09	35,12	-	-	36,35
	P ₂ O ₅	0,04	0,22	-	-	0,21
	MnO	0,13	0,32	-	-	0,90
	TiO ₂	0,50	1,15	-	-	1,08
	Al ₂ O ₃	8,26	21,59	-	-	19,16
	FeO	0,66	0,66	-	-	5,84
	MgO	1,79	2,35	-	-	0,73
	CaO	45,52	38,54	-	-	35,28
	V ₂ O ₅	0,01	0,05	-	-	0,45
Основность шлака	1,1	1,2	-	-	1,0	
T _{пл.} шлака, °C	1420	1400	-	-	1400	
Выход стали при окислительной плавке**, на 1 т сырья, кг	468,0	593,3	812,9	757,3	830,6	
Состав стали, %	Fe	99,42	99,46	99,34	99,49	99,58
	Mn	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
	V	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03
	Si	0,39	0,35	0,50	0,35	0,25
	C	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	P	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Выход шлака при окислительной плавке, % от выпуска стали	17,0	11,4	29,3	45,5	5,6	
Состав высокофосфористого шлака с добавкой извести, %	SiO ₂	27,98	22,24	24,37	24,28	7,23
	P ₂ O ₅	5,12	14,74	3,83	3,10	19,46
	MnO	3,68	4,64	1,53	1,00	4,94
	V ₂ O ₅	1,08	3,30	0,81	0,60	1,99
	TiO ₂	0,19	0,23	0,77	0,80	0,20
	Al ₂ O ₃	3,14	4,31	13,70	14,22	3,54
	FeO	15,62	17,22	11,48	10,84	19,32
	MgO	0,68	0,47	0,52	0,54	0,13
	CaO	42,51	32,85	42,98	44,62	43,18
Основность высокофосфористого шлака	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	
T _{пл.} шлака, °C	1600	1550	1650	1650	1600	

* - характерна для вариантов 1 и 2 с промежуточным получением чугуна и сливом шлака до 95 %. ** - для вариантов 1, 2 и 5 является второй стадией с новым наведением шлака при получении стали; переплав лома, чугуна и окатышей (варианты 3 и 4) производятся без слива шлака, вариант 5 – со сливом до 95 % и наведением высокофосфористого железисто-известкового шлака.

Наиболее целесообразным и экономичным является вариант с предварительным скачиванием первичного шлака и последующим наведением железисто-известкового шлака с целью наиболее полного извлечения фосфора. Высокофосфористые шлаки, содержащие более 20% P_2O_5 , \approx 20% FeO и до 40% CaO, в дальнейшем могут перерабатываться методом алюминотермического восстановления фосфора из фосфатов кальция, а получающийся попутный продукт - синтетические высокоглиноземистые (60-70% Al_2O_3) кальций-алюминатные шлаки, могут использоваться как клинкер для изготовления высших марок жаростойких высоко глиноземистых цементов, имеющие большой спрос для производства жаростойких огнеупорных изделий, бетонов и торкретмасс.

На 1 тонну высокофосфористого шлака может быть получено 300 кг двойного суперфосфата и 600-700 кг высокоглиноземистого шлака. Дальнейшая обработка стали осуществляется вне печи, в установках доводки металла (УДМ), ковш-печи, вакууматорах, а разливка производится на МНЛЗ квадратного и слябового типа.

На территории Томской области расположено Таловское месторождение бурых углей, запас которых оценивается в 3,6 млрд. тонн, которые могут рассматриваться в качестве восстановителей при получении металлургического сырья. Однако выход смол этих углей составляет около 18%, что не позволяет их использование в неподготовленном виде в металлургическом производстве. Необходимо получение из них полукоксов с содержанием летучих порядка 5-8 %. Работа на таком полукоксе обеспечивает снижение температуры начала восстановления, увеличение в несколько раз скорости химических реакций за счет высокой степени адсорбции и диффузии водорода на поверхности руды и углеродистого материала. Это дает возможность использования получаемых полукоксов бурых углей для изготовления металлургических окатышей в шахтных печах при пониженных температурах, что обеспечивает высокую прочность агрегатов, пониженную спекаемость и облегчение процесса восстановления оксидов железа в целом.

Выводы:

1. При использовании высокофосфористой железной руды Бакчарского месторождения в металлургической промышленности должна быть подобрана специфичная технология её переработки, с целью обеспечения получения качественной малофосфористой стали.

2. Наиболее целесообразным вариантом получения качественной стали ($P \approx 0,01$ %) является вариант 5 (таблица 1) с переплавом лома, чугуна и металлургических окатышей железорудного концентрата Бакчарского месторождения (в соотношении 1:1:2 соответственно) с предварительным скачиванием первичного шлака (до 95%) и последующим наведением железисто-известкового шлака для наибольшего извлечения фосфора.

Библиографический список

1. Ярошенко, Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие техно-

логии черной металлургии / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.

2. Чинакал, Н.А. Перспективы использования руды Бакчарского железорудного месторождения / Н.А. Чинакал // Материалы научно-практической конференции. Том I. Полезные ископаемые. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2008.– С. 283-286.

3. Коневский, М. Р. Фосфор в химии и металлургии / М.Р. Коневский // - Москва : НИИ ТЭ ХИМ, 1980. - 30 с.

4. Ваггаман, В. Фосфорная кислота, фосфориты и фосфорные удобрения / В. Ваггаман // – Москва, 1975.

УДК 669.168.782.046

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ

Топина К.В., Чернева Е.Н., Хорощенко А.А., Полях О.А., Ноздрин И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Определены особенности влияния расплава железа на механизм взаимодействия компонентов системы Fe-Si-C-O. Приведена схема взаимодействий, имеющих место в ванне руднотермической печи при плавке ферросилиция.

Ключевые слова: ферросилиций, руднотермическая печь, физико-химические процессы.

Технология плавки ферросилиция в руднотермических печах аналогична выплавке кремния. Основное отличие заключается во введении в шихту железной стружки, что приводит к значительным изменениям технологического режима и структуры схемы физико-химических взаимодействий в ванне печи. Схемы механизма взаимодействий, протекающих при получении ферросилиция подробно систематизированы и описаны в работах [1- 3]. Целью настоящей работы является ее дополнение за счет новых данных, полученных экспериментальным и расчетным путем.

Наиболее важной особенностью по сравнению с плавкой кремния является появление жидкого металлического расплава при низких температурах (≤ 1600 К), что обуславливает: изменение последовательности протекания химических реакций; увеличение их скорости за счет роста межфазной реакционной поверхности; ускорение доставки компонентов в реакционную зону путем диффузии через жидкий металлический расплав; растворение карбидных пленок, образующихся на поверхности и в порах углеродистого восстановителя и затрудняющих доставку монооксида кремния к атомам углерода.

Появляются новые физико-химические процессы, такие как растворение углерода в металлическом расплаве, взаимодействие железоуглеродистого расплава с карбидом кремния, приводящее к его разрушению и пере-

ходу кремния и углерода в металлический расплав, с монооксидом кремния газовой фазы с восстановлением кремния и поглощением его металлическим расплавом, с диоксидом кремния в местах непосредственного контакта с кварцитом, также приводящее к переходу кремния в металлический расплав. Суммарный результат этих процессов – раннее восстановление кремния с растворением его в металлическом расплаве, в котором в момент его образования химический потенциал кремния имеет очень низкие (близкие к нулевым) значения, что и обеспечивает переход в него кремния из всех сосуществующих кремнийсодержащих фаз.

Заметное восстановление кремния (с растворением его в металлическом расплаве) начинается фактически с момента образования жидкого металлического расплава, т.е. при температуре ≈ 1600 К, возможно, в незначительной степени и при более низких температурах, например, при введении в шихту чугуновой стружки, плавящейся при температуре ≈ 1450 К). Скорость восстановления кремния тем выше, чем больше содержание железа в исходной шихте и, следовательно, больше объем и поверхность металлического расплава и его способность поглощать кремний из газовой фазы, с поверхности кварцита, а при температурах выше 1800 К и из образовавшихся на поверхности углеродистого восстановителя карбидных пленок [1- 3].

Полная схема механизма взаимодействий, имеющих место в печной ванне при плавке ферросилиция, представлена на рисунке 2. Цифрами на схеме обозначены номера взаимодействий и процессов в соответствии с их описанием.

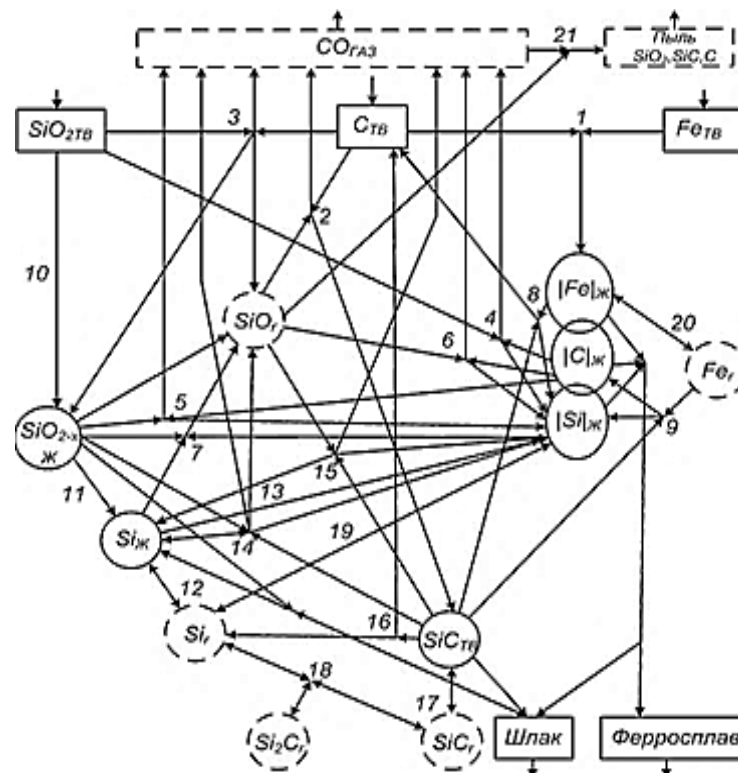


Рисунок 2 – Схема физико-химических взаимодействий при плавке ферросилиция в руднотермической печи

1 Первичным физико-химическим процессом, протекающим при наиболее низких температурах (1500–1800 К), является процесс плавления железа и его науглероживания.

2 Взаимодействие открытой поверхности углеродистого восстановителя с монооксидом кремния, образовавшемся в зоне высоких температур, осуществляемое при температурах выше 1500 К,

3 Твердофазное контактное взаимодействие кварцита с коксом, результатом которого является газификация диоксида кремния.

4-5 Контактное взаимодействие углерода, растворенного в металлическом расплаве, с кремнекислородным расплавом или твердым кварцитом с восстановлением кремния и переходом его в металлический расплав.

6 Взаимодействие металлического расплава с монооксидом кремния газовой фазы с восстановлением кремния и переходом его в металлический расплав.

7 Взаимодействие восстановленного кремния с кремнекислородным расплавом с образованием газообразного монооксида.

8-9 Взаимодействие образовавшегося на поверхности кусков кокса карбида кремния с железом расплава (8) и его парами (9), в результате которого происходит разрушение карбида.

10 Плавление оксида кремния с переходом его в кремнекислородный расплав.

11-13 Расслоение кремнекислородного расплава с выделением из него расплава, обогащенного примесями (CaO , Al_2O_3 и др.), и жидкого кремния с возможным переходом его в пар (12) и железокремниевый расплав (13).

14 Взаимодействие кремнекислородного расплава с карбидом кремния с образованием кремния, растворяющегося в ферросплаве, и монооксидов кремния и углерода.

15 Взаимодействие монооксида кремния с карбидом.

16 Диссоциация карбида кремния в зоне высоких температур (выше 2800 К) с образованием паров кремния и твердого углерода.

17-18 Испарение карбида кремния с последующим взаимодействием его паров с кремнием и другими компонентами газовой фазы с образованием молекул Si_2C , SiC_2 и др.

19 Испарение кремния из металлического расплава в подэлектродном пространстве и последующая конденсация пара кремния на стенках реакционного тигля.

20 Испарение железа в зоне электрических дуг и конденсация его паров вблизи поверхности реакционного тигля.

21 Вторичные процессы конденсации монооксида кремния в зоне низких температур.

Библиографический список

1. Особенности физико-химических процессов, протекающих в ванне электропечи при производстве ферросилиция / Якушевич Н.Ф., Полях О.А.,

Ноздрин И.В. [и др.] // *Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2022»*: сб. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Часть 1. – СибГИУ. – Новокузнецк, 2022. – С. 168 – 175.

2. Якушевич, Н.Ф. Механизм межфазных взаимодействий в ванне ферросилициевой печи / Н.Ф. Якушевич, О.А. Коврова, И.М. Кашлев // *Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: Материалы Всероссийского науч. - техн. совещания.* – Санкт - Петербург: С-ПтТИ, 1998. – С. 59 – 65.

3. Полях, О.А. Физико-химические процессы пылеобразования при выплавке ферросилиция / О.А. Полях, Г.В. Галевский, Н.Ф. Якушевич [и др.]. // *Сб. науч. тр.: Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии.* – Новокузнецк: СибГИУ, 1999. - Вып. 8.- С. 41-45.

УДК 666.792.22

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОКОРУНДА МАРКИ ЭХН

Сюльдина С.А., Полях О.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

Электрокорунд (оксид алюминия) – тугоплавкий абразивный материал, область применения которого довольно широка. Потому не удивительно, что все чаще встает вопрос о совершенствовании производства данного компонента. В работе будет рассмотрен конкретный образец - электрокорунд марки ЭХН, однако можно предположить, что рассмотренные технические мероприятия по совершенствованию производства могут быть применены и к другим маркам.

Ключевые слова: электрокорунд, совершенствование применения, способы производства, технические мероприятия.

Современная промышленность, характеризующаяся высокой энергоемкостью, является важной частью экономики Российской Федерации. Первостепенная роль в оптимизации производства мощным технологическим оборудованием отводится разработке более совершенных способов производства, полученных при изучении параметров технических характеристик производственных материалов на основе энергоаудита на крупных промышленных предприятиях. Это позволяет отслеживать весь процесс производства.

Относительно тугоплавких абразивных материалов также есть ряд возможных путей совершенствования производства.

Корунд – очень тугоплавкий материал. Температура его конденсации намного выше, чем у большинства других минералов, имеющих значение в современном производстве. При давлениях ~10-9 бар и температуре выше 850 °С, корунд уже стабилен, в то время как силикаты конденсируются в ос-

новном ниже 826.85 °С. Электрокорунд – это искусственно созданный тугоплавкий материал, который имеет другие значения, которые не только определяют его значимость, но и высокую стоимость получения.

Электрокорунд – это твердый кристаллический α -оксид алюминия (Al_2O_3), с которым может сравниться только алмаз, что и позволило широко распространить этот тугоплавкий материал в самых различных отраслях.

Нанокристаллический электрокорундовый абразив широко используется в шлифовальных материалах благодаря своей твердости, низкой скорости износа, самозатачиванию и длительному сроку службы. В настоящее время сообщается, что добавки и затравки широко используются для контроля требуемой тонкой кристаллической структуры корундовых абразивов в процессе синтеза.

Ключевой проблемой электрокорундов является стоимость их получения, потому необходимо выяснить, возможно ли ее снизить и за счет чего.

Для стандартного электрокорунда характерны два типа микроструктуры. Первый тип имеет гипидиоморфную структуру и сопутствующие фазы заполняют промежутки между кристаллами корунда. Второй тип корунда представлен крупными «полями», диаметр которых достигает нескольких миллиметров; сопутствующие фазы присутствуют в виде примесей в теле корундовых «полей».

Электрокорунд марки ЭХН имеет микроструктуру второго типа, но отличается дендритной формой и значительным объемом полостей.

Для этого исследования использовалась застеклованная связка с температурой спекания в диапазоне 850–1100 °С. Образцы для испытаний прошли термообработку: абразивы спекали при 850 °С, 900 °С, 950 °С, 1000 °С, 1050 °С и 1100 °С в течение 2 ч в воздушной печи. При этом влияние термической обработки оказывало прямое воздействие на изменение механических свойств и микроструктуры двумерных нанокристаллических корундовых абразивов.

Таким образом, абразивы электрокорунда марки ЭХН со связкой и без нее прокаливались при различных температурах термической обработки. При нагревании все полиморфы претерпевают фазовые переходы к термодинамически наиболее стабильной форме, а именно к корунду.

Результаты показали, что условия термической обработки оказали очевидное влияние на размер кристаллов и механическую прочность электрокорундовых абразивов. Размер кристаллов увеличивался с повышением температуры прокаливания, и рост кристаллов образца с присутствием связи был более заметным, чем без связи. И оказалось, что 950 °С – критическая температура аномального роста кристаллов электрокорундовых абразивов в условиях нагретой обработки. За пределами этой критической температуры размер кристаллов увеличивался, а прочность и износостойкость абразива уменьшались. В этом случае деградация абразива по микроструктуре и прочности должна быть важным фактором при подготовке электрокорундового абразивного инструмента.

Можно предположить, что при условии сокращения энергозатрат на получение стойкого материала, будет достигнуто и снижение стоимости самих работ, что является крайне перспективным направлением для дальнейшей поисковой деятельности. Так же, по мнению различных исследователей, при условии использования инновационных технологий, основанных на принципах энергосбережения и оптимизации затрат, можно получить новую систему производства, которая позволит повысить рентабельность процесса производства электрокорунда.

Можно обобщить и отметить, что для оптимизации производства электрокорунда марки ЭХН, необходимо провести следующие мероприятия: модернизировать само производственное оборудование, оснастив его энергосберегающими технологиями, использовать отработанные или вторичные энергоресурсы в ходе производственного процесса, применение теплоизоляционных материалов, а так же минимизация самих энергозатрат.

Следовательно, оптимизировать технические мероприятия по производству электрокорундов можно за счет отслеживания температурного режима и недопущения превышения температуры выше 950 °С. Безусловно, соблюдение температурного режима – только малая часть налаживания производства, однако, даже ее реализация требует тщательного контроля и соблюдения всех норм реализации технических мероприятий.

Библиографический список

1. Богданов, С.М. Способ плавки электрокорунда / С.М. Богданов // Инженерно-технологический центр. - 2022. - № 5. - С. 40-44.
2. Богданов, С.П. Бронекерамика на основе порошков корунда "ядро-оболочка" / С.П. Богданов, А.П. Гаршин, М.М. Сычев // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. XI Междунар. симпозиума : в 2 ч. (г. Минск, 10-12 апреля 2019 г.). - Минск: ИД «Белорусская наука», 2019. - Ч. 1. - С. 424-430.
3. Витюгин, В.М. Исследование влияния предварительной термической обработки сырьевой шихты на процесс образования хромистого электрокорунда / В.М. Витюгин, В.В. Кояин, В.И. Верецагин, Г.Ф. Иванов, Н.И. Поддубняк. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-predvaritelnoy-termicheskoy-obrabotki-syrievoy-shihty-na-protsess-obrazovaniya-hromistogo-elektrokورونا>.
4. Гаврилюк, В.П. Референции электрокорунда / В.П. Гаврилюк. - URL: <https://patents.google.com/patent/RU2171225C1/ru>.
5. Паляницын, П.С. К вопросу ресурсо- и энергосбережения в производстве корунда / П.С. Паляницын, П.А. Петров, В.Ю. Бажин // Вестник ИрГТУ. - 2020. - № 6 (155). - С. 1347-1357.
6. Филоненко, Н.Ю. Микроструктура электрокорунда / Н.Ю. Филоненко, И.В. Лавров. - URL: <https://doi.org/10.1007/BF01291948>.
7. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide // <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>.

2015.10.090.

8. Peretyatko, M.A. The study of heat transfer during boiling process of organic fluid / M.A. Peretyatko, P.V. Yakovlev, S.A. Peretyatko, A.S. Deev, G.V. Dyachenok // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - Vol. 1614. - URL: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012069>

9. Rashad, A.M. Vermiculite as a construction material - a short guide for civil engineer / A.M. Rashad. - URL: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>.

10. Węglewski, W. The Influence of Electrocorundum Granulation on the Properties of Sintered Cu / W. Węglewski, K. Pietrzak, A. Strojny-Nędza. - URL: Electrocorundum Composites. DOI:10.2298/SOS1503249S.

УДК 622.741.355

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА С УВЕЛИЧЕНИЕМ ОБЪЕМА КАМЕРЫ ТУШЕНИЯ

Ядыкина М.А., Полях О.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafcmet@sibsiu.ru*

В данной работе рассматривается разработка технических мероприятий по модернизации установки сухого тушения кокса с целью увеличения объема камеры тушения. Современные требования к эффективности и экологичности процесса тушения кокса обуславливают необходимость поиска новых технических решений и модернизации существующих установок. В работе представлены результаты анализа проблем, связанных с технологическим процессом сухого тушения кокса, а также предлагаются методы оптимизации и улучшения данного процесса.

Ключевые слова: сухое тушение кокса, модернизация, установка, камера тушения, технические мероприятия, эффективность, экологичность, безопасность, конструкция, технологический процесс, оптимизация.

Сухое тушение кокса является наиболее распространенным и экологически безопасным методом тушения кокса. Однако существующие технологические процессы сухого тушения кокса могут быть существенно улучшены, чтобы повысить эффективность и экологичность процесса. В данной работе представлены результаты анализа проблем, связанных с технологическим процессом сухого тушения кокса, а также предлагаются методы оптимизации и улучшения данного процесса.

Одни из главных проблем технологического процесса сухого тушения кокса связаны с недостаточным объемом камеры тушения и низкой скоростью процесса тушения. Недостаточный объем камеры может быть вызван ограниченным пространством на производственной площадке или непра-

вильным расчетом при проектировании. В результате, возникает проблема перегрузки камеры тушения, что снижает эффективность процесса.

Низкая скорость тушения кокса в свою очередь, может быть связана с неправильным подбором технологического оборудования или нарушением режима работы. Это может привести к снижению качества продукции, а также увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Таким образом, вышеупомянутые факторы приводят к увеличению времени процесса тушения кокса, что ведет к повышению затрат на энергию. Значительное увеличение времени процесса может сказаться на производственном плане, так как возникает необходимость задержки выпуска готовой продукции.

Кроме того, в некоторых случаях, из-за этих проблем возможно неполное тушение кокса. Неполное тушение кокса может привести к образованию твердых шлаковых отложений на поверхности кокса, что затрудняет его дальнейшую обработку и ухудшает качество продукта. В свою очередь, это может привести к снижению эффективности производственного процесса и увеличению экологической нагрузки.

Для решения указанных проблем важно проводить оптимизацию технологического процесса сухого тушения кокса, пересматривать размеры камеры тушения и использовать более современное оборудование для увеличения скорости тушения. Это позволит повысить производительность процесса, снизить затраты на энергию и уменьшить экологическую нагрузку [1].

Методы оптимизации технологического процесса сухого тушения кокса

Основным фактором, определяющим эффективность процесса тушения, является объем камеры тушения. Была проведена комплексная оценка существующих камер тушения, что позволило выявить ряд недостатков и области для улучшения. В результате разработки новых конструктивных решений камеры тушения был предложен ряд модификаций, таких как:

- изменение геометрии камеры, обеспечивающее оптимальное распределение инертного газа и тепловых потоков, что улучшает качество тушения кокса и сокращает время процесса;

- разработка модульных систем для увеличения объема камеры тушения, что позволяет адаптироваться к изменениям в объеме производства и предотвращает перегрузку камеры.

- В ходе анализа технологического процесса сухого тушения кокса было определено, что текущие режимы работы установки могут быть улучшены для достижения более высокой эффективности процесса. В частности, были предложены следующие меры:

- определение оптимальных параметров процесса (температура, давление, расход инертного газа) на основе математического моделирования и экспериментальных исследований, что позволяет оптимизировать процесс тушения;

– разработка алгоритмов управления установкой, обеспечивающих автоматическую регулировку параметров процесса в соответствии с текущими условиями и требованиями производства, что повышает стабильность и эффективность тушения кокса [2].

Для дополнительного улучшения технологического процесса сухого тушения кокса было предложено применение новых технологий и материалов. В частности, использование теплоизоляционных материалов и эффективных газоотводящих систем способствует снижению выбросов в атмосферу и минимизации тепловых потерь в процессе тушения. Эти инновационные решения позволяют улучшить экологичность процесса и повысить его энергетическую эффективность [3].

Заключение

Предложенные методы оптимизации технологического процесса сухого тушения кокса обеспечивают повышение эффективности и экологичности данного процесса. Реализация этих методов позволит модернизировать существующие установки сухого тушения кокса, а также разрабатывать новые технические решения для повышения производительности и устойчивости коксохимической промышленности. В результате внедрения предложенных решений ожидается снижение затрат на энергию, улучшение экологической безопасности и повышение качества процесса тушения кокса.

В дальнейших исследованиях планируется провести анализ экономической эффективности предложенных методов оптимизации и разработать дополнительные рекомендации для повышения энергетической эффективности и экологичности процесса сухого тушения кокса. Кроме того, возможно развитие новых направлений в исследованиях, связанных с применением инновационных материалов и технологий, которые могут дополнительно улучшить технологический процесс тушения кокса и обеспечить его долгосрочную устойчивость и конкурентоспособность.

Оптимизация технологического процесса сухого тушения кокса является актуальной и важной задачей для коксохимической промышленности. Предложенные методы оптимизации, основанные на увеличении объема камеры тушения, улучшении режимов работы установки и внедрении новых технологий и материалов, позволяют повысить эффективность и экологичность данного процесса, что в свою очередь способствует устойчивому развитию коксохимической отрасли. Также, успешная оптимизация технологического процесса сухого тушения кокса может укрепить конкурентоспособность предприятий на рынке, обеспечивая высокое качество продукции при минимальных затратах и негативном воздействии на окружающую среду.

Библиографический список

1. Алексеев, Д.И. Новый критерий оптимизации качества кокса и параметров шихты / Д.И. Алексеев, А.Н. Смирнов // Кокс и химия. – 2021. - № 64. – С. 552–557.
2. Писаренко, М.В. Перспективы добычи коксующихся углей / М.В.

Писаренко М.В., С.В. Шаклеин // Кокс и химия. – 2022. - № 65. – С. 427–432.

3. Ульева, Г.А. Производство спецкокса для электропечного производства высококремнистых сплавов / Г.А. Ульева // Кокс и химия. – 2022. - № 65. – С. 595–601.

УДК 669.054.669.715

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ИЗ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Новиков А.М., Поливко А.С., Усольцев А.А., Князев С.В., Кибко Н.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru*

Показана целесообразность применения новых технологий в производстве вторичных алюминиевых сплавов и металлоизделий из них. В их числе тиксо- и реолитые, жидко-твердая формовка изделий, а также производство композиционных алюмоматричных материалов, в том числе пористых, вакуумной пропиткой пористой среды.

Ключевые слова: вторичные алюминиевые сплавы, тиксоформинг, высокопрочные алюминиевые сплавы, жидко-твердая формовка, микроструктура, свойства, композиционные материалы с алюминиевой матрицей.

Важной отличительной особенностью алюминия является способность к рециклингу: полученный из руды алюминий может неоднократно без потери свойств переплавляться в виде лома изделий, превращаясь во вторичные сплавы, успешно заменяющие первичный алюминий с экономией 95 % энергии, требующейся для производства металла из руды [1].

Экономическая ситуация настоящего времени заключается в развитии собственного машиностроения с широким использованием в отечественной продукции алюминиевых сплавов и возрождению металлургии вторичного алюминия в стране. При этом важно переводить технологии производства вторичного алюминия на качественно другой уровень, позволяющий производить новые композиции сплавов и изделий из вторичного алюминия более высокого класса, что существенно повысит экономическую эффективность рециклинга в целом [1].

Производство вторичного алюминия в силу меньших энергетических затрат и существенно меньших, чем при производстве первичного металла, выбросов вредных веществ в окружающую природную среду, будет возрастать. По прогнозам доля вторичного алюминия в общем потреблении к 2030 году может возрасти до 22 – 24 млн. т. в год [2].

Анализ мирового опыта показывает, что уже в настоящее время существуют методы эффективного управления процессами структурообразования сложных, в том числе вторичных алюминиевых сплавов [1].

Представление о возможных способах управления процессами, проте-

кающими в формообразующей оснастке в интервале затвердевания сплавов изменило развитие ТНХО-технологий и позволило сформулировать новую идею управления формированием кристаллического строения отливок, получившую сегодня обобщающее наименование «тиксформирование» (Semi Solid Processing, Thixoforming) [6]. Под этим термином объединяются тиксо- и реолитые, тиксо- и реоштамповка, тиксо- и реомолдинг, новое реолитие и др., которые сегодня уже рассматриваются как новые технологии производства точных отливок и штамповок из высокопрочных алюминиевых сплавов для изделий ракетно-космической техники [3,7].

На рисунке 1, а (данные фирмы Vforge, США) представлены показатели качества новых технологий. По всем изученным показателям тиксоштампованные и реолитые заготовки превосходят заготовки, изготовленные традиционными методами. Одновременно они конкурентоспособны по экономическим показателям (рисунок 1, б).

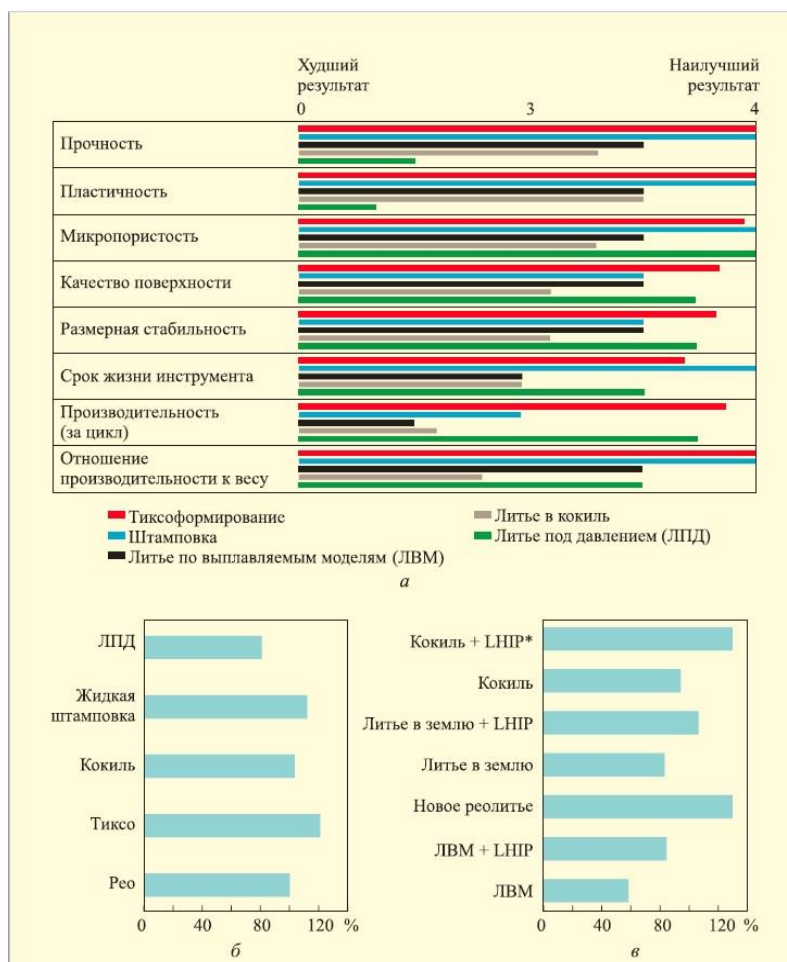


Рисунок 1 – Преимущества тиксоформирования в сравнении с другими технологическими процессами получения фасонных отливок в баллах (а); относительная стоимость производства фасонной заготовки, % [4] (б); относительная усталостная прочность сплава АК7 в отливке, % [4] (в) (ЛНП – Liquid hot isostatic pressing, горячее изостатическое прессование в жидкости)

Работы по тиксоштамповке деформируемых сплавов в нашей стране проводятся впервые, но могут дать очень важные результаты для производства перспективных изделий для ракетно-космической и авиационной техники, других отраслей машиностроения в условиях массового производства. Из алюминиевых сплавов производят фасонные заготовки многих деталей ракетной техники [4,5].

Морфологию дендритов можно кардинально изменить за счет перемешивания затвердевающего расплава (нагретого до температуры между ликвидусом и солидусом), в частности, в процессе литья цилиндрического слитка-заготовки. При перемешивании расплава над фронтом затвердевания растущие ветви дендритов смываются движущимся расплавом, твердые частицы становятся зародышами кристаллизации уже в объеме расплава, а дальнейший рост частиц твердого раствора происходит не по дендритному типу. В результате такого механизма затвердевания структура твердого сплава состоит из частиц «вырожденных» дендритов, окруженных эвтектикой. При нагружении сплава с такой структурой, называемой тиксотропной, при температуре между ликвидусом и солидусом происходит проскальзывание частиц твердого раствора по жидкой эвтектике без разрушения частиц. В то же время частицы твердого раствора образуют своеобразный скелет или каркас, что позволяет сохранять форму заготовки для выдавливания в пресс-форму в жидко-твердом состоянии. Выдавливание сплава в пресс-форму не требует больших усилий, поскольку скольжение идет по жидкой фазе. В силу высокой вязкости сплава в жидко-твердом состоянии в процессе заполнения пресс-формы не происходит захлопывания пузырей, заворотов оксидных плен и других нежелательных явлений, свойственных практически всем известным способам литья фасонных изделий [1-9].

По своей сути процесс жидко-твердой формовки (ЖТФ) изделий включает два этапа [1]:

- получение цилиндрического слитка-заготовки из алюминиево-кремниевого сплава с тиксотропной недендритной структурой;
- собственно формовка фасонных изделий в жидко-твердом состоянии сплава выдавливанием заготовки из контейнера в пресс-форму.

Цилиндрический слиток из сплава Al–7 % Si–0,5 % Mg с тиксотропной структурой был получен литьем в кристаллизатор с тепловой насадкой и магнитогидродинамическим перемешиванием затвердевающего расплава на обычной литейной машине.

Слиток определенного диаметра разрезали на заготовки, объем которых соответствовал объему готового изделия. Заготовки нагреваются в индукционной печи до температуры 595 °С в течение 25–30 с, переносятся в контейнер пресса, соединенный каналом с пресс-формой, и выдавливаются в пресс-форму, рабочая полость которой соответствует форме готового изделия.

После формовки и отрезки пресс-остатка изделие подвергают термической обработке по режиму Т6 (закалка на твердый раствор с последующим искусственным старением) [1,3].

Свойства изделий, полученных методом ЖТФ, определяются двумя факторами: качеством слитков-заготовок для ЖТФ и качеством, формируемым на стадии ЖТФ изделий. При этом комплекс механических свойств имеет более высокий уровень, чем у изделий, полученных по традиционной технологии [1,3].

Представляет интерес получение композитных изделий из вторичного алюминия.

Исследованиям и разработке металломатричных композиционных материалов (МКМ) уделяется значительное внимание практически во всех экономически развитых странах благодаря комплексу их технологических свойств, в том числе, как «носителя» состава, спланированных комплексов лигатур и модификаторов, при разработке новых конструкционных материалов, которые могут быть получены в этом классе материалов и которые труднодостижимы в материалах, получаемых с использованием традиционных технологий. Предлагаемый способ получения МКМ методом вакуумной пропитки (всасывания) матричного сплава через пористый сыпучий наполнитель, получение пористой преформы и дальнейшая ее пропитка легкоплавким наполнителем, обеспечивает возможность его промышленного серийного применения и прост в реализации, а также удешевляет получаемый с их помощью продукт и снижает расход дефицитных и дорогостоящих конструкционных материалов [10-15].

Способ получения пористого алюминия вакуумным просасыванием пористого наполнителя основывается на методе экзотермической пропитки жидким алюминием водорастворимого наполнителя за счёт перегрузок, создаваемых вакуумом. Технология получения пористых отливок методом пропитки удаляемого наполнителя обеспечивает получение однородной и прогнозируемой структуры. Использование в качестве наполнителя водорастворимых солей позволяет формировать структуру пор, благоприятную для фильтрации и конкурировать с пористыми металлами, изготовленными методами порошковой металлургии (рисунок 2).



Рисунок 2 - Пористая заготовка-преформа из матричного алюминиевого сплава

Библиографический список

1. Борисов, В. Г. Эффективные технологии для вторичных алюминиевых сплавов / В. Г. Борисов, Г. А. Косников // Технология легких сплавов. – 2022. – № 2. – С. 53-64. – DOI 10.24412/0321-4664-2022-2-53-64. – EDN VLZCIC.
2. Трусов, В. А. Инновационные технологии в производстве вторичных алюминиевых сплавов / В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин, Е. П. Селиванов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2011. – Т. 1. – С. 380-383. – EDN NVVFOZ.
3. Борисов, В. Г. Технология получения слитков из алюминиевых сплавов с недендритной тиксотропной структурой / В. Г. Борисов // Металлург. – 2008. – № 11. – С. 99-102. – EDN KTVFCH.
4. Б.И. Семенов, Бинь Нго Тхань, А.Б. Семенов. Тиксоформирование фасонных деталей из алюминиевых сплавов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 3.
5. Нго Тхань Бинь, Н.А. Джиндо, А.Б. Семенов, Б.И. Семенов Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012, с. 148-165.
6. Технология получения отливок из сплава 30ХГСЛ / Р. О. Мамедов, А. Е. Долгополов, А. В. Дмитриенко [и др.] // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года. Том ЧАСТЬ II. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2018. – С. 184-187. – EDN OTZRNL.
7. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердотелом состоянии. Новые промышленные технологии. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 223 с.
8. Косников Г.А., Колесов С.С. О возможности расширения номенклатуры алюминиевых сплавов для тиксоформовки // Литейщик России. 2007. № 4. С. 28-31.
9. Шмитц К. Рециклинг алюминия. Справ. рук-во / Пер. с англ. под ред. Макарова Г.С. М.: АЛЮСИЛ МВиТ, 2008. 528 с.
10. Князев, С. В. Наноматериалы на основе пористых литых металлов и способ их ввода в расплав / С. В. Князев, А. А. Усольцев, А. И. Куценко // Литейное производство. – 2019. – № 9. – С. 5-7. – EDN MGAZIW.
11. Мелкосерийное производство литых пористых и композиционных материалов / С. В. Князев, А. А. Усольцев, А. И. Куценко [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 23–24 октября 2019 года / Под редакцией Е.В. Протопопова. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 152-158. – EDN XOUBRP.
12. Князев, С. В. Новая технология ввода наноматериалов в расплав на

основе использования пористых литых материалов / С. В. Князев, А. А. Усольцев, А. И. Куценко // Инновационные технологии в литейном производстве : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 22–23 апреля 2019 года / Под общей редакцией К.А. Батышева, К.Г. Семенова. – Москва: Московский государственный областной университет, 2019. – С. 61-65. – EDN HFTMMS.

13. Small-scale production of cast porous and composite materials / S. V. Knyazev, A. A. Usoltsev, A. I. Kutsenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 21, Technologies, Innovation, Quality, Novokuznetsk, 23–24 октября 2019 года. – Novokuznetsk, 2020. – P. 012013. – DOI 10.1088/1757-899X/866/1/012013. – EDN UZAFQD.

14. Исследование технологических схем получения литых композиционных функциональных материалов / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 11. – С. 1156-1160. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-11-1156-1160. – EDN GPXFIQ.

15. Технологии получения литых композиционных функциональных материалов для металлургии / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 159-162. – EDN YSCRWB.

УДК 669.054.669.715

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Васильева И.С., Оськин А.И., Князев С.В., Усольцев А.А., Кибко Н.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru*

Показана целесообразность применения новых технологий в производстве металлоизделий из алюминиевых сплавов с новым набором свойств и функционального назначения. В том числе производство композиционных алюмоматричных материалов вакуумной инфильтрацией расплавами пористой среды.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, высокопрочные алюминиевые сплавы, микроструктура, пористый алюминий, свойства, композиционные материалы с алюминиевой матрицей.

Представляет интерес получение пористых изделий из вторичного

алюминия. Пористые алюминиевые сплавы, по сравнению с другими материалами имеют ряд достоинств:

- высокая удельная прочность;
- высокая теплопроводность и коррозионная стойкость;
- низкий удельный вес.

Способ получения пористого алюминия вакуумным просасыванием пористого наполнителя основывается на методе экзотермической пропитки жидким алюминием водорастворимого наполнителя за счёт перегрузок, создаваемых вакуумом. Технология получения пористых отливок методом пропитки удаляемого наполнителя обеспечивает получение однородной и прогнозируемой структуры. Использование в качестве наполнителя водорастворимых солей позволяет формировать структуру пор, благоприятную для фильтрации и конкурировать с пористыми металлами, изготовленными методами порошковой металлургии (рисунок 2).

Технология получения пористого алюминиевого литья представляет собой пропитку водорастворимого наполнителя в металлической форме (кокиле) вакуумным всасыванием с последующим извлечением наполнителя растворением. В качестве наполнителя применяется соль NaCl. Технология характеризуется относительной простотой по сравнению с другими методами производства пористых металлов в сочетании с возможностью изготовления изделий практически любой формы и размеров. В настоящее время наибольшее количество применений материала – фильтрация жидкостей и газов, снижение шума в пневматике, защита датчиков. Перспективные области применения – теплообмен в автомобилестроении, демпфирование ударных нагрузок, пневмотранспорт, конструкционный материал. При массовом производстве цена продукции сопоставима со стоимостью пеноалюминия, и намного ниже, чем у порошковой металлургии. Материал обладает выгодным сочетанием механических, физических и различных специальных свойств, что определяет разнонаправленность областей применения материала.

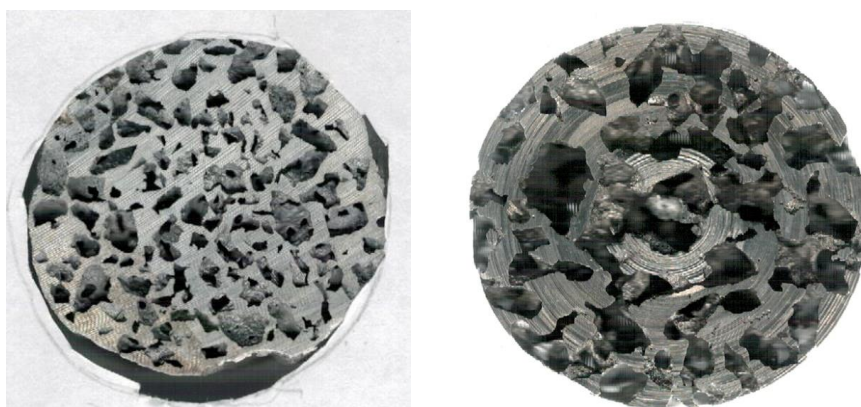


Рисунок 1 - Пористые заготовки- преформы из матричного алюминиевого сплава с размером пор 1 и 5 мм

Исследованиям и разработке металломатричных композиционных материалов (МКМ) уделяется значительное внимание практически во всех экономически развитых странах благодаря комплексу их технологических свойств, в том числе, как «носителя» состава, спланированных комплексов лигатур и модификаторов, при разработке новых конструкционных материалов, которые могут быть получены в этом классе материалов и которые труднодостижимы в материалах, получаемых с использованием традиционных технологий. Предлагаемый способ получения МКМ методом вакуумной пропитки (всасывания) матричного сплава через пористый сыпучий наполнитель, получение пористой преформы и дальнейшая ее пропитка легкоплавким наполнителем, обеспечивает возможность его промышленного серийного применения и прост в реализации, а также удешевляет получаемый с их помощью продукт и снижает расход дефицитных и дорогостоящих конструкционных материалов [1-6].

Получение МКМ вакуумной инфльтрацией армирующего дисперсного наполнителя алюминиевым расплавом при изотермической пропитке позволяет гарантированно избежать неполного образования композиционной литой заготовки вследствие недостаточной жидкотекучести расплава в капиллярных зазорах наполнителя.

При объемном содержании расплава в композите 38 % (уплотнение наполнителя производилось вибрацией) увеличение цельнометаллической части отливки не приводит к выведению в нее усадочной раковины. Высокая скорость теплопередачи на кокиль приводит к разделению отливки на зоны питания. При значительных размерах прибыльной части отливки в ней формируется усадочная раковина, возможно открытая, другая раковина формируется в композите. При малых размерах прибыльной части отливки граница раздела зон питания проходит по композиционной части отливки, в ней формируются две отдельные усадочные раковины. Усадочная раковина формируется в композиционной части отливки вблизи границы с прибыльной частью независимо от соотношения их размеров. При объемном содержании расплава в композите 45 %, благодаря большей доле расплава выделяется больше скрытой теплоты кристаллизации (которая у алюминия весьма значительна), и теплопроводность композита увеличивается, что обеспечивает при значительном размере прибыльной части полный вывод усадочной раковины в прибыль. Однако добиться объемной доли расплава 45 % можно, только используя наполнитель осколочной формы, что неблагоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах готового изделия. Максимальная доля глобулярного наполнителя в условиях свободной засыпки составляет около 42 % [1-6].

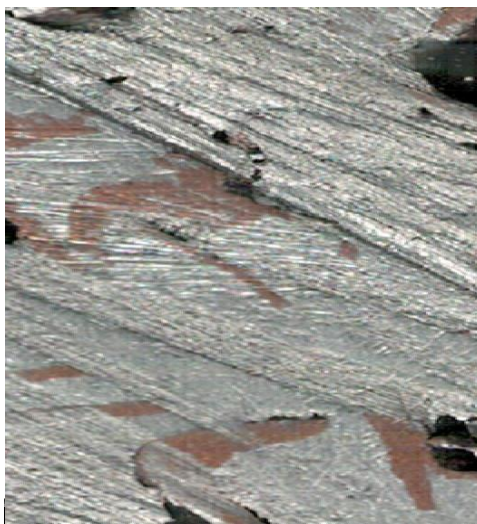


Рисунок 2 - МКМ с алюминием (матричный материал) и медью (формообразованный пористый наполнитель)

Получение МКМ вакуумной инфильтрацией пористой литой заготовки расплавами. Движение жидкости в пористой среде называют фильтрацией. Под пористой средой понимают почвы, грунты, горные породы и другие материалы, частицы которых неплотно прилегают друг к другу, образуя связанные между собой пустоты (поры), через которые происходит движение жидкости. Вследствие небольших сечений пор, фильтрационные потоки, как правило, относятся к ламинарным. Всякая реальная пористая среда имеет случайную микроструктуру, поэтому невозможно определить распределение истинных скоростей жидкости в порах и приходится ограничиваться рассмотрением их определенных характеристик.

Применительно к технологии получения пористых литых материалов, пористость литого алюминия возможна в интервале от 50 до 70 %.

Относительно к разработкам в области технологии приготовления лигатур в виде композитов на тугоплавкой основе для цветных сплавов и раскислителей для сталей, способ включает объединение твердого наполнителя с расплавом активного металлического связующего, алюминия и его сплавов. При этом из материала наполнителя, сначала формируют пористую заготовку заданной геометрической формы с технологическим суммарным объемом пор, затем нагревают ее до температуры, соответствующей температуре ликвидуса активного связующего, причем нагрев ведут в газовой инертной среде, после чего для объединения наполнителя со связующим нагретую заготовку пропитывают расплавом этого связующего путем принудительной инфильтрации расплава в поры заготовки под воздействием вакуума, преимущественно [1-6].

Способ прост, универсален, производителен, т.к. обеспечивает короткий цикл изготовления, не требует сложного специального оборудования для его осуществления, соответствует современному требованию гибкости производства, позволяет с незначительными капитальными вложениями наладить серийное или мелкосерийное производство в

рамках мелкого и среднего бизнеса.

Короткий цикл получения композита без использования относительно высоких температур позволяет свести к минимуму физико-химическое взаимодействие наполнителя и связующего и тем самым повысить скорость и полноту освобождения связующего, степень участия активного составляющего, а возможность получения композита при невысоких температурах допускает использование в качестве активного связующего дешевых вторичных алюминиевых, магниевых, медных, свинцовых, цинковых или на основе олова сплавов.



Рисунок 3 - Пористая заготовка- преформа из матричного алюминиевого сплава с размером пор 5 мм пропитанная расплавом цинка

Получение МКМ вакуумной инфильтрацией пористой литой заготовки ультра и нано порошками включает в себя несколько этапов:

1. Получение пористой заготовки из маточного сплава с заданными параметрами пористости.
2. Заполнение пор пористой заготовки наночастицами.
3. Ввод пористой заготовки с наночастицами в жидкий расплав в плавильную печь для получения кускового модификатора (лигатуры) и последующего модифицирования (легирования) с его помощью требуемых литейных сплавов.

Технология обеспечивает:

- равномерность распределения частиц наноматериалов во всем объеме расплава;
- контролируемую концентрацию наноматериалов в жидком расплаве;
- низкое количество оксидных пленок и шлаков в теле литой заготовки;
- не требует дополнительных технологических приемов для ввода модификатора (лигатуры) непосредственно в расплав.

Предлагаемая технология ввода наноматериалов в расплав – это технология ввода модификатора как в печь, так и в ковш, которая практически не изменяет существующую организационно-

производственную структуру литейного цеха и не требует серьезных капитальных затрат на ее внедрение. Технология также применима для ввода в расплав ультра- и мелкодисперсных или иных специфических материалов.

Также предлагаемый способ модифицирования противодействует явлению увядания инокулирующего эффекта в процессе выдержки расплава в ковше перед заливкой формы, что увеличивает технологический цикл живучести расплава.

С точки зрения фундаментальных основ литейного производства требуют изучения такие вопросы как наследственное влияние шихты, подвергнутой наномодифицированию, на свойства литейных сплавов; изучение склонности сплавов к наследованию структуры на базе теории генной структурной информации шихтовых материалов; разработка теоретической модели создания высокоэффективных композиций модификаторов и лигатур для литейных сплавов [1-6].

Библиографический список

1. Князев С.В. Наноматериалы на основе пористых литых металлов и способ их ввода в расплав / С.В. Князев, А.А. Усольцев, А.И. Куценко // Литейное производство. – 2019. – № 9. – С. 5-7. – EDN MGAZIW.

2. Мелкосерийное производство литых пористых и композиционных материалов / С.В. Князев, А.А. Усольцев, А.И. Куценко [и др.] // Metallurgia: технологии, инновации, качество : Труды XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк / Под редакцией Е.В. Протопопова. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 152-158. – EDN XOUBRP.

3. Князев С.В. Новая технология ввода наноматериалов в расплав на основе использования пористых литых материалов / С.В. Князев, А.А. Усольцев, А.И. Куценко // Инновационные технологии в литейном производстве : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 22–23 апреля 2019 года / Под общей редакцией К.А. Батышева, К.Г. Семенова. – Москва: Московский государственный областной университет, 2019. – С. 61-65. – EDN HFTMMS.

4. Small-scale production of cast porous and composite materials / S.V. Knyazev, A.A. Usoltsev, A.I. Kutsenko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 21, Technologies, Innovation, Quality, Novokuznetsk – Novokuznetsk, 2020. – P. 012013. – DOI 10.1088/1757-899X/866/1/012013. – EDN UZAFQD.

5. Исследование технологических схем получения литых композиционных функциональных материалов / С.В. Князев, А.И. Куценко, А.А. Усольцев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 11. – С. 1156-1160. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-11-1156-1160. – EDN GPXFIQ.

6. Технологии получения литых композиционных функциональных материалов для металлургии / С.В. Князев, А.И. Куценко, А.А. Усольцев [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 159-162. – EDN YSCRWB.

УДК 669.054.669.715

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

**Маракулина М.Ю., Зайцева М.М., Топоев А.А.,
Князев С.В., Усольцев А.А.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru*

Показана целесообразность применения новейших цифровых технологий в производстве металлоизделий различного функционального назначения, в том числе при изготовлении отливок и в сварке.

Ключевые слова: аддитивные технологии, свойства, литейная форма, наплавка, цифровизация, отливка, сварка.

Время информационных технологий определяет свои приоритеты, которые является обязательным условием построения конкурентоспособного производства и экономики. Повсеместное распространение цифровизации - один из базовых признаков новой экономики, нового типа социально-экономического устройства, постепенно формируемого в современном мире путем внедрения достижений научно-технического прогресса и инновационных методов хозяйствования, интеллектуализации и капитализации человеческих знаний, использования передовых новейших информационных и материальных технологий, ускоренного развития наукоемких отраслей экономики, становления творческого, эффективного, рационального информационно-материального производства. Цифровизация призвана в корне снизить затраты на производство и повысить производительность труда. В составе современных технологических векторов цифровизации процессов литейного и сварочного производства рассматриваются три основополагающих направления: компьютерный инжиниринг как современная база проектирования и функционирования технологических процессов; цифровые двойники; аддитивное производство [1-7].

В отличие от традиционных технологий формообразования, использование аддитивных технологий подразумевает построение объекта путем добавления слоя за слоем до получения готового изделия. Развитие аддитивных технологий позволило изготавливать изделия со сплошной твердофазной структурой. Аддитивные технологии делают возможным изготовление

деталей сложной геометрической формы, получение которых традиционными методами является невозможным. Помимо этого, аддитивные технологии позволяют сократить время получения готового продукта. Производство может быть начато сразу же, как изделие будет спроектировано. Таким образом, время с момента проектирования изделия до получения готовой детали может быть сокращено с нескольких недель до нескольких дней. Также использование аддитивных технологий позволяет снизить коэффициент использования материала и, тем самым, снизить стоимость производства [8].

Суть аддитивных технологий заключается в соединении материалов для создания объектов из данных 3D-модели слой за слоем. Этим они отличаются от обычных технологий производства, подразумевающих механическую обработку – удаление вещества из заготовки [9-12].

Аддитивные технологии классифицируют:

- по используемым материалам (жидким, сыпучим, полимерным, металлопорошковым);
- по наличию лазера; по способу фиксации слоя построения (тепловое воздействие, облучение ультрафиолетом или видимым светом, связующим составом);
- по способу образования слоя.

Аддитивное электродуговое выращивание – это инновационная технология, применяемая для производства крупногабаритных изделий из металла. Освоение данной технологии во всём мире началось относительно недавно, и Россия первая вступила в гонку развития метода электродугового выращивания, как одного из основных направлений аддитивных технологий в будущем.

Методика электродугового выращивания – это более развитый и сложно-контролируемый процесс наплавки металла плавящимся электродом. Наплавка металла это – процесс, при котором присадочный металл переносится с электродной проволоки в сварочную ванну, расплавляясь в электрической дуге, горящей между электродом и основным металлом. Горение дуги поддерживается сварочным аппаратом, называемым сварочным полуавтоматом. Процесс горения дуги в защитном газе и подача проволоки организуются через сварочную горелку. Процесс аддитивного электродугового выращивания требует высокого уровня роботизации и контроля движения сварочной горелки, поэтому в качестве системы, управляющей сварочной горелкой, следует выбрать шести осевого робота. Главное преимущество такой системы движения – одновременные: гибкость движения, большой объём пространства расположения головы робота, высокая точность движения и повторяемость одной координаты, обратная связь по столкновениям и грубым нарушениям процесса [10].

Лазерные технологии для печати металлом являются наиболее быстро развивающимся методом аддитивного производства. Их можно разделить на две группы: селективное лазерное плавление и прямое лазерное выращивание.

Селективное лазерное плавление (SLS) – технология изготовления

сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков. Сначала формируется равномерный слой порошка на подложке, а затем происходит плавление порошка при помощи мощного лазерного излучения. Данная технология 3D-печати металлом способна с успехом заменить классические производственные процессы [9,10].

Второй вид лазерной технологии аддитивного производства настолько новый, что пока не имеет устоявшегося названия: «прямое лазерное выращивание» (DMLS) или «гетерофазная лазерная порошковая металлургия». Суть его заключается в том, что металлический порошок подается через специальное сопло непосредственно в ту же область, куда подводится лазерный луч, образуя локальную ванну жидкого расплава. Этот процесс можно образно сравнить с работой струйного принтера для бумаги.

Технология дает возможность подачи нескольких видов металлических порошков в зону выращивания. Таким образом, можно создавать изделия с градиентными свойствами, например, одна часть детали может быть коррозионностойкой, а другая – жаростойкой.

Прямое лазерное выращивание позволяет значительно увеличить производительность производства. Например, корпус камеры сгорания для небольшого газотурбинного двигателя можно вырастить с нуля за три часа. Для сравнения – при использовании традиционных технологий на это уходит около двух недель. При этом результаты конструирования видны моментально, и вносить в них изменения можно сразу же. Благодаря этому в десятки раз ускоряется процесс проектирования и создания новой техники.

Электронно-лучевая плавка (EBM) является еще одной технологией аддитивного производства. Этот метод, по сути, практически не отличается от SLS/DMLS печати металлом. Единственное отличие заключается в том, что вместо лазерного луча плавление осуществляется при помощи электроимпульсов.

Технология печати методом электронно-лучевой плавки металлических порошков позволяет изготавливать детали практически любой сложности, даже совсем миниатюрные изделия размером 0,2-0,4 мм. Такой 3D-принтер сможет «напечатать» практически все: от лопаток турбин авиадвигателей до ювелирных изделий.

В мировой практике промышленные электронно-лучевые 3D-принтеры часто используют для производства остеоимплантов – искусственных имплантов костей. Для их построения используют сплавы титана и нержавеющей стали. В отличие от лазерных 3D-принтеров, электронно-лучевые принтеры могут использовать металлические порошки более крупной фракции, например 75-120 мкм.

Шероховатая поверхность вовсе не страшна остеоимпланту и даже может обеспечить лучшую срастиваемость в организме. При этом более крупные фракции металлических порошков дешевле по стоимости, и, как следствие, удешевляется процесс производства.

Еще одно преимущество электронно-лучевой плавки – это возмож-

ность получать готовые изделия без необходимости дополнительной термобработки в вакуумных печах, как при печати по технологии SLM. Сама печать происходит при высокой температуре в камере. В результате полного локального расплавления порошка детали обладают очень высокой плотностью, сравнимой с технологией литья.

Наиболее интересными и эффективными технологиями изготовления металлических изделий методами послойного нанесения материала являются следующие: WAAM (GMAW, PAW, CMT), DMD, LBDMD, EBAM. Проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM — Wire Arc Additive Manufacturing) является одной из аддитивных технологий, применяющих проволоку в качестве строительного материала. На данный момент различные исследовательские группы работают над усовершенствованием таких технологий проволочно-дугового аддитивного производства, как сварка металлическим электродом в газовой среде (GMAW), газозлектрическая сварка вольфрамовым электродом (GTAW) и сварка плазменной дугой (PAW) [11].

GMAW — это тип сварки, иначе называемый MIG/MAG-сваркой (дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа), который предполагает автоматическую подачу непрерывного твердого плавящегося электрода в защитной внешней газовой атмосфере.

При использовании данного типа сварки перенос металла осуществляется одним из четырех основных способов:

- крупнокапельный с короткими замыканиями дугового промежутка;
- крупнокапельный без коротких замыканий;
- перенос каплями среднего размера без коротких замыканий;
- струйный перенос.

Каждый из них имеет свои особенности. Электрод при таком типе сварки находится перпендикулярно поверхности изделия. Кроме того, существует также технология холодного переноса металла и низким потреблением тепла.

В процессах GTAW и PAW используют неплавящийся вольфрамовый электрод и дополнительный материал, подающийся в виде проволоки, для получения сварного шва. В отличие от GMAW, ориентация подачи проволоки в GTAW и PAW является переменной и влияет на качество наплавки, что делает процесс планирования наплавки более сложным.

Технология GTAW является, по сути, дуговой сваркой вольфрамовым электродом в инертном газе. В качестве инертного газа для создания защитной атмосферы часто используют гелий или аргон. Сплавление слоев подаваемого материала происходит благодаря нагреву материала электрической дугой между электродом и обрабатываемой деталью. Технология предполагает возможность сварки под давлением и использования сварочных металлов. Защитный газ подается через сварочный аппарат.

Сварка плазменной дугой (PAW) является модификацией газозлектрической сварки вольфрамовым электродом (GTAW). В данной технологии используется специальная фокусирующая насадка, благодаря которой получа-

ется более точная, тонкая и длинная электрическая дуга, чем в процессе GTAW-сварки. Благодаря сужающей насадке значительно возрастает напряжение дуги и, следовательно, степень ионизации газа.

Помимо повышения температуры самой дуги насадка фокусирует участок плазменной дуги с наибольшей температурой на узкой поверхности сварного шва, уменьшая ее рассеивание. В результате получается источник более концентрированного и мощного нагрева, существенно повышающий эффективность теплопередачи и позволяющий увеличивать скорость прохода.

Плазменная наплавка плавящимся электродом (плазма-МИГ) является перспективным процессом для послойного формирования металлических изделий. Этот гибридный процесс сочетает в себе два дуговых процесса: наплавку плавящимся электродом и плазменную наплавку [11,12].

Одновременное горение двух дуг: плазменной дуги и дуги с плавящегося электрода (МИГ дуги) является особенностью плазма-МИГ. При этом каждая дуга питается от собственного сварочного источника.

Способ плазма-МИГ применяется для сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов, разнородных материалов. Данный способ используется для сварки корпусов и ёмкостей, восстановительной и упрочняющей наплавки пресс-форм и клапанов и т.д. В качестве присадочных материалов применяют проволоки как сплошного сечения, так и порошковые [11,12].

Процесс плазма-МИГ со стержневым неплавящимся электродом отличается возможностью использования плазменной дуги прямой и обратной полярности, а также косвенной дуги. Процесс начинают с зажигания плазменной дуги с последующей подачей плавящегося электрода. При этом дуга с плавящегося электрода возбуждается самопроизвольно.

Основным барьером для внедрения аддитивных технологий в авиастроительной отрасли является ряд нерешенных проблем по обеспечению механических свойств и ресурсных характеристик материалов, точности формы и качества поверхности получаемых деталей, а также высокая стоимость и трудоемкость производства.

Одним из подходов к преодолению этих барьеров является создание гибридных технологий, представляющих сочетание процессов аддитивного выращивания деталей и различных видов механической и упрочняющей обработки с реализацией на основе робототехнических комплексов.

На текущий момент отечественные производства как оборудования для 3D-печати, так и расходников действительно основаны на зарубежной сырьевой и элементной базе. Что касается расходных полимерных материалов, то для 3D-печати очень важны их стабильные и неизменные свойства.

Аддитивное производство обладает рядом серьезных преимуществ по сравнению с обычными методами производства, при которых деталь тем или иным образом вытачивают из цельного куска металла.

Во-первых, можно полностью автоматизировать процесс аддитивного

производства от этапа проектирования до изготовления в различных САПР. Это минимизирует время производства и уменьшает человеческое участие при изготовлении каждой новой детали.

Во-вторых, аддитивное производство позволяет существенно снизить затраты материала для изготовления детали, что особенно важно при производстве компонентов из дорогостоящих металлов, таких как титан и никелевые сплавы.

Кроме того, аддитивные технологии позволяют осуществлять мелкосерийное производство деталей сложной формы, что совершенно невыгодно экономически при использовании традиционных технологий [11].

Библиографический список

1. Вопросы цифровой трансформации в литейном производстве / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // *Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 304-309. – EDN DMSDLH.*

2. Цифровизация в литейном производстве / А. К. Мурзин, В. С. Кокорин, Р. Е. Давыдыч, М. А. Морозов // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Том Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 261-266. – EDN AARALT.*

3. Кокорин, В. С. Цифровизация управления приготовлением формовочных смесей / В. С. Кокорин, А. А. Буркова, М. А. Морозов // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Том Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 252-257. – EDN OEKNTZ.*

4. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей / С. В. Князев, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, А. Р. Михно // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 10. – С. 1076-1080. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1080. – EDN AMYKQZ.*

5. Использование современных технологий 3D -моделирования для повышения эффективности литья по выплавляемым моделям / С. В. Князев, А. А. Усольцев, А. И. Куценко [и др.] // *Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XX Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 года. Том 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. – С. 205-208. – EDN ZUJOFB.*

6. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-мастер-

моделей (форм) и аддитивных технологий / Л. С. Ширяева, А. А. Куценко, К. В. Пономарева [и др.] // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая" : Конференция проходит при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Кемерово, 18–21 апреля 2017 года / Ответственный редактор Костюк Светлана Георгиевна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 36005. – EDN ZQVWVJ.

7. Князев, С. В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством / С. В. Князев // 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. 224-227. – EDN PAXWDI.

8. Панкратов, С. С. Применение сварочных аддитивных технологий для объемной наплавки сталей в условиях ЦЛТ САМГТУ / С. С. Панкратов, Д. А. Дунаев, С. С. Жаткин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 3(95). – С. 62-68. – DOI 10.37313/1990-5378-2020-22-3-62-68. – EDN НКУРВС.

9. Насевич, И. Р. Область применения 3d-принтеров в машиностроении / И. Р. Насевич, О. А. Прокофьева // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : материалы региональной научно-технической конференции, Калуга, 16 мая – 18 2019 года. Том 1. – Калуга: МГТУ, 2019. – С. 71-74. – EDN RSLEKV.

10. Землянская, Н. Б. Исследование перспектив развития рынка цифровых технологий в промышленности России / Н. Б. Землянская, М. В. Сазонова, Н. В. Алексеева // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. – 2020. – № 2. – С. 38-44. – DOI 10.18384/2310-6646-2020-2-38-44. – EDN USRXRT.

11. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков, Е. В. Матвеев, И. И. Безукладников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90-105. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.3.11. – EDN YGHHLV.

12. Витязь, П. А. Перспективы развития технологий и оборудования для аддитивного производства / П. А. Витязь, С. А. Чижик, М. Л. Хейфец // Инновационные технологии в машиностроении : Электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 19–20 апреля 2018 года / Полоцкий государственный университет; Под редакцией В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк: Учреждение образования «Полоцкий государственный университет» =Установа адукацыі "Полацкі дзяржаўны ўніверсітэт", 2018. – С. 36-40. – EDN XNFZED.

МОДЕРНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНОГО УЧАСТКА В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

**Щапина М.Е.¹, Акулина Н.В.¹, Киселев П.В.²,
Князев С.В.², Усольцев А.А.²**

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

Показана целесообразность и возможность применения старого смесеприготовительного оборудования после его глубокой модернизации и автоматизации системы дозирования и смешивания компонент формовочных смесей.

Ключевые слова: формовочная смесь, дозирование и смешивание, бегуны, физико-механические свойства, качество, литье.

На современном этапе развития машиностроения перед литейным производством стоит ряд первоочередных задач, которые можно сформулировать следующим образом [1-9]:

- Комплексное технологическое переоснащение стержневого производства с переходом на энергосберегающие процессы отверждения стержней.

- Переоснащение формовочных отделений литейных цехов с переходом на высокопроизводительное и энергосберегающее формовочное оборудование.

- Использование автоматизации процесса смесеприготовления при приготовлении формовочных и стержневых смесей.

Главная задача литейного производства – получить отливку, которая максимально соответствует требуемым параметрам.

Имеется ряд причин, которые в настоящее время вынуждают отечественных производителей литья проводить техническое перевооружение производства:

- потеря выгодных заказов, нестабильная загрузка производства - из-за невозможности производить качественное литье на имеющемся оборудовании;

- высокие затраты на ремонт изношенного оборудования, частые простои;

- высокие потери от брака, большой процент скрапа, большие затраты на доводку отливок, низкий выход годных отливок;

- невозможность снизить производственные затраты при имеющемся оборудовании;

Одно из наиболее физически изношенных и технологически устарев-

ших звеньев в отечественных литейных производствах – это смесеприготовительные отделения, которые являются одним из важнейших компонентов производства наиболее распространенного метода литья - в одноразовую песчано-глинистую форму.

При этом методе литья, по разным данным, 45-55 % неустранимых дефектов литья возникают из-за низкого качества формовочной смеси, 30-40 % - по вине металла, остальные причины - в процессах формовки, извлечения модели и других. Повышенный возврат металла увеличивает расход энергии, огнеупоров, модификаторов, затраты на доводку отливок, снижает производительность и значительно увеличивает производственные затраты.

Развитие и усовершенствование изготовления продукции в Литейном цехе АО ЕВРАЗ ЗСМК возможно двумя путями – это автоматизации и модернизации оборудования.

В настоящее время на смесеприготовительном участке литейного цеха расположены бегуны, устаревшей модификации, которые не могут обеспечить формовочными смесями в полном объеме:

- На бегунах модификации 116М2, 114М имеются весовые бункеры-дозирования, установленные на механической системе призм и рычагов. Весоизмерительные приборы УЦК-400-3В (П). На шкале прибора установлены контакты, замыкаемые стрелкой. Затвор разгрузки бункера-дозатора управляется пневмоцилиндром. Дозирование песка, отработанной смеси (горелой земли) с помощью дисковых дозаторов. Работа дискового дозатора: опытным путем установлено зависимость загружаемого количества материала от времени вращения диска.

- На бегунах модификации 1А12, в кол-ве 2 штук имеются весовые бункеры, установленные на механической системе призм и рычагов, и имеют затвор, управляемый пневмоцилиндрами. Под приемными бункерами находятся весовые дозаторы. Информация о весе выводится на аналоговые весоизмерительные приборы УЦК-400-3В(П) и ВБ-120. На шкале прибора установлены контакты, замыкаемые стрелкой.

Подготовленные материалы подаются в бункера хранения емкостью от 4 до 8 м³ и из них в весовой бункер, оснащенный затвором с пневматическим приводом.

Информация с датчиков о состоянии бункера-дозатора («бункер пуст», «заданный вес достигнут») анализируется схемой управления и индицируется на пульте оператора светодиодным индикатором. Периодическое наполнение дозирующего бункера до достижения заданного веса производится автоматически. Загрузка дозированной глины в бегуны производится по команде земледела с пульта управления.

Работа дозаторов горелой земли, регенерата и песка происходит аналогично, они отличаются большим объемом накопительных бункеров – от 4 до 8 м³. В бегунах происходит перемешивание компонентов с добавлением воды для образования готовой продукции – формовочной смеси.

Дозировка воды, жидкого стекла (плотность = 1,46-1,52г/см³), лигно-

сульфоната (плотность = 1,15-1,25г/см³), асбеста (порошка), древесных опилок, шамотного порошка на всех бегунах производится земледелом вручную с помощью мерной тары.

Производительность на одних бегунах 85-90 тонн в смену. Общее количество рецептов не менее 45 шт.

Для обеспечения формовочной смесью для изготовления крупнотоннажного литья мы предлагаем дополнительно установить вихревые смесители БелНИИлит.

Автоматизированные смесители предназначены для приготовления различных типов смесей. Смесеприготовительные комплексы предназначены для приготовления формовочных смесей. Они могут быть применены в литейной промышленности при приготовлении песчано-глинистых и песчано-смоляных смесей.

Дозирование компонентов смеси осуществляется весовым методом.

Высокая эффективность смешивания компонентов достигается за счет применения вихревой головки, находящейся внутри смесителя вращающейся с высокой скоростью, а также оригинальной конструкции активатора.

Вихревое смешивание отличается высокими линейными и вращательными скоростями движения частиц наполнителя. Распределение связующего в объеме смеси и по поверхности зерен наполнителя происходит под воздействием высоких динамических энергий. Интенсивное разнонаправленное поступательно-вращательное движение всей смеси, ее микрообъемов и каждой отдельной частицы обеспечивает получение высококачественной смеси, отличающейся высокой степенью гомогенности и безупречным покрытием каждого зерна. Высокие скорости движения зерен и непрерывное соударение частиц приводит к, так называемой, механической активации связующего комплекса, обеспечивая тем самым повышение прочностных характеристик смеси.

Смесеприготовительный комплекс может полностью работать в автоматическом режиме с замером и корректировкой влажности смеси. На панели оператора возможно задание различных составов смесей.

Вихревые смесители предназначены для приготовления формовочных песчано-глинистых смесей в цехах с единичным характером производства, а в составе автоматизированных смесеприготовительных комплексов (АСК)-с серийным и массовым производством литья.

Вихревое смешивание отличается высокими линейными и вращательными скоростями движения частиц наполнителя. Распределение связующего в объеме смеси и по поверхности зерен наполнителя происходит под воздействием высоких динамических энергий. Интенсивное разнонаправленное поступательно-вращательное движение всей смеси, ее микрообъемов и каждой отдельной частицы обеспечивает получение высококачественной смеси, отличающейся высокой степенью гомогенности и безупречным покрытием каждого зерна. Высокие скорости движения зерен и непрерывное соударение частиц приводит к так называемой механической активации связующего

комплекса, обеспечивая тем самым повышение прочностных характеристик смеси.

Непрерывная аэрация смеси во время перемешивания улучшает ее формуемость и уплотняемость, позволяет готовить высокопрочные смеси до 2 МПа практически при сохранении производительности смесителя.

В литейной промышленности происходит постоянный рост требований, предъявляемых к отливкам, их геометрической и размерной точности, чистоте поверхности. Это является определяющим фактором развития технологий смесеприготовления, поскольку более 70 % брака отливок связано с низким качеством используемой в литейных цехах формовочной смеси и самой формы. Проведен анализ исследования, анализ накопленного мирового опыта показывают, что применительно к песчано-глинистым смесям наиболее эффективными являются высокоскоростные вихревые смесители, которые обеспечивают лучшую газопроницаемость, высокую степень гомогенизации, оптимальные значения уплотняемости и формуемости полученной смеси. Кроме того, вихревые смесители позволяют готовить высокопрочные смеси (до 0,2 МПа), применяемые при производстве песчано-глинистых форм на современных автоматических линиях.

Вихревой смеситель по сравнению с катковым обладает более высокой (в 1,5—2,0 раза) производительностью и обеспечивает повышение качественных характеристик формовочной смеси: газопроницаемость — в 1,2-1,5 раза; прочность на 10-15 %, уплотняемость на 15-20 %.

Удельное энергопотребление вихревого смесителя в 1,5-2,0 раза ниже, чем каткового, а время замеса не превышает 2 мин с загрузкой и выгрузкой смеси.

Библиографический список

1. Кокорин В.С. Цифровизация управления приготовлением формовочных смесей / В.С. Кокорин, А.А. Буркова, М.А. Морозов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Том Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 252-257. – EDN OЕKNTZ.

2. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей / С.В. Князев, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.Р. Михно // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 10. – С. 1076-1080. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1080. – EDN АМУКQZ.

3. Князев С.В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством / С.В. Князев // 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. 224-227. – EDN

РАХВДИ.

4. Князев С.В. Технологические алгоритмы управления приготовлением формовочных смесей / С.В. Князев, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев // *Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 163-167. – EDN YXSMFB.*

5. Мамедов Р.О. Влияние параметров формообразования на качество стального литья / Р.О. Мамедов // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 14–16 мая 2019 года / Сибирский государственный индустриальный университет; под общественной редакцией М.В. Темлянцева. Том Выпуск 23, Часть IV. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 190-194. – EDN XMGUBW.*

6. Использование симплекс-метода Нелдера-Мида для оптимизации состава смесей при литье и сварке / А.Е. Долгополов, Р.О. Мамедов, Р.А. Шевченко [и др.] // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года. Том ЧАСТЬ II. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2018. – С. 193-198. – EDN XQJWXJ.*

7. Долгополов А.Е. Исследования влияния физико-механических свойств ХТС на качество отливок из железоуглеродистых сплавов / А.Е. Долгополов, Р.О. Мамедов // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 16–18 мая 2017 года. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. – С. 232-235. – EDN ZTYRCR.*

8. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А.М. Штейн, А.И. Чепрасов, В.А. Клименов [и др.] // *Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1-2. – С. 267-270. – EDN SFLQLN.*

9. Ключевые показатели качества сталелитых изделий для железнодорожного транспорта / С.В. Князев, Д.В. Скопич, Е.А. Фатьянова [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 128-132. – DOI 10.17073/0368-0797-2017-2-128-132. – EDN XWLGZH.*

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРМОВОЧНОГО УЧАСТКА СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Токтарев А.А.¹, Сурков И.В.¹, Киселев П.В.²,
Князев С.В.², Усольцев А.А.²

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

Современные формовочные машины обеспечивают высокую производительность и точность формовки, а также экономят время и ресурсы благодаря автоматизированному процессу формовки. В результате, использование импульсных формовочных машин может значительно повысить эффективность работы литейного цеха и улучшить качество выпускаемых отливок.

Ключевые слова: модернизация, литье, формовка, литейная форма, формовочная смесь, импульсная формовочная машина.

Для изготовления форм установлены формовочные машины модели 233М – 2шт, 22505, 22506, 235М, 91271БМ; пескочет Н2033С; пескочетная линия модели ЛН – 240Б.

В 3-м пролете расположено отделение формовки крупного литья и участок производства слитков. Для набивки форм установлены формовочные машины: 22505 - 2 шт., 22506 – 1шт.

Изготовление полуформ происходит в течение следующих четырех циклов:

- I Подготовительные работы;
- II Уплотнение формовочной смеси;
- III Перекидные полуформы и подъем приемного стола;
- IV Извлечение модели из полуформы.

В 4-м пролете расположено отделение формовки мелкого литья. Для набивки форм установлены формовочные машины 233М - 2 шт.

Для изготовления форм, в качестве облицовки, применять жидкостекольную смесь (ЖСС).

Полуформы, подлежащие окраске противопригарной цирконовой краской, а также формы большой металлоемкости подвергнуть тепловой сушке в камерном сушиле. Остальные полуформы сушить под зонтом углекислым газом. Сушка литейных форм и стержней производится в камерных рециркуляционных сушилах с объемами 130 м³ и 46 м³, с выкатными тележками.

Время выдержки машинных форм до сборки и заливки после тепловой сушки не менее 2-х часов и не более 24-х часов, после химического отверждения не более 24-х часов.

Формовочные машины, установленные в сталелитейном участке, мо-

рально устарели, из минусов неравномерность набивки и обвалы смеси. Поэтому часто приходится тратить время на дополнительную отделку (исправление) формы. Кроме того, машины довольно старые и их часто приходится ремонтировать, как следствие приводит к незапланированным простоям. Поэтому назрело техническое перевооружение формовочного сталелитейного участка литейного цеха.

Оборудование литейных цехов современных промышленных предприятий в значительной степени исчерпало свой ресурс, так как может характеризоваться сегодня состоянием морального и физического износа. Вследствие этого технологические процессы, выполняемые на этом оборудовании, не обеспечивают высоких требований к качеству литья. Получаемые отливки зачастую по своему товарному виду не отвечают требованиям заказчиков, а несоответствие фасонных отливок по геометрическим характеристикам и размерным показателям может к тому же способствовать к снижению надежности изделий и оборудования. Поэтому исследования, посвященные решению вопросов планирования и организации мероприятий по техническому перевооружению, обеспечивающих возможность снижения сроков иррационального распределения ресурсов в процессе технического перевооружения являются актуальным [1-9].

В настоящее время наиболее прогрессивным методом изготовления литейных форм в опоках считается воздушно-импульсное уплотнение.

Оно позволяет получать оптимальное распределение плотности по высоте полуформы: наиболее плотные слои у модели, менее плотные у контрлада.

Это улучшает качество поверхности отливок, повышает их геометрическую точность, улучшает газопроницаемость форм и, как следствие, обеспечивает снижение брака литья.

Импульсные формовочные машины являются неотъемлемой частью литейных цехов и используются для производства металлических отливок различной формы и размера. Эти машины работают по принципу импульсной компрессии песчаной смеси в форме, которая создается при помощи специальной формовочной рамы.

Импульсные формовочные машины работают на основе принципа импульсной компрессии песчаной смеси в форму. Для этого используется специальная формовочная рама, которая состоит из двух половинок, соединенных между собой пневматическим замком.

Перед началом процесса формовки песчаная смесь загружается в раму, после чего к ней подается воздух под давлением. Под действием давления песчаная смесь начинает сжиматься и приобретать форму, соответствующую конфигурации рамы.

После того, как формовочная рама достигнет определенного уровня сжатия, к ней подается дополнительный импульс воздуха, который заканчивает процесс формовки и закрепляет песчаную смесь в форме.

Предлагается к применению машина формовочная импульсная низкого давления с допрессовкой и рамочным съемом полуформ для последователь-

ного изготовления нижних и верхних полуформ из песчано-глинистой формовочной смеси. Тип машины - полуавтоматическая. Вне автоматического цикла (механизмами, не входящими в состав машины), выполняются операции: установка пустой опоки на рольганг; заполнение опоки с наполнительной рамкой формовочной смесью; удаление готовой полуформы с рольганга.

Импульсная формовка - энергетически экономичный процесс, благодаря более полному расширению сжатого воздуха при передаче энергии уплотняемой смеси и более рациональному распределению плотности в опоке, минимальным потерям энергии на внешнее и внутреннее трение и др.

Импульсные формовочные машины имеют также и свои весьма важные, необходимые для работы элементы конструкции. Наиболее важным элементом является импульсная головка - емкость, необходимая для накопления и быстрой подачи сжатого воздуха на уплотнение. Роль распределительной системы в импульсных формовочных машинах играет рассекатель, именно здесь происходит равномерное распределение воздуха по всей площади опоки, что позволяет получить достаточное уплотнение смеси, не зависимо от конструкции модели. Также необходимы источники сжатого воздуха, которыми являются пневматические насосы. Поскольку на позицию уплотнения необходимо подавать опоки с разрыхленной формовочной смесью (это увеличивает скорость разгона, что обеспечивает высокие степени уплотнения, т.к. воздух распределяется по всей опоке и на формовочную смесь действует распределенная нагрузка), то в автоматические линии необходимо включать разрыхлительные механизмы.

Импульсная головка - сосуд постоянного объема - ресивер, внутри которого находится клапан. Клапан должен обеспечить подъем давления воздуха над смесью за 0,01...0,05 с, при этом необходимо равномерное распределение потока воздуха. Поэтому для выпускных отверстий с малым сечением, устанавливается рассекатель, за выпускным отверстием. Объем ресивера непосредственно связан с объемом камеры рассекателя, так как чем больше воздуха расходуется на заполнение камеры рассекателя, тем больше должен быть объем ресивера.

Давление в ресивере, скорость срабатывания клапана и размер выпускного отверстия влияют на скорость нарастания давления воздуха над формовочной смесью и являются определяющими факторами получения качественной формы.

Данная машина предназначена для последовательного изготовления нижних и верхних полуформ из песчано-глинистой формовочной смеси. Тип машины - полуавтоматическая. Вне автоматического цикла (механизмами, не входящими в состав машины), выполняются операции: установка пустой опоки на рольганг; заполнение опоки с наполнительной рамкой формовочной смесью; удаление готовой полуформы с рольганга.

Формовочная машина состоит из станины с прижимным столом, с пневмоцилиндром в котором перемещается поршень. На стол устанавливается модельная плита с опокой и наполнительной рамкой. На станине укреп-

лены опорные колонны, на которых держится траверса с направляющими для движения модельной плиты и дозатором смеси. Головка выполнена с подвижными перфорированными крышками полости рассекателя, которые жестко соединены с прессовым механизмом двухстороннего избирательного действия болтовым соединением. Полость рассекателя соединяется с ресивером посредством клапана. В ресивере имеется отверстие для соединения с магистралью сжатого воздуха. К станине крепится рама приводного рольганга. К опорным колоннам крепятся направляющие наполнительной рамки. Дозатор имеет в своей конструкции шиберный затвор. К станине прикреплены направляющие колонны лифта, подъемник и рама приводного рольганга выдачи собранных форм. На опорных колоннах крепятся толкатели готовых полуформ на направляющие. После установки пустой опоки на модельную плиту по кромочному рольгангу производится перемещение оснастки на позицию заполнения смесью, на которой находится наполнительная рамка, установленная на направляющих. Из дозатора, путем открытия шиберного затвора, происходит заполнение оснастки формовочной смесью. После заполнения, оснастка перемещается по рольгангу на рабочую позицию. Вместе с вышеописанными операциями осуществляется установка опоки на наполнительную рамку, установленную на воздушной головке, перемещение дозатора в положение над опокой, после чего при помощи шиберного затвора происходит заполнение оснастки формовочной смесью.

Модельная плита перемещается по направляющим в положение над опокой, а прижимной поршень со столом прижимает опоку верха к наполнительной рамке верха и к воздушной уплотняющей головке, которая, прижимает опоку низа с наполнительной рамкой низа к модельной плите низа траверса. После прижима оснастки к траверсе открывается клапан и смесь в опоках низа и верха уплотняется потоком сжатого воздуха одновременно.

Доуплотнение производится при помощи прессового механизма двухстороннего избирательного действия, соединенного с перфорированными крышками полости рассекателя. После доуплотнения прессующий механизм возвращается в исходное положение, а прижимной стол опускается вниз, производя протяжку модельного комплекта из полуформ верха и низа одновременно. Полуформа низа, расположенная сверху, отпечатком модели вверх, сталкивается толкателем на направляющие и по ним на платформу лифта, на которой опускается ниже уровня контрлада полуформы верха, расположенной внизу отпечатком модели вниз. Полуформа верха сталкивается толкателем на направляющие и затем накрывает полуформу низа. Во время движения полуформы низа на платформе лифта простановщик стержней ставит в полость формы стержни. Спариваются полуформы с помощью подъемника, образуя готовую форму, которая поступает на рольганг. Во время выдачи готовой формы все механизмы машины возвращаются в исходное положение и затем цикл повторяется.

Импульсные формовочные машины являются одним из наиболее эффективных и точных способов производства металлических отливок различ-

ной формы и размера. Они обеспечивают высокую производительность и точность формовки, а также экономят время и ресурсы благодаря автоматизированному процессу формовки. В результате, использование импульсных формовочных машин может значительно повысить эффективность работы литейного цеха и улучшить качество выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. Кокорин, В. С. Цифровизация управления приготовлением формовочных смесей / В. С. Кокорин, А. А. Буркова, М. А. Морозов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Том Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 252-257. – EDN OEKNTZ.

2. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей / С. В. Князев, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, А. Р. Михно // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 10. – С. 1076-1080. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1080. – EDN AMYKQZ.

3. Князев, С. В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством / С. В. Князев // 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. 224-227. – EDN PAXWDI.

4. Князев, С. В. Технологические алгоритмы управления приготовлением формовочных смесей / С. В. Князев, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 163-167. – EDN YXSMFB.

5. Мамедов, Р. О. Влияние параметров формообразования на качество стального литья / Р. О. Мамедов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 14–16 мая 2019 года / Сибирский государственный индустриальный университет; под общественной редакцией М.В. Темлянцева. Том Выпуск 23, Часть IV. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 190-194. – EDN XMGUBW.

6. Использование симплекс-метода Нелдера-Мида для оптимизации состава смесей при литье и сварке / А. Е. Долгополов, Р. О. Мамедов, Р. А. Шевченко [и др.] // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых уче-

ных, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года. Том ЧАСТЬ II. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2018. – С. 193–198. – EDN XQJWXJ.

7. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А. М. Штейн, А. И. Чепрасов, В. А. Клименов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1-2. – С. 267-270. – EDN SFLQLN.

8. Ключевые показатели качества сталилитых изделий для железнодорожного транспорта / С. В. Князев, Д. В. Скопич, Е. А. Фатьянова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 128-132. – DOI 10.17073/0368-0797-2017-2-128-132. – EDN XWLGZH.

9. Вопросы цифровой трансформации в литейном производстве / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 304-309. – EDN DMSDLN.

УДК 669.054.669.715

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРМОВОЧНОГО УЧАСТКА ЧУГУННОГО ЛИТЬЯ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

**Музыченко М.В.¹, Хатнянский Е.А.¹, Киселев П.В.²,
Князев С.В.², Усольцев А.А.²**

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

Показана целесообразность перехода технологий изготовления литейных форм для получения отливок из чугуна на холодно-твердеющие смеси. Современные технологии позволяют существенно улучшить работу формовочного участка и повысить его производительность, может применяться для производства более сложных и точных изделий, которые трудно получить с помощью традиционных методов формовки, повысить качество литья.

Ключевые слова: формовка, формовочные смеси, холодно-твердеющая смесь, литье, качество, отливка.

Формовочное отделение чугунолитейного участка оснащено 4-мя встряхивающими формовочными машинами модели 233М, 3-мя мостовыми пескометами ПН-40, используемыми для формовки соответственно мелких, средних и крупных отливок.

Часть номенклатуры крупных отливок формируется вручную пневмотрамбовками (главным образом, отливки почвенной формовки). Несколько

наименований отливаются в механизированных кокилях (диски грохота КХП), открытых кокилях (настильные плиты) и полукокилях (поддоны).

Подъемно-транспортные операции в отделении осуществляются консольными (4 шт.) и мостовыми (5 шт.) кранами Q-5,50т.

Сушка форм производится в 3-х камерных сушилах объемом 110,130м³, отапливаемым природным газом.

В качестве энергоносителей в отделении используется магистральный сжатый воздух (4,5-6 атм.) и электрический ток.

Современные технологии позволяют существенно улучшить работу формовочного участка и повысить его производительность. В частности, ХТС (холодно-твердеющие смеси) технология может быть использована для модернизации формовочного участка и улучшения его работы [1-5].

ХТС технология может использоваться не только для традиционной формовки, но и для импульсно-прессовой формовки. При импульсно-прессовой формовке ХТС технология может применяться для производства более сложных и точных изделий, которые трудно получить с помощью традиционных методов формовки.

Преимущества использования ХТС технологии при импульсно-прессовой формовке включают:

- Высокая точность и повторяемость производства.
- Быстрое затвердевание формовочной смеси, что позволяет сократить время производства.
- Улучшение качества и свойств материала.
- Снижение затрат на оборудование и обслуживание.
- Экологическая безопасность.

ХТС технология при импульсно-прессовой формовке используется в производстве широкого спектра изделий. ХТС (High Temperature Strength) технология предназначена для повышения теплостойкости и прочности формовочных материалов. Она базируется на использовании специальных добавок, которые позволяют увеличить температуру обжига формовочных смесей до 1000-1100°С. Это позволяет повысить прочность и теплостойкость формовочных форм, что существенно улучшает их долговечность и уменьшает вероятность деформаций.

Модернизация формовочного участка с использованием ХТС технологии включает несколько этапов:

1. Анализ текущей ситуации. Необходимо провести анализ работы формовочного участка, выявить проблемы и недостатки, которые могут быть устранены с помощью ХТС технологии.

2. Разработка плана модернизации. На основе анализа текущей ситуации следует разработать план модернизации формовочного участка с использованием ХТС технологии.

3. Закупка оборудования и материалов. Для внедрения ХТС технологии необходимо приобрести специальные добавки и оборудование для их использования. Оборудование может включать в себя печь для обжига фор-

мовочных форм и специальное оборудование для подготовки формовочных смесей.

4. Обучение персонала. Перед внедрением ХТС технологии необходимо обучить персонал работе с новым оборудованием и материалами. Обучение может проводиться как специалистами производителя оборудования и материалов, а также с помощью внутреннего обучения, организованного на производстве.

5. Внедрение ХТС технологии. После подготовки оборудования и персонала можно начать внедрение ХТС технологии. Специальные добавки должны быть введены в формовочные смеси, а обжиг формовочных форм должен быть проведен при повышенной температуре.

6. Контроль и анализ результатов. После внедрения ХТС технологии необходимо провести контроль и анализ результатов работы формовочного участка. Необходимо убедиться, что производительность участка увеличилась, а качество выпускаемой продукции улучшилось.

7. Применение ХТС технологии позволяет значительно повысить температурную устойчивость формовочных форм и материалов, что, в свою очередь, снижает расходы на их замену и увеличивает производительность формовочного участка. Кроме того, использование ХТС технологии позволяет производить литье более сложных форм и увеличивает точность изготавливаемых деталей.

8. Таким образом, модернизация формовочного участка в литейном производстве с использованием ХТС технологии является эффективным способом повышения производительности и качества производства.

Однако, внедрение ХТС технологии требует значительных затрат на оборудование и материалы, а также обучение персонала, поэтому необходимо тщательно проанализировать экономическую целесообразность такого проекта.

Преимущество чугунного литья с использованием ХТС (High Temperature Strength) технологии перед ПГС (Песочно-глиноземной смеси) заключается в том, что ХТС технология позволяет получать более качественные и точные изделия с более высоким уровнем термостойкости и механической прочности, что особенно важно для производства деталей, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок, качество и надежность материала играют особенно важную роль. При эксплуатации таких деталей они подвергаются интенсивным тепловым и механическим воздействиям, что может привести к деформации, трещинам и поломкам.

Поэтому использование ХТС технологии в чугунном литье позволяет производить детали с более высокой термостойкостью и механической прочностью, что особенно важно для производства деталей, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок. Такие детали могут быть использованы в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, энергетическая, нефтегазовая и др.

Применение ХТС технологии позволяет добиваться более высокой

точности размеров деталей и более гладкой поверхности, что также важно для надежности и эффективности их работы. Кроме того, благодаря более быстрому и равномерному затвердеванию формовочной смеси, можно уменьшить вероятность появления дефектов и повысить качество литых изделий.

Замена ПГС на ХТС технологию в литейном производстве имеет целый ряд преимуществ, которые делают ее целесообразной:

1. Улучшение качества и свойств материала. ХТС технология позволяет получить материал с более высокой термостойкостью и механической прочностью, что делает его более подходящим для производства деталей, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок.

2. Сокращение времени производства. ХТС технология позволяет сократить время, необходимое для затвердевания формовочной смеси, благодаря более быстрому и равномерному затвердеванию материала. Это позволяет ускорить производственный процесс и увеличить производительность линии.

3. Снижение затрат на оборудование. ХТС технология не требует дополнительного оборудования, которое необходимо для работы с ПГС. Это позволяет снизить затраты на закупку, установку и обслуживание дополнительного оборудования.

4. Экологическая безопасность. ХТС технология более экологична, чем ПГС, так как не содержит вредных химических веществ, которые могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье людей.

5. Улучшение конкурентоспособности продукции. Применение ХТС технологии позволяет производить более качественную и надежную продукцию.

В целом, замена ПГС на ХТС технологию может улучшить качество и эффективность производства, а также снизить затраты на оборудование и обслуживание, что делает ее целесообразной для многих предприятий.

Использование ХТС технологии в производстве может привести к экономии материалов и регенерации отходов. Это происходит благодаря использованию ХТС связующих материалов, которые обладают рядом преимуществ перед традиционными связующими материалами, такими как ПГС.

ХТС связующие материалы могут быть более эффективно использованы в производстве, так как они могут затвердевать при более низких температурах и за более короткое время. Это позволяет сократить время производства и снизить затраты на энергию. Кроме того, ХТС связующие материалы обладают более высокой прочностью и устойчивостью к термическим воздействиям, что позволяет производить более прочные и долговечные изделия.

Таким образом, использование ХТС связующих материалов может привести к улучшению качества и производительности изделий, а также к снижению затрат на их производство.

Введение ХТС связующих материалов и импульсных формовочных

машин может значительно улучшить производственный процесс на формовочном участке. Применение ХТС связующих материалов позволяет сократить время затвердевания материала, что в свою очередь снижает затраты на энергию и ускоряет процесс производства. Более высокая прочность и устойчивость к термическим воздействиям также улучшает качество изготовленных изделий.

Использование импульсных формовочных машин также может улучшить производственный процесс. Эти машины позволяют быстрее формовать материал и имеют более точную формовку, что уменьшает количество брака и повышает производительность.

Модернизация формовочного участка с применением ХТС связующих материалов и импульсных формовочных машин может значительно повысить эффективность производства, снизить затраты на энергию и уменьшить количество брака. Кроме того, это может улучшить качество изготавливаемых изделий и повысить уровень конкурентоспособности предприятия. Все перечисленное является основным направлением развития литейного цеха, внедрение которых позволит с успехом находить и внедрять более перспективные решения по производству чугуна различной номенклатуры.

Исходя из этого, можно предположить, что нельзя создать идеальную стратегию, потому что будущее неизвестно. Реальность, заключается в том, что для энергичного развития цеха необходимо иметь более гибкую технологию производства для того, чтобы предусмотреть непредвиденные ситуации в будущем, а также дать возможность всем участвующим в процессе вносить свои собственные идеи и инициативу в развитии цеха. Поэтому план, подкрепленный реалистичным анализом, который появляется в результате обсуждений, должен формировать внутри подразделения разумную степень уверенности в себе, которая вместе с корпоративным управлением приведет к желаемому результату.

Тщательно продуманная и хорошо аргументированная стратегия не обязательно будет «оптимальной» - может существовать несколько жизнеспособных альтернатив, каждая со своими преимуществами и недостатками. Тем не менее, согласованная точка зрения по поводу того, куда мы пытаемся привести предприятие, является существенной составляющей успешного управления сегодняшней деятельностью. Стратегия создает перспективу, которую разделяют люди и которая направляет их решения и действия. Главным объектом внимания станет определение назначения и цели организации, база ресурсов, необходимая для успешной реализации стратегии. Стратегия, которая форсируется только на снижение издержек, рискованна. Непродуманное снижение издержек может быстро привести к положительному практическому результату, но в долгосрочной перспективе оно может быть катастрофическим.

Для того чтобы обеспечить себе процветающее, продолжительное будущее, организация должна иметь четко очерченную цель, чувствовать направление и иметь представление о ресурсах, которые ей понадобятся.

Всего этого она добивается путем управления на основе стратегии. Для реализации такого подхода менеджеры должны понимать суть стратегии, использовать процессы стратегического управления и разрабатывать стратегические планы, признавая вместе с тем, что стратегия находится в непрерывном развитии и постоянно адаптируется к изменяющимся условиям.

Библиографический список

1. Князев, С. В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством / С. В. Князев // 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. 224-227. – EDN PAXWDI.

2. Использование симплекс-метода Нелдера-Мида для оптимизации состава смесей при литье и сварке / А. Е. Долгополов, Р. О. Мамедов, Р. А. Шевченко [и др.] // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года. Том ЧАСТЬ II. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2018. – С. 193-198. – EDN XQJWXJ.

3. Долгополов, А. Е. Исследования влияния физико-механических свойств ХТС на качество отливок из железоуглеродистых сплавов / А. Е. Долгополов, Р. О. Мамедов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 16–18 мая 2017 года. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. – С. 232-235. – EDN ZTYRCR.

4. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А. М. Штейн, А. И. Чепрасов, В. А. Клименов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1-2. – С. 267-270. – EDN SFLQLN.

5. Вопросы цифровой трансформации в литейном производстве / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 304-309. – EDN DMSDLH.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Кузьмич А.В.¹, Чередниченко А.В.¹, Киселев П.В.²,
Князев С.В.², Усольцев А.А.²

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: krookia@mail.ru

После многократного использования формовочных материалов при литье в них происходит накопление продуктов термодеструкции модели, поэтому проводится регенерация отработанных формовочных материалов. Остатков противопопригарного покрытия, керамических частиц от литниковой системы, металлических включений и мелкой пылевидной фракции кварцевого песка – результат его термического разрушения. Система пескооборота в технологии литья по газифицированным моделям позволяет многократно использовать песок, как огнеупорный наполнитель оставляя стабильными качественные показатели отливок.

Ключевые слова: литье по газифицированным моделям, формовочный песок, регенерация, пескооборот, формовочные и стержневые смеси, физико-механические свойства.

Оборудование литейных цехов современных промышленных предприятий в значительной степени исчерпало свой ресурс, так как может характеризоваться сегодня состоянием морального и физического износа. Вследствие этого, технологические процессы, выполняемые на этом оборудовании, не обеспечивают высоких требований к качеству литья. Получаемые отливки зачастую по своему товарному виду не отвечают требованиям заказчиков, а несоответствие фасонных отливок по геометрическим характеристикам и размерным показателям может к тому же способствовать к снижению надежности оборудования. Поэтому исследования, посвященные решению вопросов планирования и организации мероприятий по техническому перевооружению обеспечивающих возможность снижения сроков иррационального распределения ресурсов в процессе технического перевооружения являются актуальным.

В настоящее время все шире внедряются передовые способы получения отливок. При этом большое внимание уделяется снижению трудоемкости изготовления отливок и одновременно повышению их точности. Внедряются и совершенствуются специальные виды литья: литье в кокиль, под давлением, в оболочковые формы, центробежное литье, литье по выплавляемым моделям, которые обеспечивают получение точных отливок и, следовательно, уменьшение материальных и трудовых затрат на обработку. Среди некапиталоемких гибких, повышающих культуру производства технологий,

литье по газифицированным моделям (ЛГМ) показывает опережающую динамику и географию распространения в литейном производстве стран мира [1-10].

ЛГМ по точности и качеству отливок, условиям труда и экологической безопасности вполне можно отнести к высоким технологиям литейного производства.

После многократного использования формовочных материалов при ЛГМ в них происходит накопление продуктов термодеструкции модели, поэтому проводится регенерация отработанных формовочных материалов. Остатков противопопригарного покрытия, керамических частиц от литниковой системы, металлических включений и мелкой пылевидной фракции кварцевого песка – результат его термического разрушения. Установлено, что после 10-20 циклов оборота песка в нем содержится от 0,24 до 0,48 % сконденсированных продуктов термодеструкции.

Все это ухудшает технологические и физико-механические свойства сыпучих формовочных материалов, в частности песка. Поэтому формовочные сыпучие материалы должны подвергаться регенерации.

В настоящее время выбивка литейных форм производится на выбивных решётках модели 427У, 431И грузоподъёмностью 16т и 50 - 60т, отработанные смеси по конвейерам участка поступает в бункера-накопители. После автомобильным транспортом подаются на участок землеприготовления.

Процесс регенерации отработанных формовочных материалов, включает следующие операции: магнитную сепарацию, просеивание песка на вибрационном сите с ячейкой 2х2 мм и тепловую обработку при температуре 650-700 °С.

Время термической обработки кварцевого песка составляет 5-10 мин при температуре 650-700 °С, после чего песок приобретает естественный цвет.

Система пескооборота в технологии ЛГМ позволяет многократно использовать песок, как огнеупорный наполнитель оставляя стабильными качественные показатели отливок.

Производительность комплекса составляет 5-10 тонн песка в час, что дает возможность применения комплекса в технологических линиях до 300 т/мес годного литья. Температура песка на выходе не более 40 С. Потребляемая мощность около 60 кВт. Суммарное содержание углеводородов в отходящем газе не превышает 0,001 %. Одновременно с этим в процессе термической регенерации в кипящем слое из песка удаляются мелкие пылевидные фракции. Так, содержание фракции менее 0,1 мм снижается в 5 раз, что полностью восстанавливает технологические и физико-механические свойства исходного кварцевого песка.

Состав пескооборота:

-Просыпная решетка Размер решетки 2500х2500 в комплекте с приёмным бункером, оснащённым механическим шиберным затвором, и пылеулавливающим зонтом.

-Цепной элеватор поднимает горячий песок с приёмного бункера до

виброгрохота. Ковши в этом механизме смонтированы на цепях. Мощность двигателя 5кВт.

-Виброгрохот. На этом участке пескооборота происходит просеивание и предварительное охлаждение песка. Два вибродвигателя по 1,1 кВт, вращаясь в противоположные стороны передают вибрацию подвижной части механизма, благодаря чему песок движется в заданном направлении. В нижней смонтирован водяной теплообменник в комплекте с воздуходувкой мощностью 20 кВт и водяным насосом мощностью 3кВт.

-Ленточный элеватор поднимает предварительно охлаждённый песок с виброгрохота до промежуточного бункера и со шкафа охлаждения до рабочего бункера. Ковши в этом механизме смонтированы на ленте. Мощность двигателя 5кВт.

-Магнитный сепаратор. Сепаратор барабанного типа. Улавливает мелкие металлические включения. Мощность 2,2кВт.

-Рабочий бункер. Объём бункера 15м³. Предназначен для хранения песка до использования.

-Пылеуловитель предназначен для улавливания пылевидной фракции, образующейся в результате деструкции песка в комплекте с вытяжным вентилятором, мощностью 18,5 кВт и отдельным шкафом управления.

- Шкаф управления системой пескооборота.

- Шнек предназначен для подачи песка от рабочего бункера до опоки. Мощность двигателя 3кВт.

Все операции в линии механизированы кроме перемещения опок. Опoka с песком и готовыми отливками подаётся на кантователь. На кантователе происходит переворот опоки. Песок и отливки высыпаются на просыпную решетку. На решётке происходит отделение отливок от песка и шлака. Отливки и шлак остаются на полотне, а песок в приемный бункер, из которого вибротранспортером песка подается на цепной элеватор, а далее через воздушно-магнитный сепаратор в охладитель. В охладителе песка используется принцип «кипящего слоя», т.е. атмосферный воздух подаётся под слой песка, проходит сквозь него, и, отобрав от песка тепло, через систему пылеулавливания выбрасывается в атмосферу. (При двухсменном графике работы линии воздушно охладителя недостаточно, поэтому в охладитель устанавливается дополнительный водяной, пластинчатый теплообменник.) Система пылеулавливания очищает нагретый воздух от мелких фракций песка и пыли. Из охладителя песок при помощи элеватора транспортируется в рабочий бункер.

Литье по газифицируемым моделям (метод литья ЛГМ) технологический процесс получения отливок, использующий пенополистирольную модель, которую газифицируют при заливке. Точность отливки получается, как при литье по выплавляемым моделям, а затраты сопоставимы с литьем в песчано-глинистые смеси.

Методика литья ЛГМ на сегодняшний день считается наиболее перспективной. Это один из самых и высокопроизводительных способов литья. Он характеризуется следующими особенностями:

– Высочайшая технологичность. Процесс ЛГМ позволяет изготавливать высококачественную литейную продукцию в самых сложных формах.

– Универсальность. С одинаковой эффективностью и качественными показателями позволяет осуществлять производство изделий как из черных, так и из цветных металлических сплавов.

– Экологичность. Технология литья по газифицируемым моделям не предусматривает применения вредных и опасных для человеческого здоровья компонентов. К тому же метод ЛГМ не предполагает образования токсичных отходов. Расходным материалом при данной технологии изготовления литых изделий является только пенополистирол, преобразуемый в процессе заливки в углекислый газ, песок же практически не расходуется и после регенерации способен опять выполнять свои функции. Альтернативные же методы (такие как кокильное литье либо по выплавляемым моделям) требуют большего числа сопутствующих компонентов. При производстве данными методами возможно образование токсичных газов, способных нанести ущерб человеческому организму и/либо окружающей среде.

– Малогабаритность производственного оборудования. Технологические линии ЛГМ являются одними из самых компактных в сравнении с альтернативными методами литья.

– Экономичность. Способ литья по газифицируемым моделям позволяет минимизировать трудовые/финансовые затраты на чистовую механообработку. Во-первых, метод ЛГМ позволяет за одну заливочную операцию произвести сразу несколько отдельных изделий. Во-вторых, осуществляется экономия объема расплава, поскольку образуется значительно меньшее число ненужных, технологических элементов, следовательно, уменьшается металлоемкость. В свою очередь это приводит к минимизации механической обработки, доводки литой заготовки до требуемых геометрических параметров. При использовании метода ЛГМ поверхность полученных изделий получается значительно более гладкой, что зачастую является достаточным, поэтому зачастую отсутствует необходимость в шлифовально-полировальных операциях.

– Высокое качество продукции. Устаревшая кокильная технология литья подразумевает прямой контакт рабочего расплава со стенками формы, что приводит к значительному снижению ее ресурса, образованию дефектов рабочих поверхностей. Метод ЛГМ позволяет эксплуатировать заливочные пресс-формы на протяжении гораздо большего числа использований, при этом добиваясь практически идеального качества полученной продукции. При соблюдении всех несложных технологических нюансов вероятность образования дефектов отсутствует, все геометрические параметры изделия соблюдаются в течение всего эксплуатационного периода.

Технологический процесс регенерации песка ЛГМ:

- *Просыпная решетка* предназначена для разделения отливок и песка.

Она представляет собой раму, закрепленной на фундаменте. Просыпная решетка идет в комплексе с приёмным бункером, который оснащён пневматическим шибером. Пневматический шибер, предназначен для запираания приемного бункера просыпной решетки. Поток песка регулируется ручной заслонкой. Открытие шибера происходит за счет подачи на пневмоцилиндра сжатого воздуха.

- *Виброгрохот* предназначен для просеивания отработанного песка и транспортирования его до цепного элеватора. Виброгрохот состоит из стационарной части, подвижной части, вибродвигателей, пружин, сита и пр. Внутри виброгрохота смонтирован трубчатый теплообменник, по которому циркулирует вода. Частицы краски с отливок, крупные включения и скрап проходят через отверстия просыпной решетки и попадают на сито виброгрохота. Они движутся по сити и разгружаются по отдельному желобу в установленную тару. Просеянный песок, пройдя сито, разгружается в нижнюю головку элеватора для подъема. В месте пересыпки устанавливается вытяжной зонт для отвода пылевидной фракции. Вибрация генерируется двумя асинхронными вибродвигателями, вращающимися в разных направлениях. Вибродвигатели установлены под углом к оси горизонта, что обеспечивает направленное движение песка и отсеянных включений.

- *Шкаф охлаждения* служит для охлаждения и обеспыливания отработанного песка. Шкаф состоит из воздуходувки, распределителя, клапанов, трубчатого теплообменника корпуса и пылеулавливающего зонта. Загрузка песка осуществляется через верхний патрубок, воздуходувкой нагнетается в нижний слой избыточное воздушное давление, уровень дутья в нижнем слое регулируется клапаном-бабочкой, расположенных на распределителе воздушного потока. Внутри шкафа смонтирован трубчатый водоохлаждаемый теплообменник. Благодаря избыточному воздушному давлению в нижней части шкафа возникает эффект «кипения» песка (кипящий слой), мелкая фракция и частицы пыли имеют меньшую массу, поэтому поднимаются на большую высоту и удаляются в систему пылеулавливания. Песок, находясь в непрерывном движении, соприкасается с трубчатым теплообменником и отдает ему часть тепла. Таким образом, происходит обеспыливание и охлаждение песка. Охлажденный и обеспыленный песок самотеком разгружается через разгрузочный желоб. Шкаф охлаждения – важный узел в системе регенерации. Для периодической очистки шкафа предусмотрены окна.

- *Система пылеудаления*, предназначена для улавливания пыли и мелкой фракции отработанного песка из основного объема песка. Система пылеулавливания состоит из картриджного пылеуловителя, трубопроводов, клапанов-бабочек, вытяжного вентилятора, импульсной системы продувки, разгрузочного шнека и пр. При работе системы запыленный воздух откачивается от узлов линии и собирается в единый трубопровод, направленный к пылеуловителю. Для регулировки вытяжной вентиляции на каждом устройстве предусмотрены клапана-бабочки. Запыленный воздух проходит через картриджный пылеуловитель сверху вниз, пыль оседает на стенках картри-

джа, а очищенный воздух собирается в единый патрубок, направленный к вытяжному вентилятору.

Пылеуловитель имеет функцию очистки методом обратной продувки. Для этих целей сам объем картриджного пылеуловителя разбит на секции. При отключении вытяжного вентилятора становится возможной очистка пылеуловителя. Для этого секции пылеуловителя закрываются секционными клапанами, запускается импульсный клапан очистки, запускается импульсная воздуходувка, после чего секционные клапана поочередно открываются.

Библиографический список

1. Кокорин, В. С. Цифровизация управления приготовлением формовочных смесей / В. С. Кокорин, А. А. Буркова, М. А. Морозов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 17–18 мая 2022 года. Том Выпуск 26. Часть I. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 252-257. – EDN OEKNTZ.

2. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей / С. В. Князев, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, А. Р. Михно // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77, № 10. – С. 1076-1080. – DOI 10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1080. – EDN AMYKQZ.

3. Князев, С. В. Алгоритм диагностики дефектности отливок и структура системы управления их качеством / С. В. Князев // 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. 224-227. – EDN PAXWDI.

4. Князев, С. В. Технологические алгоритмы управления приготовлением формовочных смесей / С. В. Князев, Н. А. Козырев, А. А. Усольцев // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 163-167. – EDN YXSMFB.

5. Мамедов, Р. О. Влияние параметров формообразования на качество стального литья / Р. О. Мамедов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 14–16 мая 2019 года / Сибирский государственный индустриальный университет; под общественной редакцией М.В. Темлянцева. Том Выпуск 23, Часть IV. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. – С. 190-194. – EDN XMGUBW.

6. Использование симплекс-метода Нелдера-Мида для оптимизации

состава смесей при литье и сварке / А. Е. Долгополов, Р. О. Мамедов, Р. А. Шевченко [и др.] // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 13–15 июня 2018 года. Том ЧАСТЬ II. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2018. – С. 193–198. – EDN XQJWXJ.

7. Долгополов, А. Е. Исследования влияния физико-механических свойств ХТС на качество отливок из железоуглеродистых сплавов / А. Е. Долгополов, Р. О. Мамедов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 16–18 мая 2017 года. Том Часть 2. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. – С. 232–235. – EDN ZTYRCR.

8. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства / А. М. Штейн, А. И. Чепрасов, В. А. Клименов [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 1–2. – С. 267–270. – EDN SFLQLN.

9. Ключевые показатели качества сталелитых изделий для железнодорожного транспорта / С. В. Князев, Д. В. Скопич, Е. А. Фатьянова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 128–132. – DOI 10.17073/0368-0797-2017-2-128-132. – EDN XWLGZH.

10. Вопросы цифровой трансформации в литейном производстве / С. В. Князев, А. И. Куценко, А. А. Усольцев [и др.] // Металлургия: технологии, инновации, качество : Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Новокузнецк, 10–11 ноября 2021 года / Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Том Часть 1. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. – С. 304–309. – EDN DMSDLN.

УДК 621.791.042.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТАЛЛОТЕРМИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СВАРКИ РЕЛЬСОВ

Морозов М.А., Маракулина М.Ю., Усольцев А.А., Князев С.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: marina_tarakulina@mail.ru*

Исследовано влияние состава металлотермитной смеси на механизм протекания высокотемпературных термических процессов. Определен состав металлотермитной смеси, обеспечивающий получение плотного металла. Добавление в состав металлотермитной смеси алюминиевого порошка обеспечивает полноту взаимодействия и восстановления окалины железа, а также увеличивает количество расплавленного металла. Для уменьшения га-

зовыделения при протекании термических процессов ввод в состав термитной смеси пыли газоочистки алюминиевого производства (в качестве сварочного флюса), а также увеличивает содержание углерода в получаемом металле.

Ключевые слова: термит, термитные процессы, алюмотермия, титанотермия.

Применение термитных смесей для получения жидкого металла из окислов железа широко известно. В состав термитных смесей входят порошки металлов-восстановителей с оксидами тех металлов, из которых при протекании высокоэкзотермической реакции формируется в дальнейшем сварочный шов, а также различными присадочными соединениями - элементами металлического происхождения.

Из существующих основных способов металлотермического восстановления железа из его оксидов различают алюминотермию, магниетермию и силикотермию [1-6].

Перспективным направлением при разработке металлотермических смесей для сварки является применение металлов – восстановителей, обеспечивающих получение качественного сварного шва [7 – 10]. Сдерживающим фактором развития рассматриваемого направления является отсутствие данных о зависимостях и закономерностях влияния металлов – восстановителей на физико-химические и металлургические процессы термитной сварки. Поэтому особый интерес представляют исследования, направленные на изучение металлургических процессов термитной сварки.

В качестве исходных материалов использовались железная окалина и порошкообразные материалы: порошок титана ПТС по ТУ 15-1958 (титан – 99,6 %, примеси не более 0,4 %), порошок алюминиевый ПА-2 по ГОСТ 6058-73 (алюминий 99 %, примеси не более 1 %). В состав металлотермической смеси вводилась углеродфторсодержащая добавка – УФД (пыль газоочистки алюминиевого производства) [7,8].

Химический состав металла определяли атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71 по ГОСТ Р ИСО 14284-2009. Состав шлака определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ShimadzuXRF-1800 по ГОСТ 28033 – 89.

Взвешивание производилось на электронных весах марки SHSHIMADZU модели AUX120. Термитная смесь получалась путем добавления всех составляющих в специальную емкость и перемешиванием. В смеситель засыпается полученная смесь и после чего в течение 30-40 минут производится перемешивание порошков термитной смеси. После смешивания порошков до однородной массы, термитная смесь ссыпается в металлические контейнеры для проведения сушки. Сушка производится для удаления влаги из термитной смеси, которая может отрицательно сказаться на полученном результате.

В данной работе приводится исследование состава металлотермиче-

ских смесей на протекание металлургических процессов горения смеси. Химический состав железной окалины приведен в таблице 1. Компонентный состав термитной смеси приведен в таблице 2.

Химический состав металла приведен в таблице 3. Готовые составы термитной смеси засыпались в специальную огнеупорную реакционную камеру, в которой имеется огнеупорная воронка для облегчения стекания жидкого металла, и поджигались термитной спичкой. Важной процедурой термитной сварки является процесс её поджога (инициализация горения). Для облегчения поджога иногда используются специальные смеси, в состав которых добавлялась стружка металлического магния. Для собирания расплавленного металла использовалась металлическая (разборная) изложница, в которую металл попадал из воронки.

В результате горения и протекания металлотермических процессов в нижней части огнеупорной (реакционной) камеры происходило стекание и скопление расплавленного металла. Химический состав шлака приведен в таблице 4.

Горение термитной смеси протекало активно и сопровождалось большими выбросами. Химический состав шлака показал (табл.4), что металлотермическая реакция взаимодействия железной окалины с титаном происходит с образованием TiO_2 (по формуле 2). Для полного взаимодействия FeO (2 моля $FeO = 144$ г) требуется титана (1 моль $Ti = 48$ г), что должно составить следующее соотношение компонентов в термитной смеси: 75 % железной окалины и 25 % титана.

Таблица 1 – Химический состав железной окалины

Массовая доля элементов, %												
FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	CuO	S	P
95,64	1,16	0,096	1,70	0,32	0,21	0,034	0,031	0,27	0,043	0,084	0,085	0,004

Таблица 2 – Компонентный состав термитной смеси

Обозначение	Окалина железа, %	Порошок титана ПТС, %	Порошок алюминиевый ПА-2, %	УФД, %
T.1	58,19	41,81	-	-
T.2	50	50	-	-
T.3	63,2	36,8	-	-
T.4	53,0	46,98	-	-
ТА.5	81,29	18,71	13,08	-
ТА.6	69,27	30,73	5,57	-
ТА.7	58,2	41,8	21,5	-
A.1	74,7	-	25,3	-
A.2	79,92	-	20,08	-
A.3	63,36	-	30,64	-
A.4	59,6	-	40,4	-
O.1	64,9	28,85	6,25	-
O.2	58,08	41,92	-	4,7

Исследования по изменению содержания компонентов в термитной смеси (таблица 2), а также исследования состава получаемого шлака и металла показали, что для полного взаимодействия FeO требуется совершенно другое соотношение компонентов в термитной смеси: $(61 \pm 2) \%$ железной окалины и $(39 \pm 2) \%$ титана [9,10]. При таком содержании компонентов в термитной смеси происходит практически полное взаимодействие окалины железа с порошком титаном.

Таблица 3 – Химический состав металла

№	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	W	V	Mo	Al	Nb	S	P
T.1	-	1,71	0,47	0,29	0,28	0,08	5,76	<0,001	0,067	0,009	0,13	0,067	0,014	0,41
T.2	-	1,23	0,35	0,15	0,29	0,18	21,09	0,024	0,18	0,012	0,29	0,099	0,062	0,42
T.3	-	1,89	0,22	0,30	0,22	0,08	0,22	0,009	0,025	0,011	0,044	0,049	0,044	0,28
T.4	-	2,15	0,33	0,15	0,27	0,09	22,95	<0,001	0,19	0,006	1,26	0,082	0,045	0,47
TA.5	-	0,09	0,02	0,03	0,12	0,10	0,020	<0,001	0,0003	0,011	0,061	0,002	0,26	0,13
TA.6	-	0,08	0,02	0,05	0,18	0,08	<0,001	0,008	0,001	0,010	0,039	0,003	0,20	0,21
TA.7	-	1,66	0,12	0,02	0,11	0,03	37,89	0,014	0,21	0,007	27,68	0,043	0,10	0,093
A.1	-	0,02	0,02	0,05	0,06	0,08	<0,001	0,028	<0,001	0,013	0,038	0,003	0,25	0,023
A.2	-	0,05	0,02	<0,001	0,07	0,16	0,004	0,005	<0,001	0,016	0,22	0,001	0,19	0,025
A.3	-	2,19	0,11	0,24	0,06	0,11	0,014	0,008	0,022	0,010	0,86	0,001	0,30	0,020
A.4	-	4,11	0,44	0,32	0,06	0,09	0,12	<0,001	0,034	0,009	6,12	0,003	0,094	0,014
O.1	-	1,18	0,13	0,29	0,21	0,07	0,59	<0,001	0,022	0,009	0,17	0,036	0,011	0,23
O.2	0,59	0,49	0,31	0,26	0,24	0,08	3,98	<0,001	0,053	0,011	0,18	0,042	0,020	0,35

Анализ состава шлака и металла является подтверждением этого утверждения - в шлаке содержание FeO не более 8 %, содержание TiO₂ более 80%, при этом содержание титана в металле не более 0,2 %. Протекание металлотермических процессов, особенно, в своей активной фазе, характеризуется значительными выбросами, при этом часть легковесных составляющих термитной смеси уносится горячими газовыми потоками. Легковесной составляющей в термитной смеси, состоящей из окалины и титана, является железная окалина. В алюмотермитной смеси легковесной составляющей является алюминиевый порошок. Следовательно, некоторое количество легковесной составляющей уносится горячими газовыми потоками и в металлотермических процессах не участвует. Степень полноты протекания титанотермического восстановления железа определяется количеством получаемых продуктов реакции (оксида титана TiO₂ и FeO) в шлаке и зависит от исходного количества железной окалины в титанотермитной смеси (рисунок 1)[9,10].

Таблица 4 – Химический состав шлака

№ п/п	Массовая доля элементов, %												
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	CuO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	S	P
T.1	7,48	0,13	0,44	6,68	1,97	0,017	0,51	0,042	0,091	81,10	0,16	0,078	0,031
T.2	18,21	0,11	0,25	3,99	2,69	0,030	0,074	0,0032	0,13	62,83	0,25	0,16	0,13
T.3	9,79	0,41	0,73	16,17	9,79	0,11	0,23	0,12	0,17	61,82	0,29	0,18	0,0013
T.4	8,27	0,078	0,59	15,57	7,21	0,038	0,27	0,11	0,040	67,15	0,16	0,18	0,052
ТА.5	22,24	0,82	0,12	19,12	26,22	0,22	0,10	0,13	0,025	30,22	0,48	0,14	0,005
ТА.6	8,90	0,70	0,13	15,54	16,94	0,18	0,084	0,057	0,16	55,89	0,58	0,13	0,013
ТА.7	12,31	0,072	0,24	6,27	31,52	0,14	0,077	0,022	0,024	48,06	0,17	0,13	0,034
A.1	42,59	1,43	0,33	16,13	34,89	0,23	0,074	0,063	0,16	3,07	0,35	0,11	0,0014
A.2	58,68	1,20	0,22	9,88	26,87	0,12	0,065	0,009	0,032	1,91	0,32	0,12	0,0014
A3	21,40	1,23	0,31	23,15	48,24	0,25	0,10	0,12	0,026	3,04	0,21	0,11	0,0014
A.4	47,02	0,38	0,44	12,20	34,14	0,027	0,095	0,026	0,028	3,34	0,28	0,15	0,0014
O.1	16,96	0,58	2,10	7,27	14,03	6,07	0,42	0,022	0,041	51,75	0,31	0,12	0,050
O.2	16,46	0,15	0,092	1,45	6,34	0,48	0,14	0,002	0,027	70,21	0,21	0,14	0,033

Степень полноты протекания алюминотермического восстановления железа также определяется количеством получаемых продуктов реакции (оксидов железа FeO и оксидов алюминия Al₂O₃) в шлаке и зависит от исходного количества железной окалины в алюминотермитной смеси (рисунок 2) [9, 10].

Добавление в состав титаноалюмотермитной смеси небольшого количества алюминиевого порошка обеспечивает полноту взаимодействия и восстановления окалины железа и увеличения количества расплавленного металла.

Введение в состав термитной смеси в качестве флюса УФД уменьшает газовыделение при протекании термических процессов. Помимовведение УФД в состав металлтермитной смеси повышает содержание углерода в получаемом металле.

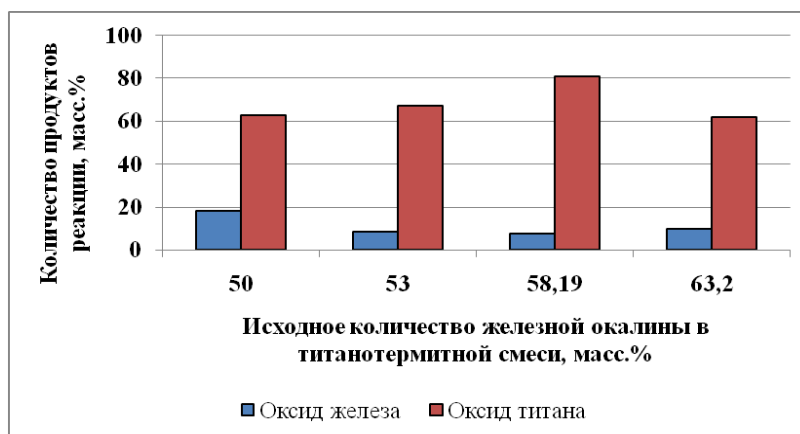


Рисунок 1 – Степень полноты протекания металлтермического восстановления железа в титанотермитной смеси

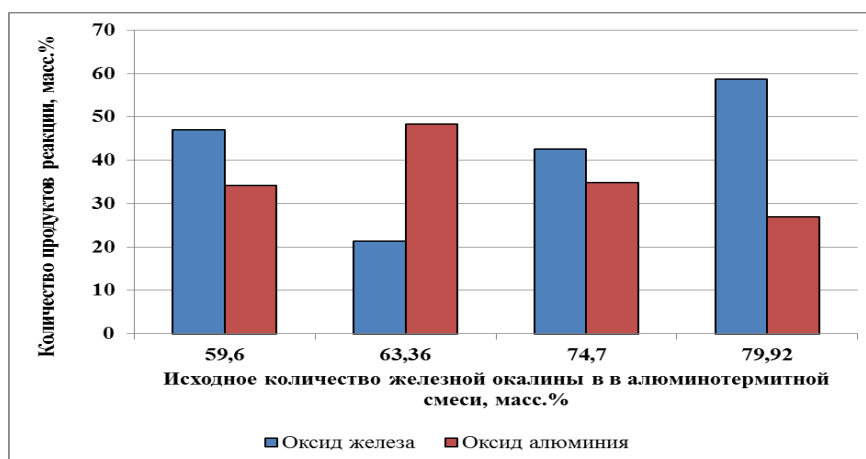


Рисунок 2 – Степень полноты протекания металлотермического восстановления железа в алюминотермитной смеси

Выводы

1. Определен состав титанотермитной смеси и разработана металлотермитная технология, обеспечивающие получение качественного металла.
2. Для обеспечения полноты взаимодействия и восстановления окалины железав состав металлотермитной смеси добавлено небольшое количество алюминиевого порошка, способствующее также увеличению количества расплавленного металла.
3. Для уменьшения газовыделения в состав термитной смеси введена в качестве флюса УФД (пыль газоочистки алюминиевого производства), способствующая содержанию углерода в получаемом металле и повышению его механических свойств.

Библиографический список

1. Подергин В.А. Металлотермические системы. – М.: Metallurgy, 1992. – 271 с.
2. Соколов И.П., Пономарев Н.Л. Введение в металлотермию: Учебное пособие для вузов. – М.: Metallurgy, 1990. – 135 с.
3. Овчинников В.В. Термитная сварка: Издательство КноРус. 2004. – 164 с.
4. Лякишев Н.П. Алюминотермия. М.: Metallurgy, 1978. 424 с.
5. Самборук А.Р., Кузнец Е.А., Гурский И.О. Термитная сварка выводов электрохимической защиты/ Современные материалы, техника и технологии. Научно-практический рецензируемый журнал №6 (14), 2017. с. 118 – 122.
6. Термодинамические аспекты восстановления оксидов алюминия и титаном при термитной сварке / Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Ознобихина Н.В. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 12. С. 1291-1295.
7. Разработка состава титанотермитной смеси для сварки / Козырев Н.А., Усольцев А.А, Михно А.Р., Шевченко Р.А., Ознобихина Н.В. // Черная

металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 7. С. 625-630.

8. Разработка технологии титанотермии / Усольцев А.А., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Михно А.Р., Князев С.В. // *Металлургия, технологии, инновации, качество. Труды XXIII Международной научно-практической конференции: в 2 частях.* 2022. Ч1 С. 142-149.

9. Пат. 2783435 МПК В23К 23/00 (2006.01), В23К 35/24 (2006.01) Термитная реакционная смесь для сварки железнодорожных рельсов / Козырев Н.А., Юрьев А.Б., Михно А.Р., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Ознобихина Н.В., опубл. 14.11.2022.

10. Пат. 2783434 МПК В23К 23/00 (2006.01), В23К 35/24 (2006.01) Термитная реакционная смесь для сварки железнодорожных рельсов / Козырев Н.А., Юрьев А.Б., Михно А.Р., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Ознобихина Н.В., Соколов Б.М.

УДК 621.791.042.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ПОД МАРГАНЦОВИСТЫМ ФЛЮСОМ

**Михно А.Р., Морозов М.А., Маракулина М.Ю.,
Усольцев А.А., Князев С.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: marina_marakulina@mail.ru*

Рассмотрена возможность использования сварочного флюса на основе шлака силикомарганца и исследовано влияние фракционного состава на качество наплавки под слоем флюса, изготовленного из шлака силикомарганца. Исследовано влияние режимов наплавки и сварочно-технологических свойств флюсов на качество наплавки.

Ключевые слова: флюс, силикомарганец, шлак, фракция, наплавка.

Применению техногенных отходов металлургического производства при изготовлении сварочных флюсов в настоящее время уделяется все большее внимание. При производстве сплавов силикомарганца образуются отвальные ковшевые шлаки, с содержанием в целом соответствующим требованиям по химическому составу сварочным флюсам. Предварительные результаты опытной сварки показали перспективность использования таких шлаков для производства сварочных флюсов. [1-3].

В исследовании использовались флюсы от 2,5-5 мм и фракция 5-10 мм на основе шлака силикомарганца с химическим составом, мас. %, MnO 6,0-10,0; CaO 29,0- 35,0; MgO 1,0-2,0; Al₂O₃ 6,0-9,0; SiO₂ 42,0-46,0.

Для проведения исследования, шлак силикомарганца рассеивали на различные фракции. После отсева и выделения фракции 2,5- 5 мм и фракции 5-10мм. Флюс сушили в печи при температуре 300 °С в течении 3-х часов. Да-

лее проводили наплавку под слоем флюса, на образцах 300×150 мм толщиной 20 мм из листовой стали марки 09Г2С. Процесс проводили проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм с использованием сварочного трактора АСАW-1250, на различных режимах и с использованием различной фракции флюса 2,5-5 мм и 5-10 мм (таблица 1).

Таблица 1 – Режимы наплавки

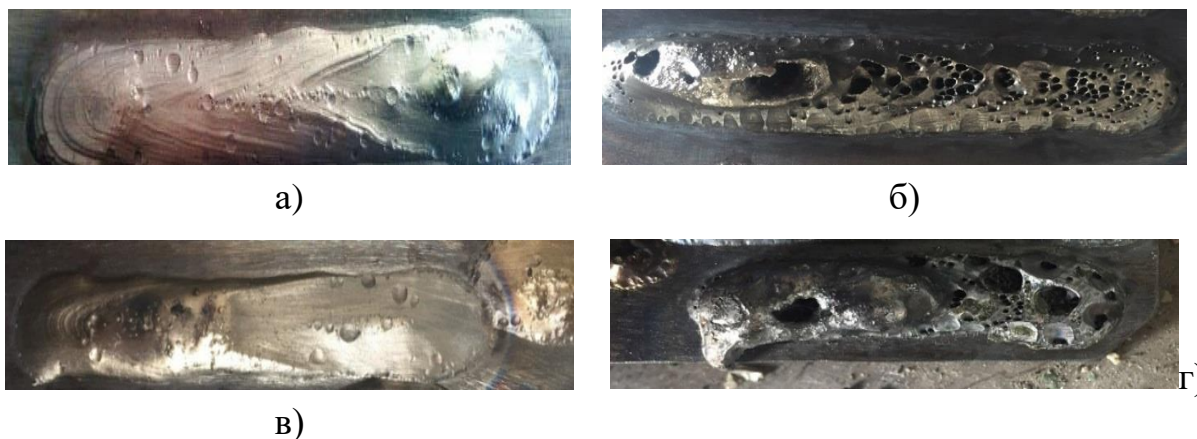
№ образца	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч
Фракция 2,5-5мм			
1	600	28	30
2	650	35	30
3	700	28	30
4	700	35	30
Фракция 5-10мм			
1	600	26	30
2	650	35	30
3	700	28	30
4	700	35	30

Исходя из результатов наплавки наиболее подходящими режимами наплавки были выбраны следующие режимы:

– для фракции от 2,5-5 мм: 1) 600А-28В-30 см/мин.; 3) 700А-28В-30 см/мин.

– для фракции от 5-10 мм: 1) 600А-26В-30 см/мин, 3) 700А-28В-30

Внешний вид наплавленных валиков на фракции от 2,5-5 мм приведен на рисунке 1.



а) образец №1; б) образец № 2; в) образец № 3; г) образца № 4

Рисунок 1- Наплавленный валик образцов из фракции 2,5-5мм.

Внешний вид наплавленных валиков на фракции от 5-10мм приведен на рисунке 2.



а) образец №5; б) образец № 6; в) образец № 7; г) образца № 8;
 Рисунок 2 – Наплавленный валик образцов из фракции 5-10мм

Вывод:

При проведении лабораторных исследований было выявлено следующее:

– Исходя из различного состава фракции флюса наиболее подходящим для наплавки является фракция 2,5-5 мм, обеспечивающая равномерную наплавку валика по сравнению с фракцией 5-10 мм.

– Наиболее подходящим режимом для наплавки является режим сила тока 700 А, напряжение 28 В, скорость сварки 30 м/ч, обеспечивающий равномерную наплавку валика с отсутствием дефектов (поры, раковины, трещины).

Библиографический список

1. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Липатова У.И. Использование барий-стронциевокарбоната при сварке под флюсом. // Сварочное производство. 2017. №6. с.11-16.

2. Крюков Н.Е., Козырева О.Е., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Усольцев А.А. Производство новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца. // Сварочное производство. 2017. №5. с.42-48.

3. Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Козырева О.Е., Липатова У.И. Новые сварочные флюсы на основе шлака силикомарганца для наплавки и сварки перекрытий и оснований шахтной клетки. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. №3. с.140-147.

4. Osetkovsky I.V., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Usoltsev A.A., Gusev A.I. Development of a wear-resistant flux cored wire of Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V system for deposit welding of mining equipment parts. In: International Scientific and Research Conference on Knowledge-based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources (KTDMUR2017), 6-9 June 2017, Novokuznetsk, Russian Federation. 2017. Vol. 84.P. 1-7.

5. Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа / Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Бащенко Л.П. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – т. 61. № 11. – С. 898-906.

6. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Уманский А.А., Соколов П.Д. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков // Черная металлургия. Бюллетень научной и экономической информации. 2018. № 1. С. 77–86.

7. Козырев Н.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Крюков Р.Е. Козырев Н.А., Прудников А.Н., Крюков Р.Е. Изучение свойств порошковой проволоки на основе пыли газоочистки феррохрома // Черная металлургия. Бюллетень научной и экономической информации. 2019. Т. 75. № 3. С. 365–373.

УДК 621.77

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ИЗГИБ ПОЛОСЫ ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ МЕЖВАЛКОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Клепов Д.Н., Зорин И.А., Яшин В.В., Арышенский Е.В.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, e-mail: ssau@ssau.ru*

Разработана имитационная модель горячей прокатки алюминиевых сплавов с высоким очагом деформации в программной среде DEFORM, учитывающая влияние: различных коэффициентов трения на верхней и нижней контактных поверхностях, различного угла выхода заготовки в очаг деформации, степени деформации на образование изгиба полосы при выходе из клетки в вертикальной плоскости. Была определена степень влияния вышеуказанных факторов и характер их воздействия на процесс прокатки.

Ключевые слова: имитационная модель, горячая прокатка, загиб полосы, неравномерность деформации, асимметрия очага деформации, метод конечных элементов.

Введение

В производстве проката на сегодняшний день одной из основных проблем является изгиб полосы в вертикальной плоскости после выхода из межвалкового пространства. Асимметрия очага деформации собственно и ведущая к изгибу может быть классифицирована по типу фактора, которым она вызвана: геометрическая – различием размеров валков или подачей полосы в очаг деформации под углом [1-2]; поверхностная – разницей условий контакта металл/инструмент на рабочих поверхностях [3].

Таким образом, на процесс изгиба оказывает влияние множество факторов, для учёта которых необходима база данных, полученная в результате опытных прокаток с заданными условиями. Однако, проведение таких экспериментов на производственном оборудовании подразумевает материальные затраты и возможность повредить дорогостоящее оборудование. Для избегания данного исхода, в современности, активно применяется моделиро-

вание методом конечных элементов.

Цель работы: изучение влияния параметров горячей прокатки на изгиб полосы после выхода из межвалкового пространства с помощью численного эксперимента.

Постановка задачи

В работе был спланирован и проведен эксперимент, проведен учтывающий влияние ассиметрии деформирования на процесс изгиба полос при горячей прокатке алюминиевых сплавов, основанный на компьютерном моделировании в программе DEFORM.

Для описания объекта исследования использован «метод черного ящика» [4]. Переменные на входе: относительная деформация в процентах, различные условия трения на контактных поверхностях, угол наклона заготовки на входе в очаг деформации в градусах. На выходе получаем кривизну переднего конца проката.

Для задачи угла входа заготовки в очаг деформации смоделирован ролик рольганга диаметром 120 (рисунок 1).

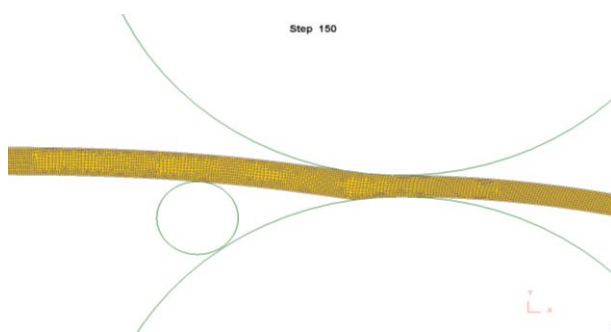


Рисунок 1 - Расположение ролика, задающего угол наклона заготовки

Были использованы следующие допущения:

- принята схема плоского деформированного состояния;
- принято условие изотропности механических свойств металла;
- заготовка определена как пластическое тело
- реологические свойства материала задавались по модели, разработанной Селларсом [5]:
- прокатные валки и ролик заданы как абсолютно жесткие тела;
- результаты моделирования анализировались в декартовой системе координат;
- тип моделирования – анализ Лангранжа;
- длина раскатанной полосы 1500 мм.

Таблица 1 - Планирование эксперимента

Параметр	Угол наклона заготовки на входе, °	Относительная деформация, %	Абсолютная деформация, мм	μ_B/μ_H
Диапазон варьирования	[0;+5]	[22-36]	[10;20]	[0,75;1,25]

По результатам моделирования определена кривизна полосы после прокатки. Для её определения рассчитывали радиус загиба переднего конца полосы по трем точкам. Радиус загиба – величина обратная кривизне.

Координаты точек $[x_i; y_i]$ полученные после моделирования процесса позволяют построить систему трех уравнений (рисунок 2):

$$\begin{cases} r^2 = (x_1 - h)^2 + (y_1 - k)^2 \\ r^2 = (x_2 - h)^2 + (y_2 - k)^2 \\ r^2 = (x_3 - h)^2 + (y_3 - k)^2 \end{cases}$$

где h и k – координаты центра окружности.

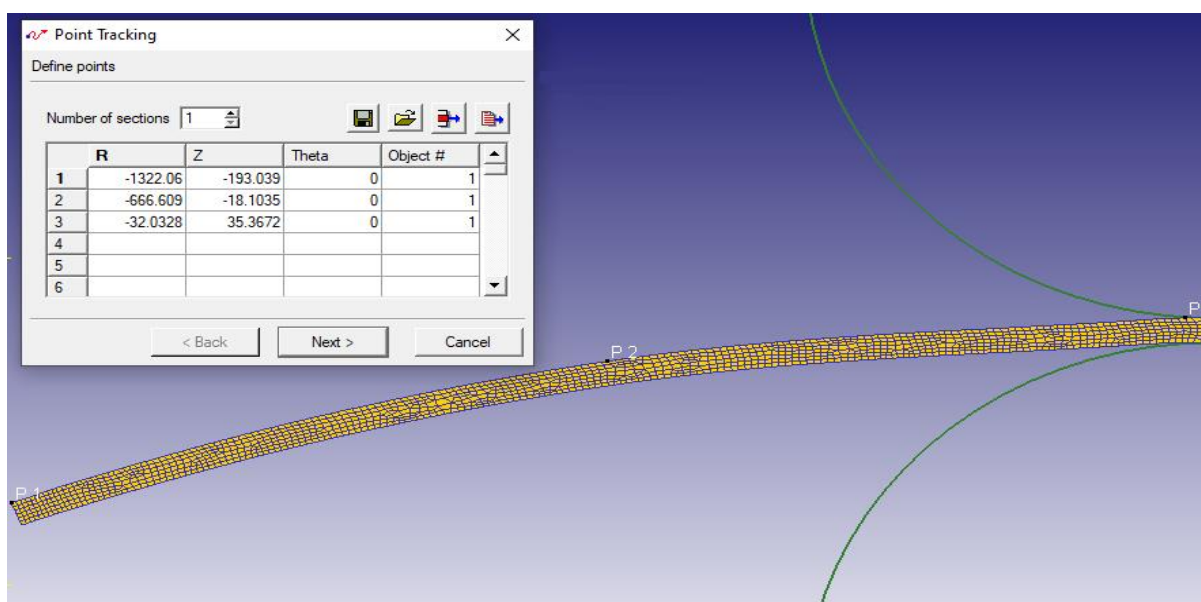
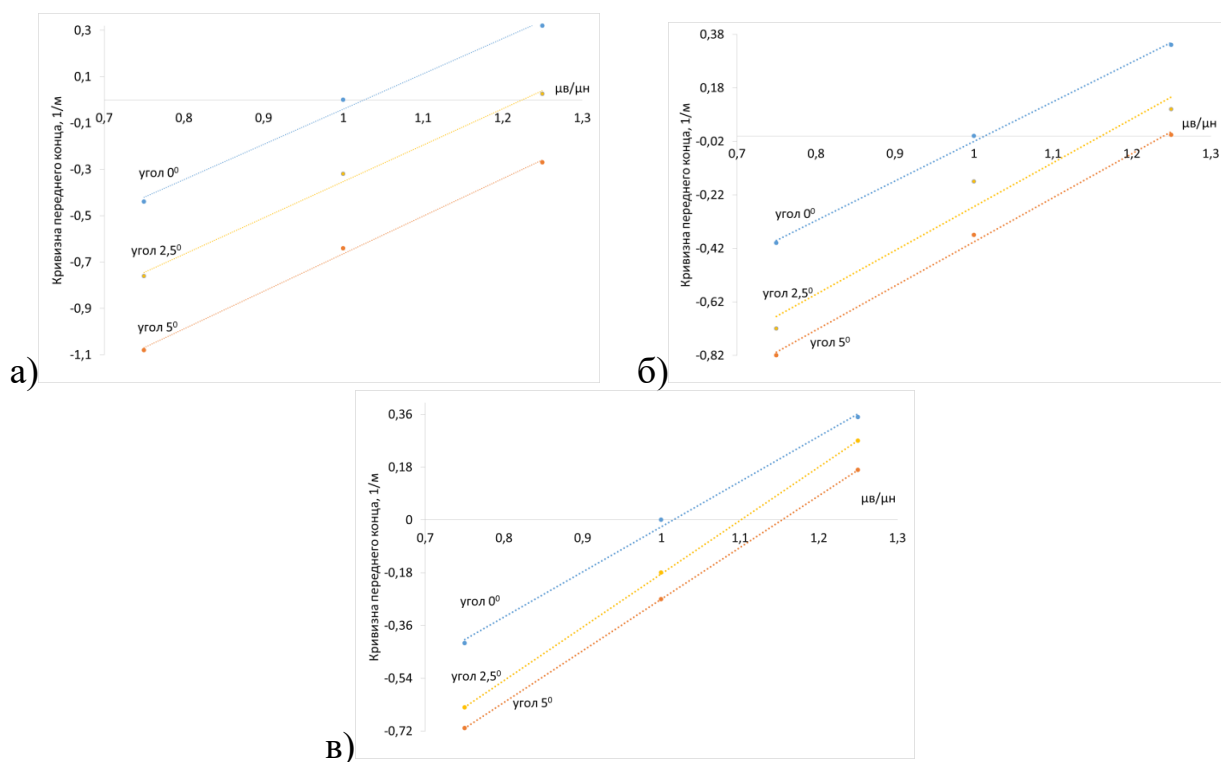


Рисунок 2 – Определение радиуса загиба

Результаты

На рисунке 3 показана зависимость радиуса изгиба от соотношения коэффициентов трения на поверхностях контакта металл/инструмент для разной степени наклона заготовки при входе и степени деформации.

Смена угла наклона с 0° до 5° провоцирует к повышению кривизны конца раската. Максимальный изгиб (в пределах интервала исследования) можно наблюдать при относительной деформации заготовки $\epsilon=22\%$ и угле наклона заготовки в очаг 5° . Повышение степени относительной деформации, за счет прироста монотонности её распределения по очагу пластической деформации, приводит к снижению кривизны раската. К такому же эффекту по снижению степени изгиба приводит выравнивание коэффициентов трения на верхней и нижней поверхностях.



а) – деформация 22 %; б) деформация 30 %; в) деформация 36 %
 Рисунок 3 - Кривизна переднего конца в зависимости от относительной степени деформации, отношения коэффициентов трения и угла наклона заготовки на входе в очаг деформации

Заключение

В работе с помощью моделирования в программном комплексе DEFORM 2D исследовано воздействие на величину изгиба полосы следующих факторов: различие коэффициентов трения на поверхностях контакта металл/инструмент, угла наклона заготовки на входе и степень деформации.

Выявлено, что угол наклона полосы имеет наибольшее влияние на изгиб полосы при прокатке по сравнению с разницей коэффициентов трения. Повышением степени деформации можно добиться снижения несимметричности распределения деформации по очагу пластической деформации прокатки и снизить тем самым величину изгиба.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10099-П, <https://rscf.ru/project/21-79-03041/>.

Библиографический список

1. Теория прокатки: учебник для вузов./ Грудев А.П. – М.: Металлургия, 1988, 240 с.
2. Николаев В.А. Изгиб полосы и другие параметры несимметричной прокатки / В. А. Николаев, А. А. Васильев // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 42-49. – EDN QESKQR.
3. Карпицкий В.С., Карпицкий Ю.В. Факторы, влияющие на изгиб полосы и неравномерность распределения крутящих моментов между

валками при несимметричной прокатке. – 2013.

4. Башев А.А. О выборе математических моделей, идентификации и адекватности динамических систем / А. А. Башев // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей: посвящается 80-летию со дня рождения проф. С.В. Хватова, Нижний Новгород, 21 декабря 2018 года / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Образовательно-научный институт электроэнергетики. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018. – С. 66-69. – EDN ХТПIDJ.

5. Rushchits S.V. et al. Modeling the hot deformation behavior of 1565ch aluminum alloy //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2016. – Т. 684. – P. 35-41.

УДК 536.425

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ В ВЫСОКОМАГНИЕВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ СПЛАВАХ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Зорин И.А., Клепов Д.Н., Рагазин А.А., Арышенский В.Ю.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, e-mail: zorin.ia@ssau.ru*

Проведенное электронно-микроскопическое исследование выявило, что все изученные образцы характеризуются крупнозернистой структурой, по границам которых наблюдаются крупные частицы интерметаллидных фаз на основе $Al_6(Fe, Mn)$ и Al_3Mg_2 , образовавшиеся в процессе кристаллизации. В процессе высокотемпературных обработок по исследуемым режимам происходит распад пересыщенного твёрдого раствора в основном с выделением фаз типа $Al_6(Fe, Mn)$ и $Al_3(Sc, Zr)$.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, легирование, скандий, гафний, просвечивающая микроскопия.

Введение

Алюминиевые деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg отличаются высокими пластическими свойствами и коррозионной стойкостью в различных средах, а также хорошо свариваются аргонодуговой сваркой. Сплавы данного класса нашли широкое применение в автомобильной, авиастроительной и аэрокосмической промышленности в качестве конструкционных материалов, имеется большое число марок промышленных сплавов на основе данной системы, серийно освоенных металлургическими заводами [1, 2].

Для улучшения механических свойств сплавов Al-Mg их легируют малыми добавками скандия и циркония. Sc и Zr, являются эффективными мо-

диффикаторами литой структуры, значительно повышают температуру начала рекристаллизации деформированных сплавов и тем самым обуславливают существенное структурное упрочнение многих современных промышленных алюминиевых сплавов. Кроме того введения циркония и скандия приводит к выделению при термической обработке из пересыщенного твердого раствора наноразмерных упрочняющих дисперсоидов фаз Al_3Sc и Al_3Zr с $L1_2$ структурой.

Однако, высокая стоимость Sc является недостатком данной группы сплавов. В связи с этим для повышения экономического эффекта их использования рассматриваются возможности по замене части дорогостоящего Sc до (0,05-0,15) % на другие редкоземельные элементы такие как Er, Y, Yb, или снижению количества скандия при условии сохранения (или незначительной потери) механических и эксплуатационных свойств относительно классических композиций.

Цель работы – исследование микроструктуры методами просвечивающей электронной микроскопии высокомагнетных алюминиевых сплавов с малыми добавками Zr, Sc, Hf, Er, определить тип и размер частиц алюминидов (с цирконием, скандием, и др) в структуре слитков после термической обработки.

Методика исследований

Приготовление сплавов проводилось в индукционной печи средней частоты с последующей отливкой слитка в стальной кокиль, масса слитка составляла 4 кг. В качестве шихты для сплавов использовались следующие материалы: алюминий марки А85, первичный магний марки МГ90, цинк марки Ц1, лигатуры марок Al-Cr5 %, Al-Sc2, Al-Zr5, Al-Mn10, Al-Er5, Al-Hf2. Присадка лигатур осуществлялась при температуре 770-780 °С с последующей выдержкой 5 мин для лучшего усвоения. Далее расплав охлаждался до температуры 740 °С для присадки магния и цинка. После присадки всех легирующих компонентов производился съём шлака с поверхности расплава и отбор пробы для определения химического состава сплава. Химический состав сплавов представлен в таблице 1.

Для очистки расплава от водорода и неметаллических включений перед отливкой слитка производилось рафинирование расплава карналлитовым флюсом из расчета 5г на 1 кг загруженной шихты. Температура литья составляла 720–740 °С. После затвердевания слиток извлекался из стального кокиля и охлаждался в воде.

Исследование химического состава проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Погрешность измерений составляла от 0,0015 до 0,03 % в зависимости от содержания элемента.

Слитки отжигали в электрической муфельной печи при температурах 260, 370 и 440 °С с различными выдержками – от 2 до 100 часов.

Исследование структуры и фазовый анализ проведены методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием стандартных методик: светлопольных, темнопольных изображений и микродифракции элек-

тронов. Линейные размеры элементов структуры определялись непосредственными измерениями на плоскости наблюдения.

Таблица 1 - Химический состав сплавов 1580 и 1590.

Сплав	Массовая доля элемента, %											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sc	Zr	Er	Hf
1590	0,04	0,07	0,01	0,41	5,57	0,01	0,22	0,01	0,14	0,1	0,11	0,05
1580	0,08	0,13	0,01	0,58	5,28	0,13	0,02	0,03	0,13	0,1	-	

Результаты и обсуждения

Исследование микроструктуры слитков при помощи просвечивающей микроскопии проводились на двух сплавах марок 1580 и 1590 в литом состоянии и после термической обработке при температуре 260 °С -48 часов, 370 °С – 4 часа и 440 °С – 4 часа.

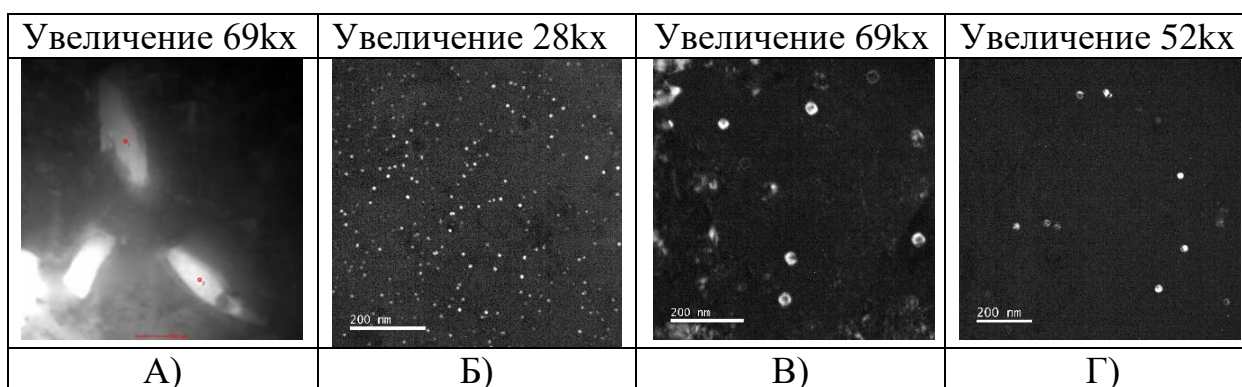


Рисунок 1 – Тонкая структура сплава 1580 в темном поле:

- а) Литое состояние, б) после термической обработки 260 °С -48 часов; в) после термической обработки 370 °С – 4 часа; г) 440 °С – 4 часа.

Образцы сплава 1580 в литом состоянии характеризуются преимущественно однофазной структурой, состоящей из α -твердого раствора алюминия. Однако, на отдельных темнопольных изображениях наблюдались редкие частицы в виде пластин длиной до 100 и шириной до 20 нм, по-видимому, представляющие собой фазу Al_6Mn (рисунок 1 а). Отсутствие на электронограммах рефлексов соответствующих Al_6Mn может быть связано как с низкой объемной долей выделений, так и с их небольшими размерами.

При термической обработке 260 °С - 48 ч приводит к распаду пересыщенного твердого раствора алюминия с образованием высокодисперсных равноосных частиц диаметром 15-20 нм (рисунок 1 б). Характерный контраст типа кофейных зерен на изображениях микроструктуры свидетельствует о когерентных границах частиц с алюминиевой матрицей (рисунок 1 б). Выделения Al_3Sc высокой объемной долей и плотностью распределения в пространстве.

Увеличение температуры до 370 °С – 4 часа способствует росту сред-

него диаметра частиц Al_3Sc до 30 нм (рисунок 1 в). Возрастание размеров выделений приводит к снижению их плотности распределения в пространстве. Также необходимо отметить, что некоторые более крупные частицы характеризуются неоднородным контрастом, когда на темнопольных изображениях, полученных в рефлексе фазы, отдельно подсвечиваются ядро и приграничная область частиц. Появление подобного контраста может быть связано с образованием композитных выделений $Al_3(Sc, Zr)$, в которых ядро обогащено атомами Sc, а периферийные области – Zr. Несмотря на увеличение размеров, частицы продолжают сохранять когерентность с матрицей, на что указывает характерный контраст в виде дужек.

Повышение температуры отжига до $440\text{ }^{\circ}C$ приводит к изменению фазового состава сплава. Помимо фазы $Al_3(Sc, Zr)$ на изображениях микроструктуры наблюдаются частицы Al_6Mn , Al_7Cr выделяющиеся в виде пластин длиной 100-150 нм и шириной до 40 нм. Повышение температуры термообработки не вызвало изменений морфологии и размеров частиц $Al_3(Sc, Zr)$, которые характеризуются равноосной формой и средним диаметром до 30 нм (рисунок 1 г).

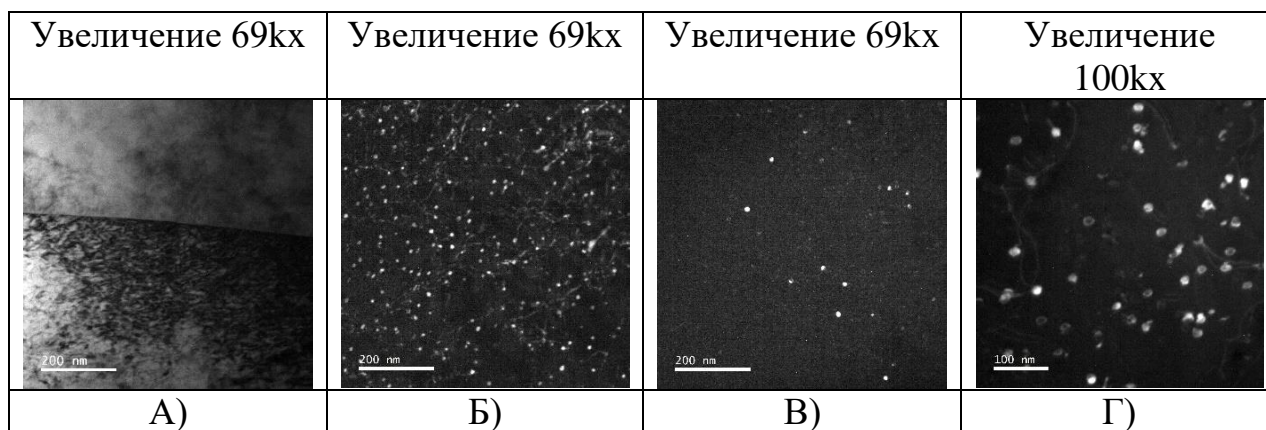


Рисунок 2 – Тонкая структура сплава 1590 в темном поле:

- а) Литое состояние, б) после термической обработки $260\text{ }^{\circ}C$ -48 часов;
в) после термической обработки $370\text{ }^{\circ}C$ – 4 часа; г) $440\text{ }^{\circ}C$ – 4 часа

В сплаве 1590 дополнительно легированным Hf и Er не приводит к изменениям его фазового состава в литом состоянии (рис. 2а), характеризующегося в основном твердым раствором алюминия и выделениями на основе Mn и Fe кристаллизационного происхождения.

Также, как и в сплаве 1580 в результате термической обработки по режиму $260\text{ }^{\circ}C$ - 48 ч происходит выделение высокодисперсных частиц Al_3Sc (рисунок 2 б). Данные выделения характеризуются равноосной формой, средним диаметром до 10 нм, высокой объемной долей и плотностью распределения в пространстве, а также когерентными границами с алюминиевой матрицей, на последнее указывает характерный так называемый контраст типа кофейных зерен. В отличие от сплава 1580 на изображениях также выявляются пластины Al_6Mn длиной до 300 нм и шириной до 40 нм.

При повышении температуры отжига до $370\text{ }^{\circ}C$ с выдержкой 4 часа ча-

стицы Al_3Sc продолжают сохранять когерентность с алюминиевой матрицей и высокую дисперсность, средней диаметр частиц не превышает 10 нм (рисунок 2 в). Однако, при термообработке по данному режиму снижается их плотность распределения в пространстве и объемная доля.

Термическая обработка сплава 1590 по режиму $440\text{ }^\circ\text{C} - 4$ часа вызывает незначительное возрастание средних размеров частиц $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ до 15-20 нм (рисунок 2 г). По сравнению с отжигом при $370\text{ }^\circ\text{C}$ характеризуется большей объемной долей и плотностью распределения в пространстве. Также при данной температуре старения происходит выделение Al_6Mn в виде пластин длиной до 200 нм. Частицы Al_6Mn неравномерно распределены в объеме образца, по-видимому, имеет место гетерогенное выделение фазы по дислокациям и малоугловым границам.

Таким образом в сплаве 1590 наблюдаются более дисперсные и мало-размерные частицы чем в 1580. Это можно объяснить двумя фактами, во-первых, действием эрбия, который создает дополнительные зародыши, вокруг которых затем нарастает скандий. Во-вторых, действием гафния, который обладает меньшим коэффициентом диффузии чем скандий и создает вокруг частиц Al_3Sc оболочку, способствующую повышению их термической стабильности. В тоже время из-за малого размера частиц выявить в них эрбий довольно сложно, поэтому необходимы более глубокий исследования, например, методами атомной томографии.

Выводы:

Проведенное электронно-микроскопическое исследование выявило, что в процессе термообработок сплавов 1580 и 1590 по исследуемым режимам происходит распад пересыщенного твёрдого раствора с выделением в основном дисперсоидов $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$.

Наибольшей дисперсностью и плотностью распределения в пространстве выделений характеризуются образцы, после термической обработки при $260\text{ }^\circ\text{C} - 48$ часов.

Повышение температуры до $440\text{ }^\circ\text{C}$ в сплавах 1580 и 1590 приводит к росту средних размеров частиц. Однако при сравнении размеров дисперсоидов, сформированных при одинаковых условиях термической обработки, показало, что во всех случаях в сплаве 1590, частицы $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ более дисперсные и обладают большей термической стабильностью, сохраняя высокую дисперсность выделений при повышенных температурах.

При высокотемпературном отжиге в микроструктуре сплавов помимо дисперсоидов $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$, также начинает выделяться фаза $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ в виде пластин длиной от 300 нм и шириной от 40 нм.

Работы выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 22-19-00810, <https://rscf.ru/project/22-19-00810/>.

Библиографический список

1. Bazhin V.Y., Alattar A.L., Danilov I.V. Development of technologies for the production of multicomponent ligatures Al—Cu—B—C with high thermal

characteristics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019; 537 (2): 149243

2. Tolley, A. Segregation in Al₃(Sc,Zr) precipitates in Al–Sc–Zr alloys / A. Tolley, V. Radmilovic, U. Dahmen // Scripta Mater. – 2005. – V. 52. – P. 621–625.

3. Knipling, K. E. Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys – A review / K.E. Knipling, D.C. Dunand, D.N. Seidman // Zeitschrift für Metallkunde. – 2006. – V. 97. – P. 246–265.

4. Захаров В.В. Об экономии скандия при легировании им алюминиевых сплавов / В. В. Захаров, И. А. Фисенко // Технология легких сплавов. – 2013. – № 4. – С. 52–60

5. Баранов В.Н. Получение Al–Mg-сплавов с пониженным содержанием скандия / В.Н. Баранов, Б.П. Куликов, П.О. Юрьев, А.И. Безруких // Цветные металлы. – 2021. – № 10. – С. 80-85.

УДК 669

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFexMn(40-x)Ni С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

**Панова В.С., Кузнецова В.А., Осинцев К.А.,
Коновалов С.В., Панченко И.А.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kirilloss@yandex.ru*

В данной работе представлены результаты исследований по прогнозированию фазового состава высокоэнтропийного сплава CoCrFexMn-(40-x)Ni с помощью расчета концентрации валентных электронов. Показано, что образование однофазного твердого раствора на основе ГЦК фазы прогнозируется в сплаве при $20 \leq x \leq 35$ ат. %. Двухфазная структура с кристаллическими решетками ГЦК и ОЦК прогнозируется при $5 \leq x \leq 20$ ат. %. Таким образом, при увеличении концентрации Fe от 5 до 35 ат. % и взаимном уменьшении концентрации Mn структура сплава изменяется из двухфазной ОЦК+ГЦК в однофазную ГЦК.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, Co–Cr–Fe–Mn–Ni, концентрация валентных электронов, фаза, кристаллическая решетка.

В современных условиях развития промышленности и науки возрастает спрос на материалы, которые обладают высокими характеристиками качества, а также экономичны и энергоэффективны. Одним из перспективных направлений в этой области является создание высокоэнтропийных сплавов, обладающих уникальными свойствами. В отличие от традиционных сплавов, которые состоят из одного-двух основных компонентов и легирующих добавок, присутствующих в составе в небольшом количестве, высокоэнтропийные сплавы содержат от пяти основных компонентов, содержание которых

варьируется от 5 до 35 ат. % [1]. Прогнозирование фазового состава таких сплавов является важной задачей, поэтому целью данной работы является анализ зависимости феноменологического критерия образования ГЦК и ОЦК фаз от концентрации Mn и Fe в сплаве $\text{CoCrFe}_x\text{Mn}(40-x)\text{Ni}$.

Концентрации Mn и Fe в сплаве $\text{CoCrFe}_x\text{Mn}(40-x)\text{Ni}$ варьировались одновременно в диапазоне от $x = 5$ до $x = 35$ с шагом 1 ат. %. В качестве ключевого физического параметра была выбрана концентрация валентных электронов (КВЭ), которая определяет фазовую стабильность для формирования ГЦК и ОЦК твердых растворов [3]. Концентрация валентных электронов (КВ) определяется как $\text{КВЭ} = \sum c_i (\text{КВЭ})_i$, где c_i молярная доля i-го компонента и $(\text{КВЭ})_i$ концентрация валентных электронов i-го компонента. Известно, что при $\text{КВЭ} < 6,87$ образуются стабильные ОЦК фазы, при $\text{КВЭ} \geq 8$ - ГЦК фазы, а ОЦК+ГЦК фазы при $6,87 \leq \text{КВЭ} < 8$.

На рисунке 1 представлены зависимости концентрации валентных электронов от взаимного изменения Mn и Fe в составе сплава $\text{CoCrFe}_x\text{Mn}(40-x)\text{Ni}$. Исходя из рассчитанных данных, можно сделать вывод, что образование однофазного твердого раствора на основе ГЦК фазы прогнозируется в сплаве при $20 \leq x \leq 35$ ат. %. Механическая смесь на основе двух фаз ГЦК и ОЦК прогнозируется при $5 \leq x \leq 20$ ат. %.

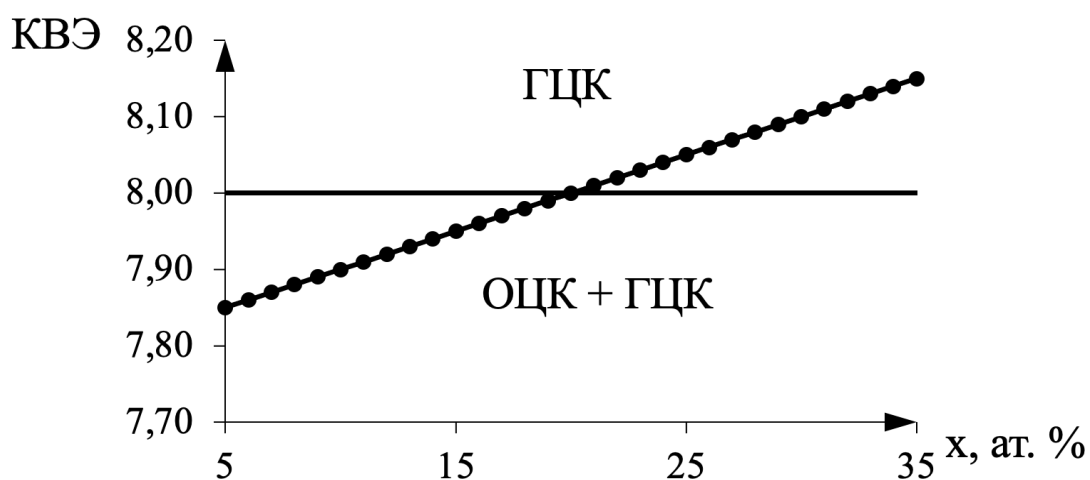


Рисунок 1 – График зависимости концентрации валентных электронов (КВЭ) от концентрации x (ат. %)

Полученные в настоящей работе данные показывают, что при увеличении концентрации Fe от 5 до 35 ат. % и взаимном уменьшении концентрации Mn структура сплава изменяется из двухфазной ОЦК+ГЦК в однофазную ГЦК. Возможным объяснением такого изменения структуры сплава является влияние электронной концентрации на стабилизацию ГЦК и ОЦК фаз. Известно, что электронная концентрация в ГЦК фазе выше, чем в ОЦК фазе, и что при увеличении электронной концентрации в сплаве происходит расширение области существования ГЦК фазы [2]. При увеличении концентрации Fe и уменьшении концентрации Mn электронная концентрация в

сплаве увеличивается, так как Fe имеет более высокую концентрацию валентных электронов (8), чем Mn (7). Это приводит к расширению области существования ГЦК фазы и исчезновению ОЦК фазы при достижении критического значения КВЭ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

Библиографический список

1. Yeh, J. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes [Text] / J. Yeh, S. Chen, S. Lin, J. Gan, T. Chin, T. Shun, C. Tsau, S. Chang // Adv. Eng. Mater. – 2004. – № 5. – P. 299–303.
2. Guo, S. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys [Text] / S. Guo, C. Ng, J. Lu, C. Liu // J. Appl. Phys. – 2011. – № 10. – P. 103505.

УДК 669.017

СТРУКТУРА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi

Панченко И.А., Коновалов С.В., Гостевская А.Н., Дробышев В.К.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: i.r.i.ss@yandex.ru*

Исследование высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeMnNi показало, что микроструктура данного сплава состоит из ветвей дендрита 1, 2, 3 порядка, которые обогащены Cr, Fe и Co. Сканирующая электронная микроскопия показала, что структура высокоэнтропийного сплава является однородной и имеет ГЦК строение.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, CoCrFeMnNi, структура.

Введение

Исследование высокоэнтропийного сплава, формирующего структуру, состоящую из нескольких фаз с большой объемной долей, является актуальной темой исследований. Одним из сплавов, имеющих однофазную структуру неупорядоченного твердого раствора замещения на основе ГЦК, является сплав CoCrFeMnNi [1 – 3].

Высокоэнтропийный сплав является новым и одним из наиболее многообещающих классов материалов [4 – 6]. Благодаря своей структуре он обладает высокими показателями механических и физических свойств. Высокие ожидания относительно возможностей применения Высокоэнтропийный сплав во многом обусловлен его высокой фазовой стабильностью. Известно, что для ВЭС характерно образование фаз с кубической кристаллической решеткой. На сегодняшний день проводились исследования сплавов различ-

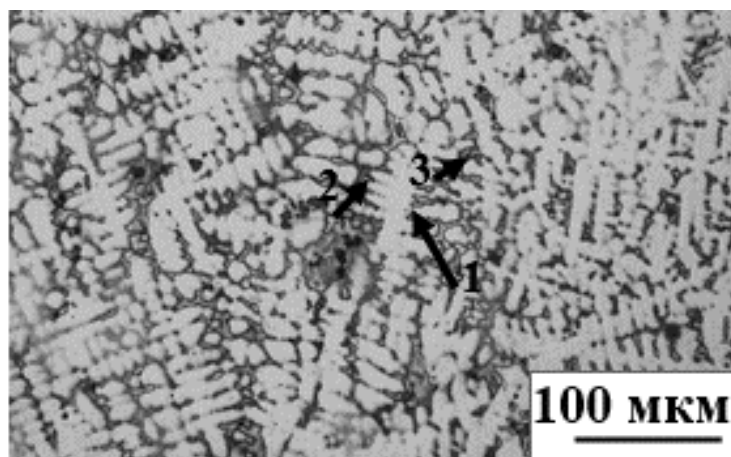
ных материалов и металлов с использованием различных дополнительных легирующих элементов для улучшения их свойств. В отличие от таких сплавов, высокоэнтропийные сплавы содержат по крайней мере пять основных элементов в концентрациях от 5 до 35 ат.%, и в последнее десятилетие они привлекли интенсивные исследования.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовались образцы высокоэнтропийного сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$. Металлографическое исследование микроструктуры было выполнено с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51. Для создания оптического контраста образцы химически травились раствором, представляющим собой HNO_3 и HCl в соотношении 1:3. Исследование структурно-фазового состояния высокоэнтропийного сплава системы CoCrFeMnNi проводилось методами сканирующей электронной микроскопии на микроскопе КУКУ-ЕМ6900.

Результаты исследования

Микроструктура ВЭС $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ состоит из твердого раствора со структурой, представленной в виде ветвей дендрита (рисунок 1). Отмечается, что в сплаве $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$, выявленные дендриты обогащены Cr, Fe и Co, а междендритные области, обогащенными Ni и Mn. Проводя сравнительный анализ полученных результатов с исследованиями, приведенными в работе [7] можно заключить, что полученная дендритная структура может быть присуща высокоэнтропийным сплавам.



1 – оси дендритов 1го порядка; 2 – оси дендритов 2го порядка

Рисунок 1 – Микроструктура высокоэнтропийного сплава

На рисунке 2 представлены результаты СЭМ и ЭДС высокоэнтропийного сплава системы $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$. Микроструктура высокоэнтропийного сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ выглядит преимущественно однородной (рисунок 2 а). Данные полученные при ЭДС анализе, показали, что элементы, образующие твердый раствор с ГЦК структурой распределены в объеме образца (рисунок 2 б – е). По результатам ЭДС было определено содержание в исследуемом сплаве основных элементов (рисунок 2 ж).

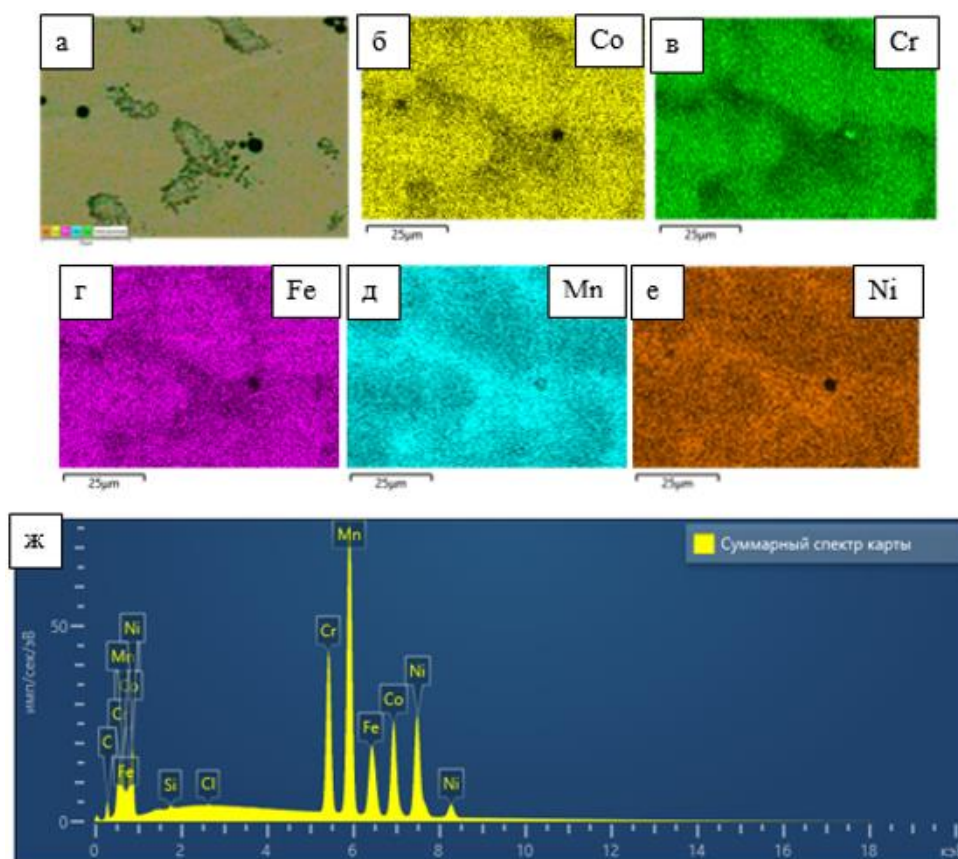


Рисунок 2 –Микрофотография высокоэнтропийного сплава системы $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ (а), ЭДС анализ (карта распределения элементов) (б–е) и ж – ЭДС спектр ВЭС $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$

Заключение

В ходе исследования микроструктуры высокоэнтропийного сплава на основе системы CoCrFeMnNi было выявлено, что структура сплава состоит из твердых растворов с ГЦК фазой. Установлено, что сплав системы $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ состоит из дендритов 1, 2 ,3 порядка. Было установлено, что дендриты, обогащены кобальтом, железом и марганцем. Анализ результатов сканирующей электронной микроскопии показал, что структура сплава $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{10}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_{20}$ однородная. Было установлено, что исследуемая структура имеет содержание элементов близкое к заданным значениям самого сплава.

Работа выполнена в рамках государственного задания No 0809-2021- 0013.

Библиографический список

1. Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S.J., Gan, J.Y., Tsau, T.S., Chang, S.Y. Nanostructured HighEntropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering. // Materials*. 2009. V.11, № 8. Pp. 641-644.
2. Otto F., Dlouhy A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influence of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi highentropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. Pp. 5743 – 5755.

3. Tsai, K.Y., Tsai M. H., Yeh J.W. Sluggish diffusion in CoCrFeMnNi high entropy alloys // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. Pp. 4887 – 4897.

4. Osintsev K., Gromov V., Vorob'ev S., Ivanov Yu., Panchenko, I. Influence of Electron Beam Treatment on the Defect Substructure of a High-Entropy Co–Cr–Fe–Mn–Ni Alloy. // *Steel in Translation*. 2022. V. 52. Pp. 375-379. 10.3103/S0967091222040106.

5. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. V. 61. Pp. 1–93.

6. G.A. Salishchev, M.A. Tikhonovsky, D.G. Shaysultanov, N.D. Stepanov, A.V. Kuznetsov, I.V. Kolodiy, A.S. Tortika, O.N. Senkov. J. Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of highentropy alloys based on CoCrFeNi system // *Accepted manuscript*. 2014. V. 11. Pp. 591.

7. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. Highentropy alloys. // *Nature Reviews Materials*. 2019. V. 4. Pp.515 – 534.

УДК 669.715.621.78

ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексиус В.С.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: a.prudnikov@mail.ru*

Исследована структура крупногабаритных слитков из эвтектического силумина с 12 % Si, изготовленных без обработки и с наводороживанием расплава. Показано, что для слитков из эвтектического силумина диаметром 190 мм характерно наличие неоднородной структуры по их сечению. Установлено, что наводороживание расплава приводит не только к изменению размеров структурных составляющих, но и к появлению в центральной зоне слитка кристаллов первичного кремния.

Ключевые слова: эвтектический силумин, состав, структура, слиток, эвтектика, кристаллы первичного кремния

В настоящее время увеличилось количество работ, посвященных пластической деформации эвтектических и заэвтектических силуминов. Этот интерес связан с широким использованием данных сплавов в промышленности и их комплексом физико-механических и технологических свойств [1-4]. Одним из основных способов повышения механических характеристик силуминов является обработка металла давлением [5-9]. Причем регламентирующим фактором возможности реализации пластической деформации слитков из заэвтектических и эвтектических силуминов является их микроструктура. Зачастую, важную роль в формировании структуры силуминов

играют размеры исследуемых слитков, так как габариты слитка связаны со скоростью охлаждения расплава и, следовательно, с размерами и распределением эвтектического и первичного кремния, а также других промежуточных фаз в структуре сплавов. В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния наводороживания расплава на структуры крупногабаритных слитков (диаметр 190 мм) из эвтектического сплава Al-12 % Si.

В качестве материала исследования использовали слитки из двойного эвтектического силумина Al-12 % Si.

Таблица 1 – Химический состав исследуемого сплава

Сплав	Компоненты сплава, вес. %						
	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti	Al
Al-12 % Si	11,87	0,11	0,02	0,012	0,004	0,002	ост.

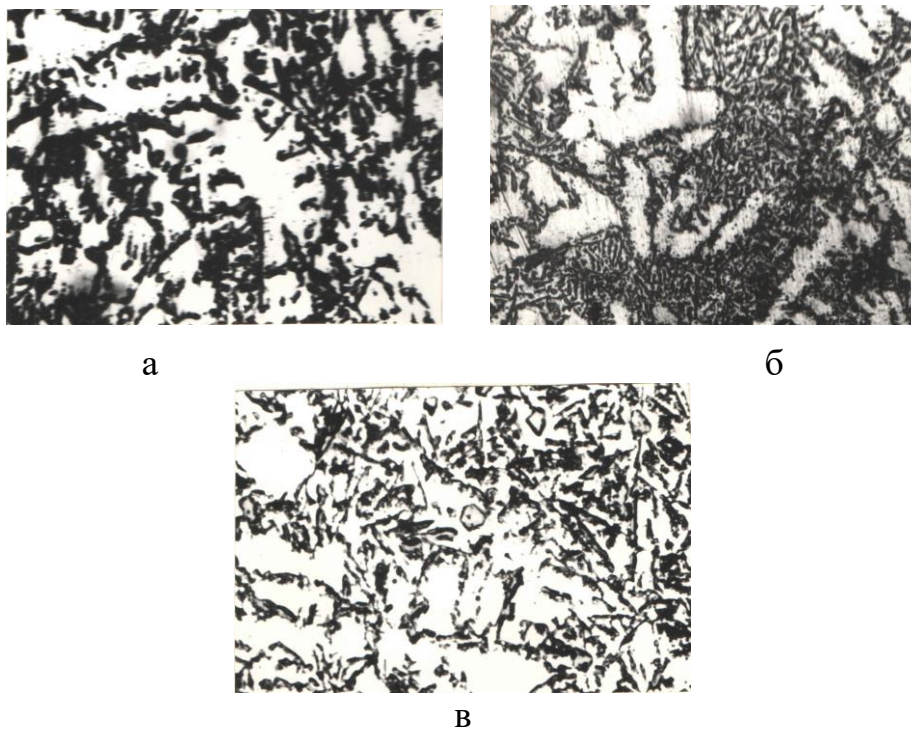
Выплавку силуминов проводили в индукционной высокочастотной печи для алюминиевых сплавов ИАТ-0,06 в промышленных условиях цеха централизованного ремонта АО «Русал-Новокузнецк». Приготовление расплава осуществляли в графито-шамотном тигле емкостью 40 кг. Силумины готовили на алюминии марки А7 (ГОСТ 11069–74), кремнии марки Кр0 (ГОСТ 2169–69). Наводороживание расплава проводили с помощью влажных асбестовых тампонов после загрузки сначала одной, а потом и второй навески партии кремния до их полного растворения. В процессе наводороживания температура расплава изменялась в интервале 700÷760 °С. После снятия шлака с поверхности расплава и отстаивания в течение 5 минут проводили заливку в стальной кокиль цилиндрической формы при температуре 700÷730 °С. Габариты слитков составляли: диаметр 190 мм, высота 520±10 мм, вес 36±0,5 кг.

Металлографический анализ слитков проводили на поперечных темплетях, приготовленных по стандартной методике для алюминиевых сплавов с использованием оптического микроскопа ЛабОМет-И1.

Микроструктура слитков в поперечном сечении по зонам приведена на рисунках 1 (без обработки) и 2 (с наводороживанием расплава).

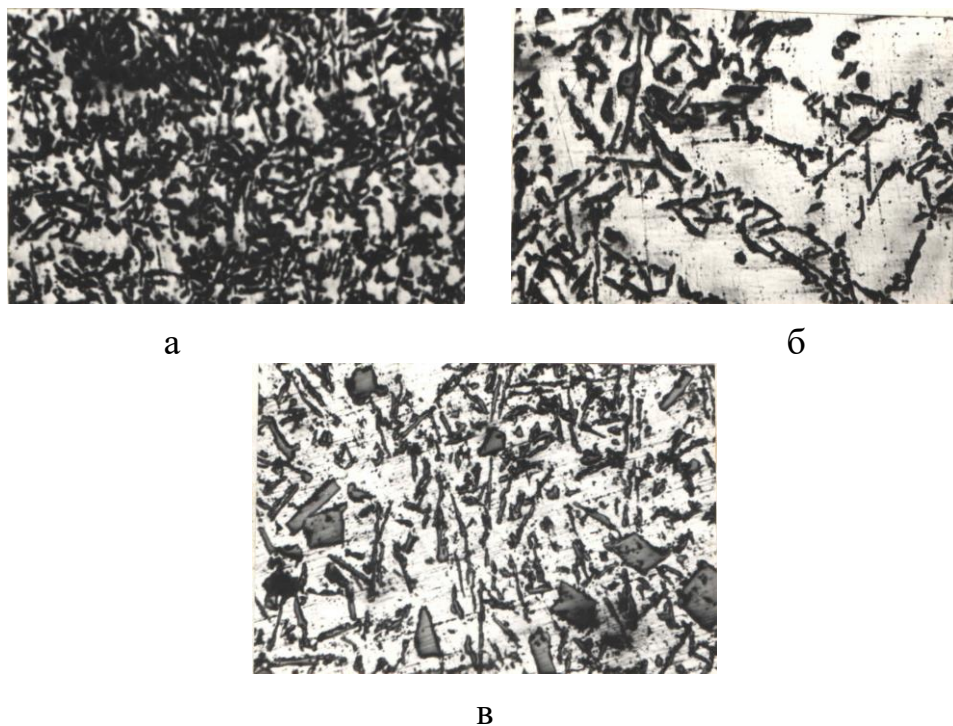
В слитке из эвтектического сплава Al-12 % Si, приготовленного без обработки расплава, в поверхностной области наблюдается частично модифицированная эвтектика (Al+Si) с дендритами или участками α -твердого раствора алюминия (рисунок 1, а). Ближе к центральной части слитка наблюдается переходная зона от модифицированной к размодифицированной эвтектики совместно с участками α -твердого раствора – промежуточная (рисунок 1, б). В большем объеме слитка в его центральной части формируется структура, состоящая из размодифицированной эвтектики игольчатого типа и крупных дендритов и участков α -твердого раствора алюминия (рисунок 1, в). Огрубление структуры центральной части слитка из эвтектического силумина можно связать с замедленной скоростью охлаждения внутренних слоев металла по сравнению с поверхностными слоями. Причем, чем больше диаметр слитка,

тем меньше скорость охлаждения жидкого металла в его центральной части и тем больше степень огрубления структурных составляющих.



а – поверхностная; б – промежуточная; в – центральная зоны

Рисунок 1 – Микроструктура слитка из сплава Al-12 % Si по зонам, $\times 120$



а – поверхностная; б – промежуточная; в – центральная зоны

Рисунок 2 – Микроструктура слитка из сплава Al-12 % Si, приготовленного с наводороживанием расплава, по зонам, $\times 120$

Наводороживание расплава приводит к изменению структуры слитка. В поверхностной зоне слитка также наблюдается частично модифицированная эвтектика, однако объемная доля α -твердого раствора алюминия значительно меньше. В промежуточной и центральной зонах слитка наряду с размодифицированной эвтектикой игольчатого типа в структуре присутствуют кристаллы первичного кремния (КПК). Степень размодифицированности эвтектики (Al+Si), количество и размеры КПК увеличиваются к центру слитка. Средний размер первичных кристаллов кремния составляет 20÷60 мкм (рисунок 2, б, в).

Таким образом, изучена микроструктура крупногабаритных слитков (диаметр 190 мм, вес 36 кг), изготовленных из эвтектического силумина с 12 % Si. Показано, что структура при таких габаритах слитка отличается неоднородностью, в частности наличием нескольких зон с различными размерами и объемными долями структурных составляющих. Установлено, что наводороживание расплава приводит к формированию в центральной зоне слитка структуры с небольшими по размеру КПК.

Библиографический список

1. Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Е.И. Панов, Г.И. Эскин // МиТОМ. – 2004.– № 9.– С. 7-13.

2. Прудников А.Н. Получение прессованных заготовок из заэвтектического силумина и их свойства / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2018.–Т. 5.– № 1-2.– С. 126-131.

3. Prudnikov A.N. Deformable heatproof transeutectic silumin for pistons // A.N. Prudnikov // Steel in Translation. – 2009.– Т. 39. – № 6. – С. 456-459.

4. Афанасьев В.К. Разработка поршневого заэвтектического силумина и технологии изготовления поршней обработкой давлением / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1999.– № 6.– С. 53-56.

5. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов. – 2014.– № 2.–С.14 - 20.

6. Prudnikov A.N. Production, structure and properties of engine pistons made from transeutectic deformable silumin // A.N. Prudnikov // Steel in Translation. – 2009.–Т. 39. – № 5. – С.391-393.

7. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.

8. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины / А.Н. Прудников // Технология металлов.– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.

9. Афанасьев В.К. Технология получения слитков, деформированных заготовок и поршней из заэвтектического жаропрочного силумина и их свойства / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, А.В. Горшенин // Обработка металлов.– 2010.– № 3.– С. 28-31.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СТАРЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ ТРАКТОРНОГО ПОРШНЯ ИЗ СПЛАВА АК21М2,5Н2,5

Прудников А.Н., Закирова Г.К.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: a.prudnikov@mail.ru*

Изучено воздействие старения на линейное расширение тракторного поршня из сплава АК21М2,5Н2,5 в интервале от 100 до 300 °С в течение 1 ч. Установлена возможность снижения значения среднего ТКЛР только для температуры старения 100 °С в высокотемпературной области испытаний 200-400 °С. Уровень снижения составил 5 % от величины среднего коэффициента необработанного поршня.

Ключевые слова: поршень, заэвтектический силумин, температурный коэффициент линейного расширения, старение

К свойствам поршневых материалов предъявляют довольно большое количество требований, причем не только к механическим свойствам, но и к физическим характеристикам. Можно выделить следующие требования к физическим свойствам поршневых материалов, которые давно определены в области двигателестроения. К ним относятся малый удельный вес, высокая теплопроводность и теплоемкость, низкий температурный коэффициент линейного расширения [1-2]. Исходя из набора требований наиболее перспективными поршневыми сплавами являются заэвтектические силумины [3-5]. Одним из методов улучшения физико-механических характеристик поршневых силуминов является термическая обработка, в том числе закалка и старение, отжиг, высокотемпературное старение в зависимости от состава сплава [5-10]. Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния старения на линейное расширение поршня из сплава АК21М2,5Н2,5.

В качестве объекта исследования был выбран поршень ОАО «Камского моторного завода» в состоянии поставки. Данный поршень используется для установки на двигатель тракторов Т-130 и Т-140, Т-170 и Т-180.

Для выбора режимов старения поршня был установлен его состав с использованием спектрометра ARL 3460. Химические элементы входящие в состав поршневого силумина, приведены ниже в % (вес.): Si – 18,8; Cu – 2,59; Mg – 0,39; Mn – 0,30; Ni – 2,30; Cr – 0,31; Fe – 0,59; Ti – менее 0,22; Al – остальное. По результатам установлено, что состав поршня соответствует сплаву АК21М2,5Н2,5 по ГОСТ 1583-93. Образцы для проведения исследований вырезали из юбки поршня.

Для осуществления искусственного старения заготовок из поршня использовали лабораторный сушильный электрошкаф SNOL 3,5.3,5.3,5/3,5-И2М. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) рассчитывали по результатам дилатометрического исследования на оптическом ди-

латометре Шевенара.

В работе изучено влияние температуры старения в интервале 100-300 °С через 50 °С в течение 1 ч на величину температурного коэффициента линейного расширения поршня из сплава АК21М2,5Н2,5. Дилатометрические кривые $\alpha = f(T_{исп})$ для каждой температуры старения представлены на рисунке 1.

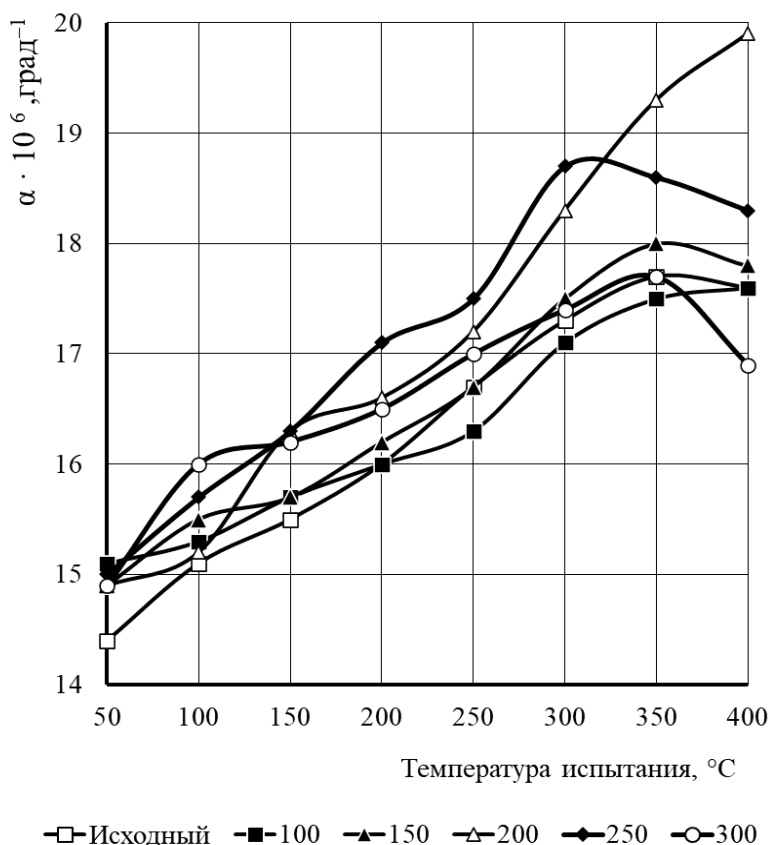


Рисунок 1 – Влияние температуры старения на линейное расширение поршня из сплава АК21М2,5Н2,5 (время выдержки 1ч)

Установлено, что после старения при температуре 100 °С в течение 1 ч наблюдается некоторое снижение значений ТКЛР (1-2,5 %) в интервале температур испытания 200–350 °С по сравнению со значениями ТКЛР образцов не подвергавшихся старению. При более высоких температурах старения 150, 200 и 250 °С отмечается повышение величины ТКЛР при всех температурах испытания. Старение при 300 °С приводит также к увеличению величины ТКЛР, однако, в высокотемпературной области испытания (350–400 °С) значения ТКЛР не выше, а при температуре 400 °С даже ниже и составляет $\alpha = 16,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Определение среднего ТКЛР в высокотемпературном интервале 200-400 °С показало снижение величины ТКЛР только для использования старения сплава при 100 °С в течение 1 ч. Это снижение составило в среднем 5 % по сравнению с необработанным состоянием поршня.

Таким образом, исследование старения поршней из сплава АК21М2,5Н2,5 в интервале от 100 до 300 °С в течение 1 ч показало возмож-

ность снижения значения среднего ТКЛР только для температуры старения 100 °С в высокотемпературной области испытаний 200-400 °С. Уровень снижения составил 5 % от величины среднего коэффициента необработанного поршня.

Библиографический список

1. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – Москва: Металлургия, 1977. – 271 с.
2. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.
3. Prudnikov A.N. Production, structure and properties of engine pistons made from transeutectic deformable silumin// A.N. Prudnikov // Steel in Translation. – 2009.– Т. 39. – № 5. – С. 391-393.
4. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины / А.Н. Прудников // Технология металлов.– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.
5. Афанасьев В.К. Разработка поршневого заэвтектического силумина и технологии изготовления поршней обработкой давлением / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия.– 1999.– № 6.– С. 53-56.
6. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов / А.Н. Прудников // Деформация и разрушение материалов.– 2014.– № 2.– С. 14-20.
7. Прудников А.Н. Линейное расширение легированных и наводороженных силуминов, закристаллизованных под давлением / А.Н. Прудников // Литейное производство.– 2009.– № 2.– С. 2-4.
8. Прудников А.Н. Влияние режимов старения на линейное расширение малокремнистого поршневого силумина / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении.– 2021.– Т. 8.– № 1-2.– 72-77.
9. Прудников А.Н. Термическая обработка поршневых силуминов для снижения их линейного расширения и улучшения эксплуатационных параметров двигателя //А.Н. Прудников // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2004. – № 4. – С. 40-42.
10. Афанасьев В.К. Высокопрочный алюминиевый сплав для деталей узлов летательных аппаратов / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, Горшенин А.В. // Металлургия машиностроения.– 2011.– № 5. – С. 31-34.

МИКРОСТРУКТУРА СТАЛИ 10 ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОТЖИГА

Прудников А.Н., Закирова Ш.К.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: a.prudnikov@mail.ru*

Изучено воздействие отжига на структуру стали 10 после ее циклического нагрева и ковки. Температуру нагрева изменяли от 100 до 900 °С, а время выдержки составляло 1 ч. Установлено, что с повышением температуры отжига от 500 до 900 °С в структуре стали повышается размер зерна феррита и уменьшается величина колоний перлита. Наряду с этим при 900 °С наблюдается значительная разнотеренность феррита.

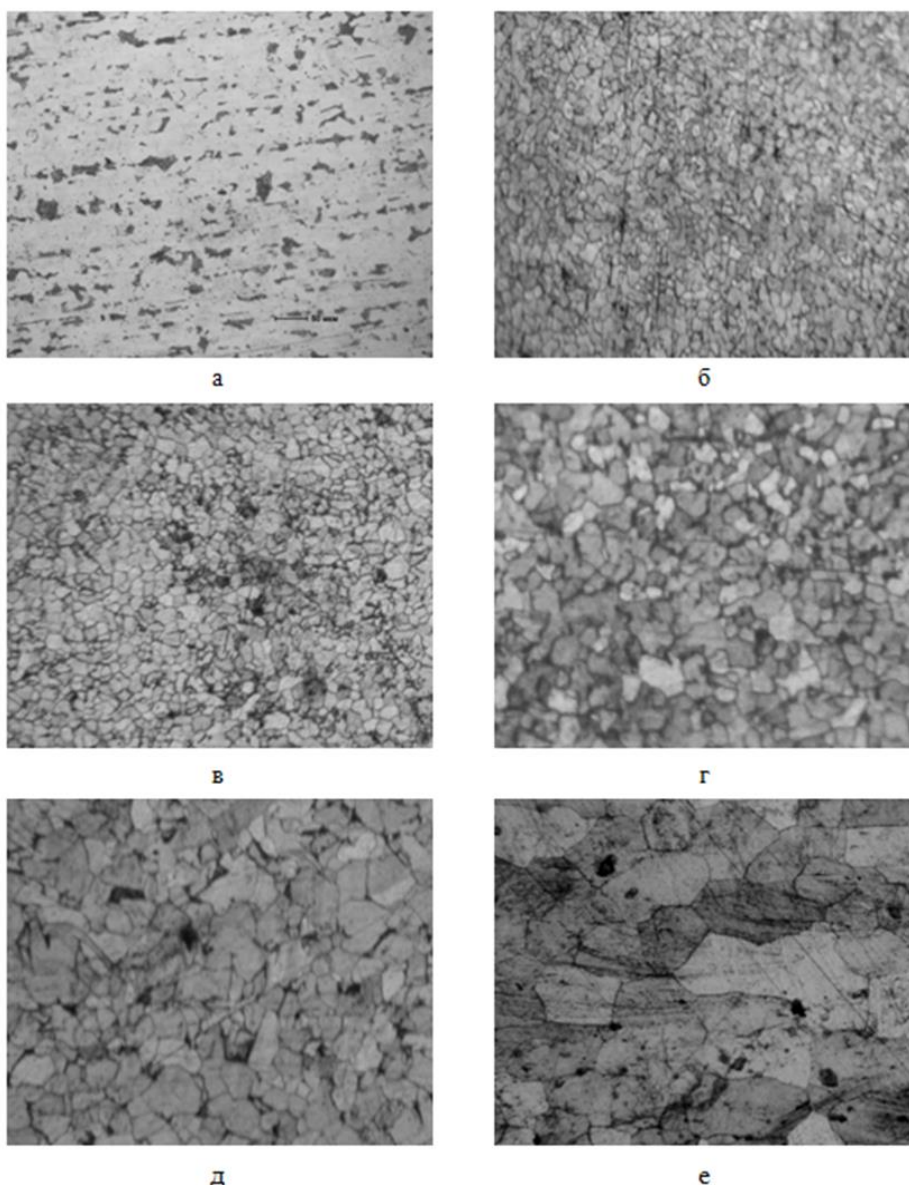
Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, деформационная термоциклическая обработка, отжиг, структура, феррит, перлит

Одним из способов повышения механических характеристик сталей является разновидность термической обработки – термомеханическая обработка (ТМО), включающая совместное воздействие температуры и деформации. Существует довольно большое количество видов ТМО, в том числе высокотемпературная, низкотемпературная, термоциклическая и другие. В данной работе было исследовано влияние деформационной термоциклической обработки (ДТЦО), на свойства низкоуглеродистой стали. Довольно часто ДТЦО используют для улучшения структуры и повышения механических характеристик различных металлов и сплавов [1-5]. В меньшей степени целью обработки являлось улучшение физических свойств [6-8]. Целью настоящей работы являлась определение воздействия последующего после проведения ДТЦО отжига на структуру стали 10.

Для изучения воздействия ДТЦО и отжига на структуру низкоуглеродистых сталей была взята сталь 10сп. Состав стали соответствует ГОСТ 1050-2013 Углеродистая качественная конструкционная сталь.

Для реализации ДТЦО стали применяли термоциклическую ковку в диапазоне 1250-1100 °С и последующий прокат полуфабриката толщины до 3 мм. Технология обработки приведена в работе [9]. Отжиг проводили в лабораторных печах кафедры ОМДиМ. Микроструктуру образцов изучали на оптическом микроскопе ЛабоМет-И1.

Микроструктура листовой стали, изготовленной с использованием режимов ДТЦО (термоциклической ковки), после отжига при температурах от 500 до 900 °С через 100 °С в течение 1 ч приведена на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что микроструктура стали 10 после ДТЦО представляет собой смесь зерен феррита и колоний перлита, а также, что в результате прокатки колонии перлита выстраиваются по направлению деформации.



а – без обработки; б – 500 °С; в – 600 °С; г – 700 °С; д – 800 °С; е – 900 °С
 Рисунок 1 – Влияние температуры отжига (время выдержки 1 ч) на микро-
 структуру стали 10, изготовленной с использованием ДТЦО, $\times 200$

Нагрев и выдержка при низких температурах не оказывают значительного воздействия на структуру стальных образцов. В результате отжига при температурах 400 и 500 °С структура представляет собой смесь зерен феррита и колоний перлита с той лишь разницей, что строчечное расположение колоний перлита не наблюдается и структура становится более равновесной. Кроме того, объемная доля перлита с увеличением температуры отжига также уменьшается. При увеличении температуры отжига стальных образцов до 600 °С эти процессы усиливаются, т.е. увеличивается размер зерна феррита и уменьшается количество колоний перлита. Отжиг в течении 1 часа при температуре 700 °С приводит к более значительному росту зерна феррита, что хорошо видно на рисунке 1 (г). Дальнейшее повышение температуры отжига стали приводит к еще большему увеличению размеров зерна феррита и

уменьшению количества перлита. Однако при дальнейшем повышении температуры отжига до 800 и 900 °С в структуре обработанных образцов проявляется разнотеренность феррита.

Таким образом, с повышением температуры отжига от 500 до 900 °С стали 10, изготовленной с использованием ДТЦО, в структуре увеличивается размер зерна феррита и уменьшается величина колоний перлита. Наряду с этим при 900 °С наблюдается значительная разнотеренность феррита.

Библиографический список

1. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989.– 255 с.
2. Prudnikov A.N. Hardening low carbon steel 10 by using of thermalcyclic deformation and subseautent heat treatment // A.N. Prudnikov, V.A. Prudnikov // Materials science. Nonequilibrium pahse transformations. – 2016. – № 4. – pp. 10 -13.
3. Патент 20130084 РФ. Способ термоциклической обработки чугуна / В.В. Афанасьев, Н.В. Чибряков, А.Н. Прудников и др. – Заявл. 07.07.1998. – Опул. 10.05.1999. – Б. И. № 13. – С. 455.
4. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.
5. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклической ковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // Деформация и разрушение материалов.– 2014.– № 2.– С. 14-20.
6. Prudnikov A.N. Influence of Thermal-Cyclic Deformation and Hardening Heat Treatment on the Structure and Properties of Steel 10 // A.N. Prudnikov, V.A. Prudnikov // Applied Mechaniecs and Materials. – 2015.– Vol. 788. – pp. 187-193.
7. Прудников А.Н. Влияние термической обработки на электрические свойства низкоуглеродистой стали, изготовленной с использованием ДТЦО / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Инновации в машиностроении: Сб. материалов VII Межд. науч.-практ. конф.– Кемерово: КГТУ, 2015.– С. 377-380.
8. Прудников А.Н. Влияние термоциклической ковки и последующего отжига на коэрцитивную силу и линейное расширение стали 10 / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении: – 2016.– № 3.– С. 451-456.
9. Прудников А.Н. Влияние термоциклической ковки и последующего отжига на коэрцитивную силу и линейное расширение стали 10 / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // Актуальные проблемы в машиностроении: – 2016.– № 3.– С. 451-456.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВСТРОЕННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

Баяндина М.М., Кустов А.В.

*Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
г. Красноярск, e-mail: bayandinamaria@yandex.ru*

В статье представлено исследование коэффициента теплоотдачи встроенного теплообменника (дефлегматора) ректификационной колонны, применяемой в технологических линиях химической переработки биомассы древесины. Проведено математическое моделирование по влиянию материала изготовления теплообменника на коэффициент теплоотдачи.

Ключевые слова: ректификация, теплообмен, дефлегматор, коэффициент теплоотдачи, критерий Рейнольдса, критерий Нуссельта, моделирование, материал.

Ректификация широко используется в следующих отраслях: в технологиях комплексной переработки древесины; в лесохимической промышленности при получении продуктов потребления; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; в технологии химической переработки древесины при производстве этанола; при переработке нарастающих природных отходов газификацией и использования синтез-газа для получения биополимера на стадии регенерации растворителей (хлористый метилен, гипохлорит натрия, гексан и т.д.), где также востребованы высокоэффективные и производительные ректификационные колонны.

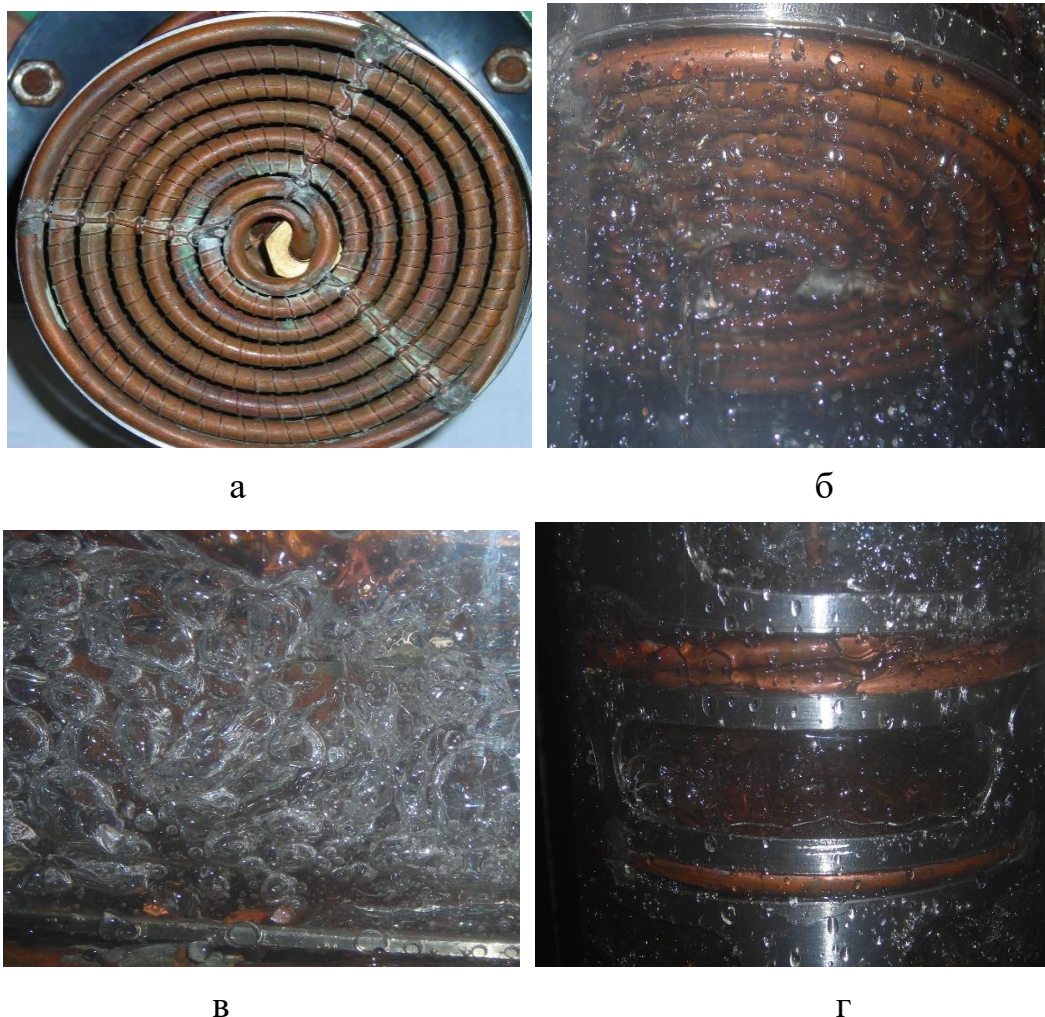
В большинстве своём, ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило, азеотропные, имеющие схожую температуру кипения, что объясняет использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн. При этом применяются различные способы ректификации, такие как азеотропная, экстрактивная, молекулярная, дробная, парциальная [1].

В ректификационных установках довольно широкое применение получили теплообменники различных конструкций. Устанавливается два теплообменника, один из которых, предназначен для частичной конденсации паров и возвращения их в жидкой фазе обратно в колонну для увеличения концентрации головного продукта. Такой теплообменник называется дефлегматор, а сконденсированные пары – флегмой [1-3].

В лабораторном или мелкосерийном производстве, для экономии пространства и из-за небольших объемов производства, используется встроен-

ный дефлегматор, выполненный в одном корпусе с ректификационной колонной.

В настоящей работе производилось определение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи встроенного дефлегматора, выполненного в виде спирали Архимеда из медной трубки диаметром 8*1 мм и площадью теплообмена 0,35 м² (рисунок 1).



а – сухие витки дефлегматора; б – капельный режим;
в – провальный; г – захлебывания

Рисунок 1 – Режимы движения парожидкостной смеси дефлегматоре

Коэффициенты теплопередачи (K) и теплоотдачи (α_1) определялись из общеизвестных зависимостей [2]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

F – площадь теплообмена, $м^2$;

$\Delta t_{ср}$ – средняя разница между температурами горячего и холодного теплоносителей, $К$.

δ – толщина стенки, $м$;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубки, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя (пара) к стенке, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

α_2 – коэффициент теплопередачи от стенки к холодному теплоносителю (вода), $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

По итогам обработки экспериментальных данных, полученных в работе [1, 4] удалось установить, что изменения коэффициентов от величины критерия Рейнольдса имеет степенную зависимость (рисунки 2 и 3).

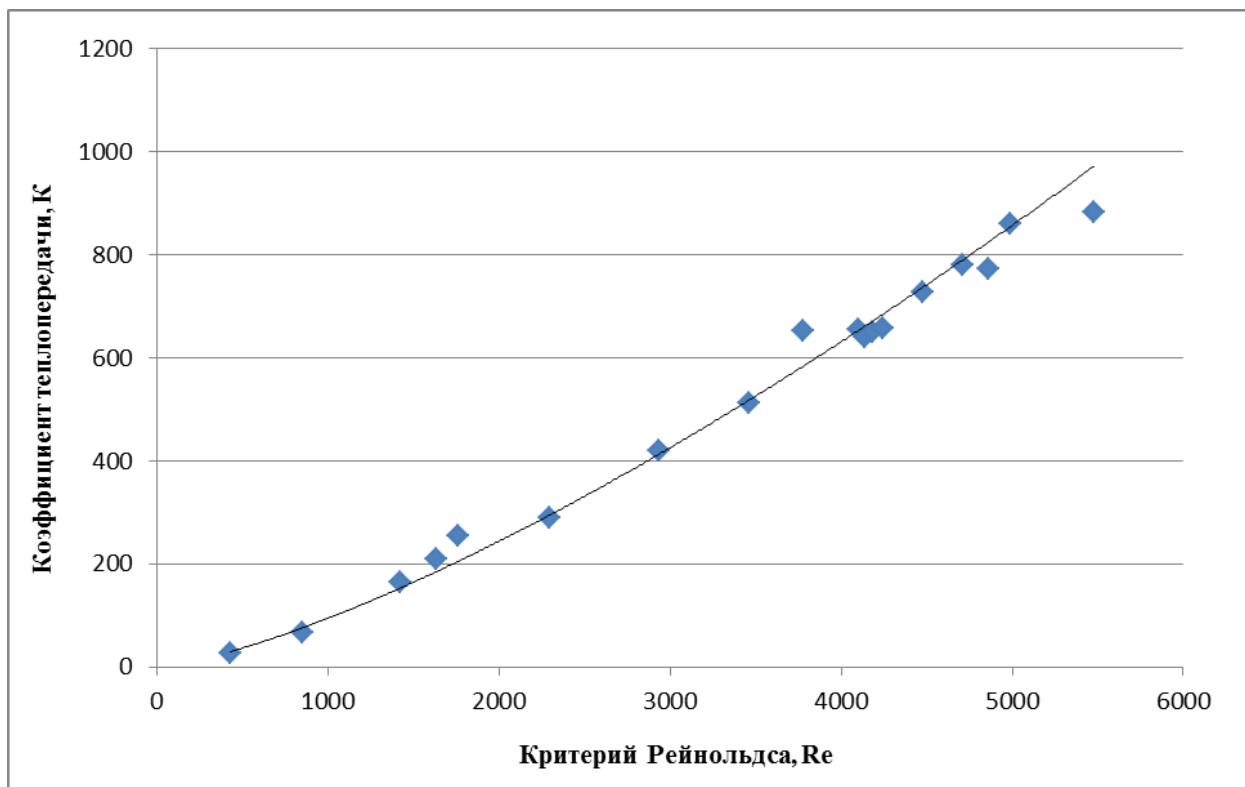


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности от значения критерия Рейнольдса

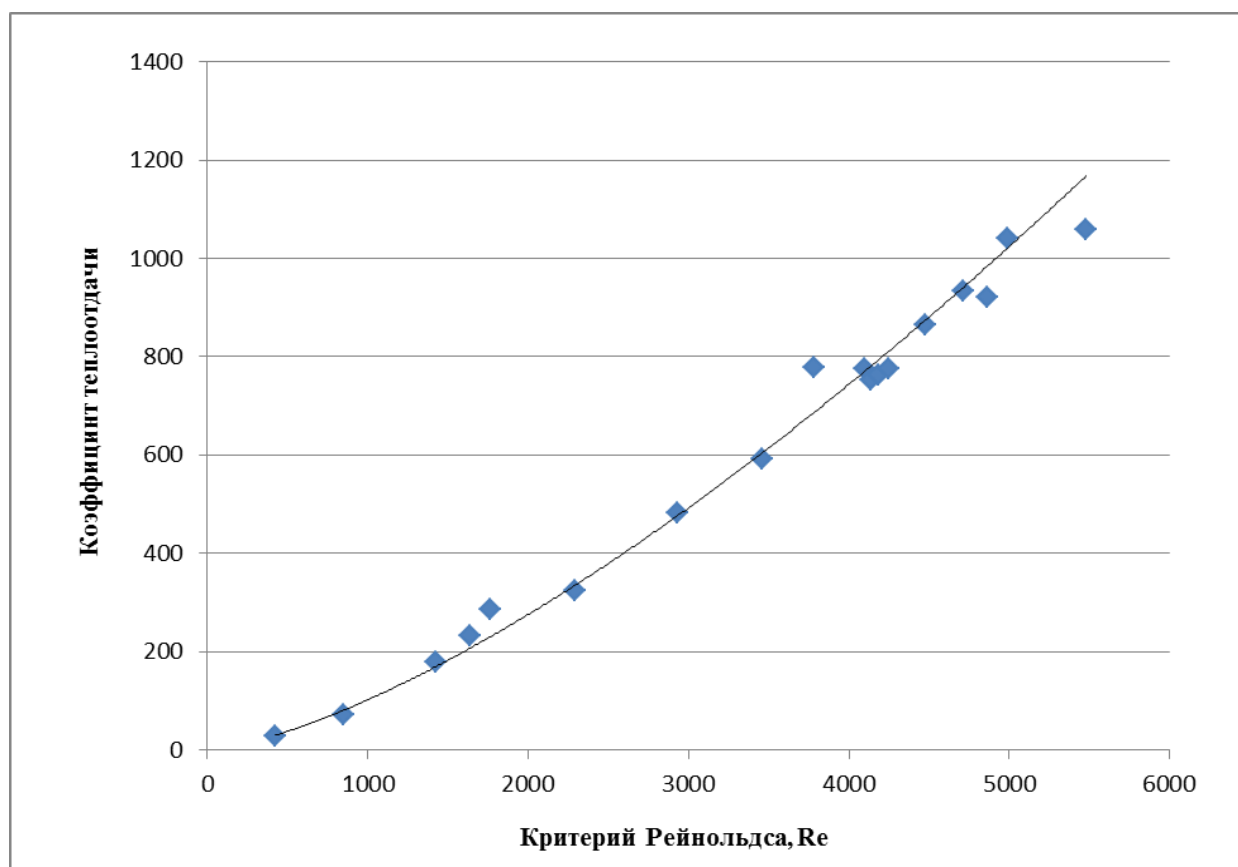


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента теплоотдачи горячего теплоносителя от значения критерия Рейнольдса

Путем обработки экспериментальных данных получены расчетные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи при конденсации паров и теплопередачи

$$\alpha_1 = 0.007 \times \left(\frac{G}{d \times v}\right)^{1.43}$$

$$K = 0.0073 \times \left(\frac{G}{d \times v}\right)^{1.37}$$

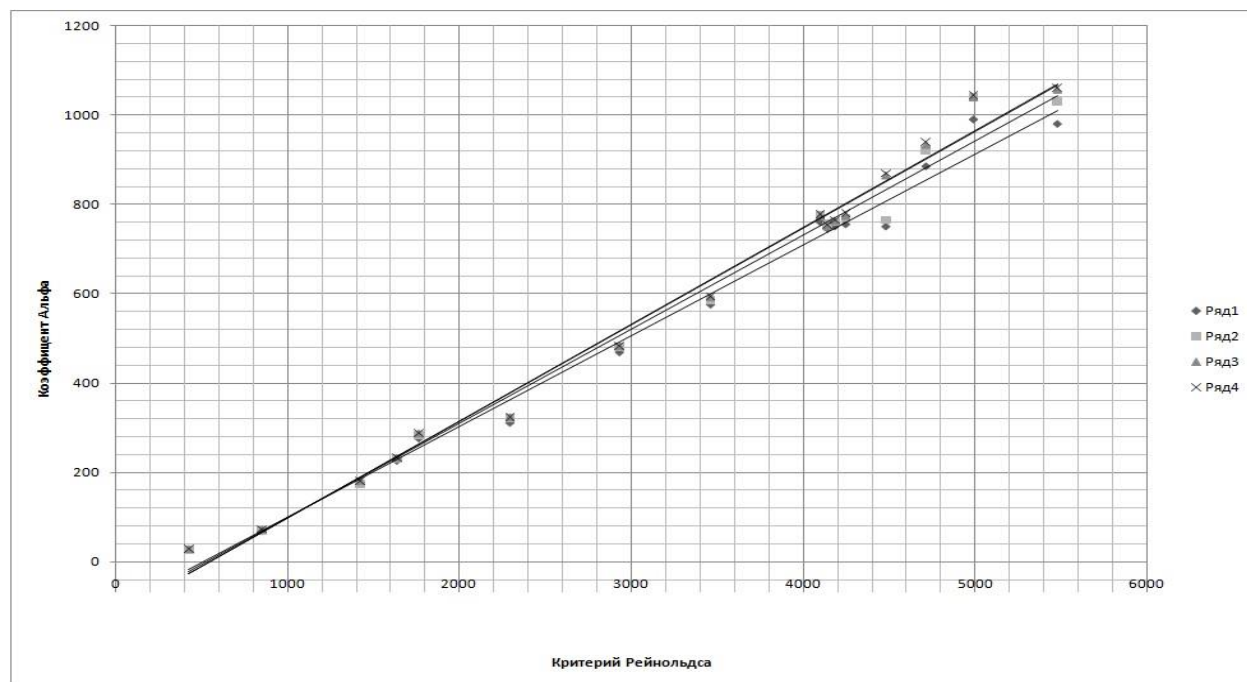
Расчет по указанным зависимостям представлен на рисунках 2 и 3 в виде линии.

После этого было проведено математическое моделирование по определению коэффициента теплоотдачи (α_1) в зависимости от материала изготовления дефлегматора.

В качестве материалов использовались следующие материалы:

Материал	Медь	Алюминий	Бронза	Железо	Латунь	Никель
Коэффициент теплопроводности	401	209,3	58	74,4	244	90,9

Характерные значения определения коэффициента теплоотдачи представлены на рисунке 4.



1 – никель, 2 – латунь, 3 - медь, 4 – алюминий

Рисунок 4 – Характерные значения коэффициента теплоотдачи

Из представленных на графике данных видно, что при величине критерия Рейнольдса более 4000 наблюдается расслоение полученных величин. По нашему мнению, это связано с увеличением турбулизации потока жидкости в трубке дефлегматора.

Исходя из графика (рисунок 4), также видно, что величины коэффициентов теплоотдачи для дефлегматора, выполненного из меди, а также моделирование для латуни и алюминия дают близкие друг к другу значения. Это связано с тем, что данные материалы имеют близкие значения коэффициентов теплопроводности, что видно из таблицы.

Участие в XXVII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» поддержано Красноярским краевым фондом науки

Библиографический список.

1. Кустов А.В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья. Дис... канд.техн.наук; 05.21.03. Красноярск: СибГТУ. 2010.
2. Изучения встроенного дефлегматора в насадочной колонне / Н.А. Войнов [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 3. С. 52–56.
3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химических технологий. М.: Химия, 1973. 750 с.

4. Кустов А.В, Гончарова Я.С., Сергиякова Ю.Т. Исследование встроенного дефлегматора ректификационной колонны // Химические технологии функциональных материалов. 2017. С. 202–205.

УДК 622.6

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Князев С.В., Куценко А.А., Нечепорук А.И., Сорокин А.А.

Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк, e-mail: Aak_mail@mail.ru

В статье рассматривается применение аддитивных технологий в литейном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Описывается, как данная технология может повысить производительность в производственном процессе, а также снизить количество отходов и расходы на материалы.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D печать, литейное производство.

Аддитивные технологии, или технологии аддитивного производства, являются совокупностью процессов создания трехмерных объектов путем последовательного наращивания материала слоями. Они позволяют создавать изделия сложной геометрии и структуры, которые трудно или невозможно произвести с помощью традиционных методов производства, таких как литье, фрезерование, токарная обработка и другие.

Существует несколько методов аддитивного производства, таких как:

1. Фотополимерное производство - создание объектов из металла и пластика с помощью лазерного плавления слоя, наращиваемого на поверхности.

2. Обработка металла путем взрывной сварки - применяется технология сварки металлических порошков, наращиваемых в слоях.

3. Ламинированное производство - применяется для создания изделий из пластика и композитных материалов путем наложения слоев материала друг на друга.

4. Создание моделей на основе физического наращивания - применяется зернистый материал, наращиваемый слоями путем плавления группы зерен и дальнейшего объединения образовавшихся точек.

Применение аддитивных технологий позволяет создавать настраиваемую продукцию в кратчайшие сроки, снижение затрат на материалы, утилизацию и складирование, обеспечение точности и ускорение производственного процесса в целом. Однако, стоимость аппаратов для аддитивного производства крайне высока и пока недоступна для широкого круга производителей.

Литейное производство – это процесс создания изделий из металлов

или сплавов путем заливки расплавленного металла или сплава в форму, где он затвердевает. Литейное производство наиболее широко применяется в производстве различных деталей для машиностроения, автомобильной и военной промышленности, а также в производстве бытовой и другой техники.

Существует несколько видов литейного производства:

1. Отливка в песчаные формы - процесс создания формы из специальной смеси песка и связующих веществ, которая затем заполняется расплавленным металлом.

2. Отливка под давлением - процесс, при котором расплавленный металл заливается под давлением в закрытую форму.

3. Кокильное литье - отливка в закрытую форму, называемую кокиль, которая может быть использована многократно.

4. Отливка в восковые модели - процесс, при котором создается модель из воска, который затем покрывается специальным составом из керамики и других материалов, затвердевает, а затем расплавляется, оставляя заданную пустоту.

Литейное производство имеет ряд преимуществ, таких как возможность создания изделий сложной формы и конструкции, возможность изготовления больших партий деталей и небольшое количество отходов. Тем не менее, этот процесс также имеет ряд недостатков, таких как высокая стоимость форм, необходимых для производства, и токсичность некоторых металлов и сплавов, используемых в процессе.

Применение аддитивных технологий (технологий аддитивного производства) в литейном производстве может значительно ускорить процесс проектирования и создания форм для отлива, улучшить качество изделий и позволить значительно снизить затраты на материалы и утилизацию отходов.

Например, использование процесса селективного лазерного плавления сплавов (Selective Laser Melting, SLM) позволяет создавать литейные формы из сплавов и металлов, что позволяет производить более качественные и точные отливки. Эта технология также позволяет значительно сократить время на создание форм и снизить затраты на материалы.

Кроме того, есть возможность использования аддитивного производства для создания сетчатых (легких) структур форм для отлива, что позволяет уменьшить затраты на материалы, при этом сохраняя необходимую прочность и жесткость.

С помощью аддитивных технологий также возможно создание дополнительных элементов для форм, таких как основания, крышки и других деталей, что упрощает производственный процесс и повышает точность.

Таким образом, применение аддитивных технологий в литейном производстве может значительно повысить его эффективность и конкурентоспособность, а также снизить затраты на производство качественных изделий.

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Западно-Сибирский металлургический комбинат) – это крупнейшее автоматизированное сталелитейное производство в России, расположенное в городе Новокузнецке Кемеровской области. Литейный

цех предназначен для производства стальных и чугунных заготовок, промышленных и сельскохозяйственных машин, а также других металлических изделий.

Литейный цех АО «ЕВРАЗ ЗСМК» оснащен современным оборудованием и технологиями, которые позволяют производить высококачественную продукцию. Цех имеет оборудование для отливки в различные материалы, такие как сталь, чугун, никель и другие. Он также обладает мощными печами и системами для точного контроля температуры, которые обеспечивают высокую точность изделий.

Кроме того, литейный цех АО «ЕВРАЗ ЗСМК» внедряет современные технологии в производственный процесс, в том числе и аддитивные технологии, которые помогают сократить время на проектирование и создание форм для отлива, увеличить точность изделий и снизить количество отходов и расходы на материалы.

В целом, литейный цех АО «ЕВРАЗ ЗСМК» является одним из крупнейших и наиболее современных литейных производств в России и в мире, что позволяет ему обеспечивать высокую конкурентоспособность и качество продукции.

Анализ результатов внедрения аддитивных технологий в условиях литейного производства, показывает, что данная технология позволяет производить печать сложных в изготовлении и малогабаритных моделей.

Так же большой интерес имеет такое направление как ВJ-печать. Главная суть данной технологии – это печать готовых форм для отливки изделий малогабаритных отливок сложных конфигураций единичного производства. Особенно актуальна данная технология становится тогда, когда затрачивать время на изготовление модели традиционным способом или посредством FDM печати не представляется целесообразным. Это направление является перспективным в условиях литейного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и позволит расширить портфель заказов. Однако стоимость оборудования ВJ-печати высока, что требует проведения более глубокого экономического анализа.

В заключении стоит отметить, что не смотря на высокую привлекательность аддитивных технологий в условиях литейного цеха, на производстве должен быть некий симбиоз современных и традиционных способов изготовления моделей. Так же необходимо учитывать специфику конкретного цеха. Литейный цех АО «ЕВРАЗ ЗСМК» специализируется на выпуске крупнотоннажных отливок. Модельщики занимаются изготовлением моделей для массового производства, крупно габаритных отливок, а аддитивные технологии используются для изготовления сложных моделей и для единичного производства (значки, стержневые ящики небольших размеров), а также при изготовлении моделей сложной конфигурации.

Библиографический список

1. Рогов, В. А. Технология машиностроения. Штамповочное и литейное производство : учебник для среднего профессионального образования /

В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 319 с. - (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-534-12327-2. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/518122> (дата обращения: 06.04.2023).

2. Рогов, В. А. Машиностроительные материалы и заготовки : учебник для вузов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. - 3-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 337 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-14001-9. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/512821> (дата обращения: 06.04.2023).

3. Технология металлов и сплавов : учебное пособие для вузов / ответственные редакторы А. П. Кушнир, В. Б. Лившиц. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 310 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-11934-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/518017> (дата обращения: 06.04.2023).

4. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники : учебное пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник, А. С. Филимонов ; под общей редакцией А. Л. Галиновского. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 115 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-12043-1. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/518641> (дата обращения: 06.04.2023).

5. Федоренко, В. Ф. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники / В. Ф. Федоренко, И. Г. Голубев. - 2-е изд. - Москва : Издательство Юрайт, 2022. - 137 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-11459-1. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/495660> (дата обращения: 06.04.2023).

УДК 622.6

СИСТЕМА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И КОМФОРТА В ОБЖИМНОМ ЦЕХЕ

Куценко А.А., Назаров М.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г.Новокузнецк, e-mail: Aak_mail@mail.ru*

Статья описывает систему приточно-вытяжной вентиляции, разработанную для обжимного цеха, которая позволяет обеспечить безопасность и комфорт в процессе работы с металлическими изделиями. Авторы статьи подчеркивают важность использования современных систем вентиляции в обжимных цехах во избежание негативного влияния вредных веществ на здоровье работников и для обеспечения продуктивности и качества производства.

Ключевые слова: обжимной цех, промышленная вентиляция, системы жизнеобеспечения.

Назначение системы вентиляции производственных зданий заключается в обеспечении необходимого уровня комфорта и безопасности рабочих мест, а также оптимальных условий для работы технологического оборудования и производственных процессов. Основные функции системы вентиляции – это обеспечение свежего воздуха, отвод отработанного воздуха, поддержание определенной температуры и влажности в помещении, а также очистка воздуха от токсичных и вредных веществ, что способствует улучшению качества производства и здоровью сотрудников. Конструктивные особенности системы вентиляции, ее проектные параметры и виды определяются в зависимости от типа производства, технологических процессов, численности и концентрации рабочих людей, а также соблюдения санитарных и гигиенических норм.

Обжимной цех – это подразделение металлургического производства, где производятся обжимные изделия из металла. Обжимные изделия могут быть выполнены из различных материалов, таких как сталь, алюминий, медь и другие металлы. Обжимные изделия обычно используются в производстве кабелей, труб и прочих металлических конструкций.

В обжимном цехе применяются специальные машины – обжимные станки, которые позволяют деформировать металлические заготовки для получения нужной формы и размеров. Например, обжимные станки могут использоваться для производства обжимных рукавов, которые используются в гидросистемах и пневмосистемах транспортных средств.

Обжимной цех является технически сложным производственным объектом, и требования к безопасности при работе с металлом очень высоки. Системы вентиляции и другие средства контроля за качеством воздуха, здоровьем сотрудников, а также оборудование для планирования производства и контроля за производительностью являются необходимыми условиями для эффективной работы обжимного цеха.

В обжимном цехе на металлургическом производстве могут выделяться различные вредности, которые могут негативно влиять на здоровье работников.

Основные типы вредностей, которые могут выделяться в обжимном цехе, включают:

1. Пыль. При обжиге металла может выделяться пыль, которая содержит металлические частицы, которые могут вдыхаться работниками и негативно влиять на их здоровье.

2. Шум. Обжимные станки, используемые в обжимном цехе, могут производить значительный уровень шума, что может приводить к проблемам со слухом и здоровьем работников.

3. Вибрации. Обжимные станки могут также генерировать вибрации, которые могут тоже быть вредными для работников.

4. Вредные химические вещества. В процессе обжима могут использоваться смазки, растворители и другие химические вещества, которые могут быть вредными для здоровья работников, если они вдыхаются или попадают на кожу.

5. Гари и испарения. При нагреве металла могут выделяться гари и испарения, которые могут содержать токсичные вещества, такие как оксиды металлов, сероводород и другие, которые могут негативно влиять на здоровье рабочих.

Поэтому, системы вентиляции и другое оборудование для обеспечения безопасности работников обжимного цеха являются крайне необходимыми. Такие системы вентиляции и очистки воздуха должны удалять пыль, вредные химические вещества, гари и иные вредности из воздуха, создавать комфортные условия и поддерживать оптимальный уровень безопасности для работников.

Для разработки эффективной системы вентиляции для обжимного цеха необходимо провести исследование вентиляции и оценить потребности вентиляции для обжимного производства.

Исходя из особенностей производственных процессов и требований к производственной безопасности, необходимо учитывать такие факторы, как:

1. Количество рабочих мест в цеху и их функциональные характеристики.
2. Виды используемого оборудования и их характеристики.
3. Требования по санитарно-гигиенической обстановке, уровень шума и опасных веществ.
4. Класс защиты помещения от взрыва и пожара.

После проведения анализа предполагаемых нагрузок и проведения расчетов необходимо разработать дизайн системы вентиляции.

Основными компонентами системы вентиляции являются воздухозаборные и вытяжные устройства, а также воздушные каналы и вентиляторы. Важно согласовать количество воздуха, поступающего в помещение, с количеством воздуха, удаляемого из помещения.

Также необходимо установить систему фильтрации воздуха, которая помогает улучшить качество воздуха в помещении и защитить оборудование от загрязнения.

Разработка эффективной системы вентиляции для обжимного цеха позволит улучшить производственную безопасность и условия труда рабочих, а также повысить качество производства.

Библиографический список

1. Сазонов, Э. В. Вентиляция: теоретические основы расчета : учебное пособие для вузов / Э. В. Сазонов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 201 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-07876-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/513468> (дата обращения: 06.04.2023).

2. Шилиев, М. И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Примеры расчета систем : учебное пособие для вузов / М. И. Шилиев, Е. М. Хромова, Ю. Н. Дорошенко ; под редакцией М. И. Шилиева. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 250 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-09295-0. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/516823> (дата обращения: 06.04.2023).

3. Курочкин, Е. Ю. Инженерные системы водоснабжения, водоотведения, теплогаснабжения : учебное пособие для вузов / Е. Ю. Курочкин, Е. П. Лашкинский. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 151 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-14904-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/520015> (дата обращения: 06.04.2023).

4. Сазонов, Э. В. Вентиляция: теоретические основы расчета : учебное пособие для среднего профессионального образования / Э. В. Сазонов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 201 с. - (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-534-11915-2. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/518659> (дата обращения: 06.04.2023).

УДК 622.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ТЯГОДУТЬЕВЫХ АГРЕГАТОВ ГО МОЗ НА АСПИРАЦИОННЫЕ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫЕ УСТАНОВКИ

Куценко А.А., Назаров М.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: Aak_mail@mail.ru*

В статье рассматривается проблема очистки дымовых газов на металлургических предприятиях и возможные пути ее решения. Описывается принцип работы аспирационных газо-жидкостных установок и их предпочтения по сравнению с традиционными тягодутьевыми агрегатами ГО МОЗ.

Ключевые слова: очистка дымовых газов, тягодутьевые агрегаты, аспирация.

Замена тягодутьевых агрегатов ГО МОЗ на аспирационные газо-жидкостные установки (АГЖУ) может повысить эффективность очистки дымовых газов и улучшить экологическую обстановку на производстве.

АГЖУ являются современной технологией для очистки дымовых газов путем абсорбции вредных веществ, распределенных в газах, в жидких растворах. АГЖУ работает по принципу поглощения вредных газов с помощью специальных жидкостей, называемых абсорбентами. При прохождении дымовых газов через абсорбенты вредные газы удаляются из газовой смеси и

улавливаются в жидком состоянии, образуя суспензию. Затем жидкость удаляется фильтрацией.

Аспирационные газо-жидкостные установки имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными тягодутьевыми агрегатами ГО МОЗ. Они обеспечивают более высокую эффективность очистки дымовых газов и, следовательно, более чистый выхлоп. Дополнительные преимущества АГЖУ включают более низкие затраты на эксплуатацию и обслуживание, а также более гибкую регулировку производительности.

В целом, замена тягодутьевых агрегатов ГО МОЗ на аспирационные газо-жидкостные установки является эффективным способом совершенствования системы очистки дымовых газов на производстве. Таким образом, установка АГЖУ может не только улучшить экологическую обстановку на производстве, но и увеличить его эффективность и уменьшить затраты на эксплуатацию.

Основными элементами конструкции АГЖУ могут включать:

1. Абсорбент. Это жидкость или растворитель, который используется для поглощения вредных газов, распределенных в газовых потоках. Он выбирается в зависимости от загрязнения, которое необходимо удалить, и может включать в себя воду, натриевую гидроксид, калиевую гидроксид, аммиак, водород пероксид и другие.

2. Форсунки. Это устройства, которые позволяют распылять абсорбент на проходящие дымовые газы и обеспечивать максимальный контакт между абсорбентом и газом.

3. Резервуары. Это емкости, которые содержат абсорбент для его последующей переработки и использования.

4. Фильтры. Это устройства, которые удаляют оставшиеся загрязнения из абсорбента после того, как он был использован.

Принцип работы АГЖУ заключается в том, что дымовые газы проходят через форсунки, которые распыляют абсорбент на газовую струю. Абсорбент и газ взаимодействуют в контактных зонах, и вредные газы и другие загрязнения поглощаются абсорбентом и удаляются из газового потока. Беспорядочные капли абсорбента, причиненные форсунками, попадают на дно аппарата. Отбираются лишь необходимые компоненты. Суспензия проходит сквозь фильтры, удаление твердых частиц из абсорбента, и циркулирует обратно в систему для повторного использования.

В целом, АГЖУ представляют собой экологичную и экономически эффективную технологию для очистки дымовых газов от загрязнений.

На данный момент схему оборудования ГО МОЗ можно описать следующим образом: от дымопровода, удаляющего дымовые газы от МОЗ, отходят три ветви газоочистного оборудования. В состав каждой ветви входит:

- каплеуловитель;
- труба Вентури;
- вентилятор типа ВМ-20а (левый, производительность

до 160000 м³/ч)

Газоочистка МОЗ находится в постоянной работе по принципу – две ветви в работе, одна ветвь в резерве. Эффективность работы газоочистного оборудования ГО МОЗ по данным ЦМУТ СОС АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет порядка 92,6 %.

Путем замены оборудования тягодутьевых агрегатов ГО МОЗ на установки АГЖУ, повысится эффективность очистки удаляемых дымовых газов от МОЗ и улавливания продуктов горения (диоксид азота, оксид желе-за, СО, СО₂, и т.п.) содержащихся в отводимых дымовых газах до 96-98 %.

Для эффективной очистки от некоторых газовых примесей (SO₂, HCN, HCl и т.д.) в орошающую жидкость требуется добавка химических реагентов (соли, кислоты, щелочи и т.д. в зависимости от состава газовых примесей).

Корректировка рабочего уровня жидкости в баке производится с помощью вентиля рабочего слива. Для очистки бака от скопившегося шлама производится полный слив жидкости с помощью вентиля полного слива.

При очистке от газовых примесей в функциональную схему добавляется узел подачи химических реагентов.

Библиографический список

1. Сазонов Э.В. Вентиляция: теоретические основы расчета : учебное пособие для вузов / Э. В. Сазонов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 201 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-07876-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/513468> (дата обращения: 06.04.2023).

2. Шиляев М.И. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Примеры расчета систем : учебное пособие для вузов / М.И. Шиляев, Е.М. Хромова, Ю.Н. Дорошенко ; под редакцией М. И. Шиляева. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 250 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-09295-0. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/516823> (дата обращения: 06.04.2023).

3. Курдюмов В.И. Безопасность жизнедеятельности: проектирование и расчет средств обеспечения безопасности : учебное пособие для среднего профессионального образования / В.И. Курдюмов, Б.И. Зотов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 249 с. - (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-534-09351-3. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/514125> (дата обращения: 06.04.2023).

4. Клим, О. Н. Основы металлургического производства : учебное пособие для среднего профессионального образования / О.Н. Клим. - Москва : Издательство Юрайт, 2023. - 168 с. - (Профессиональное образование). - ISBN 978-5-534-13295-3. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. - URL: <https://urait.ru/bcode/519357> (дата обращения: 06.04.2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu

Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В., Панченко И.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: i.r.i.ss@yandex.ru*

В статье рассматривались образцы, которые были получены методом наплавки алюминиевой проволоки марки 7075 на алюминиевую подложку. При испытании на усталость было выявлено, какое максимальное число повторно-переменных нагружений (циклов) выдержит материал до разрушения.

Ключевые слова: структура, микротвердость, алюминиевый сплав 7075, усталость, испытание на усталость.

Введение

Алюминиевый сплав 7075 - один из самых прочных доступных алюминиевых сплавов, что делает его ценным в условиях высоких нагрузок. [1]. Такой сплав имеет плотную структуру и сильную коррозионную стойкость. Слав системы Al-Zn-Mg-Cu широко используется в аэрокосмической промышленности, авиационной и транспортных областях. В последние годы все большее значение приобретают исследования и разработки в области электродугового аддитивного производства высокоэффективных алюминиевых сплавов.

Целью данной работы являлось установление зависимости параметров наплавки алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu, полученного аддитивным способом на структуру излома и механические свойства.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования использованы образцы, наплавленные с помощью алюминиевой проволоки на алюминиевую подложку, которые были получены аддитивным методом. Аддитивное производство с проволочной дугой может быстро реализовать интегрированное формирование компонентов из алюминиевого сплава, что позволяет значительно сэкономить стоимость сырья, а также сократить цикл обработки, который успешно применяется в промышленности [2].

Для наплавки использовались следующие режимы: скорость подачи проволоки 5 м/мин, напряжение 15.5 В, расход газа Ar 13 л/мин. На рисунке 1 изображен внешний вид наплавленного алюминиевого сплава. После наплавки из полученного слитка алюминиевого сплава производилась подготовка образцов для проведения испытания на усталость.

Образцы, полученные из алюминиевого сплава 7075 вырезались на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ (числовое программное управление) струйного типа ДК7732 M11. Исследования проводили в лабораторных условиях. Поскольку на усталостные свойства материала

крайне большое влияние оказывает состояние поверхности, то была проведена шлифовка и полировка всей рабочей поверхности образцов для усталостных испытаний.



Рисунок 1 – Внешний вид наплавленного алюминиевого сплава

Результаты и их обсуждение

Усталостное разрушение металлов происходит в условиях повторяющихся переменных напряжений, значения которых меньше предела прочности. Испытание проводилось на установке для растяжения, разработанной и изготовленной в «СибГИУ». Установка состоит из жесткого металлического каркаса, в котором установлен источник магнитного поля с измерительной аппаратурой и датчиком движения [3].

Для проведения механических испытаний на статическое растяжение подготавливали образцы по ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» и имели размеры 12x4x130 мм (рисунок 2). Концентратор напряжений создавался надрезом в виде полукруглых вырезов радиусом 20 мм.

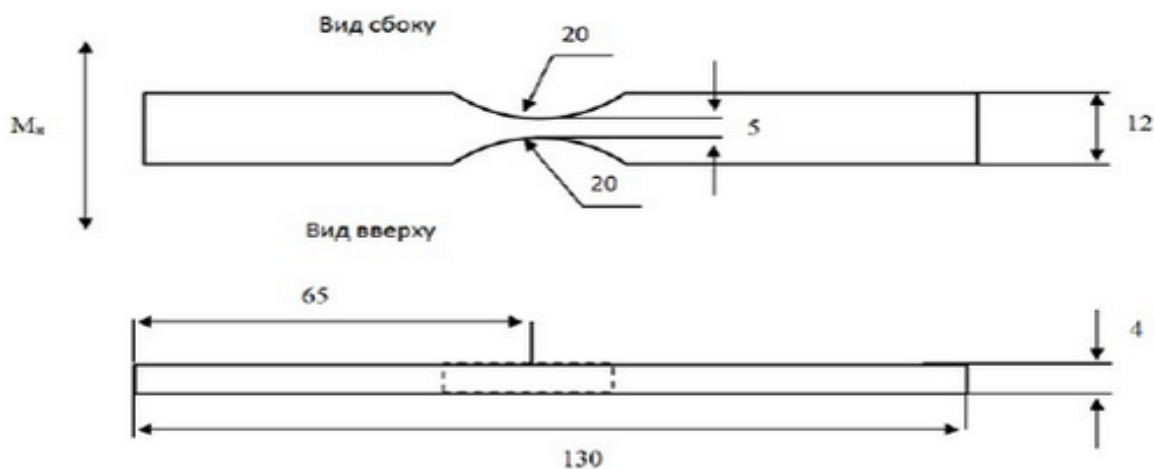


Рисунок 2 – Вид образца для усталостных испытаний

Всего было разрушено 6 образцов. Среднее значение циклов до разрушения составило 234748 ± 33801 .

После проведения испытаний на растяжение образцы были рассмотрены под сканирующим микроскопом. Результаты, полученные при исследовании поверхности излома представлены на рисунке 3.

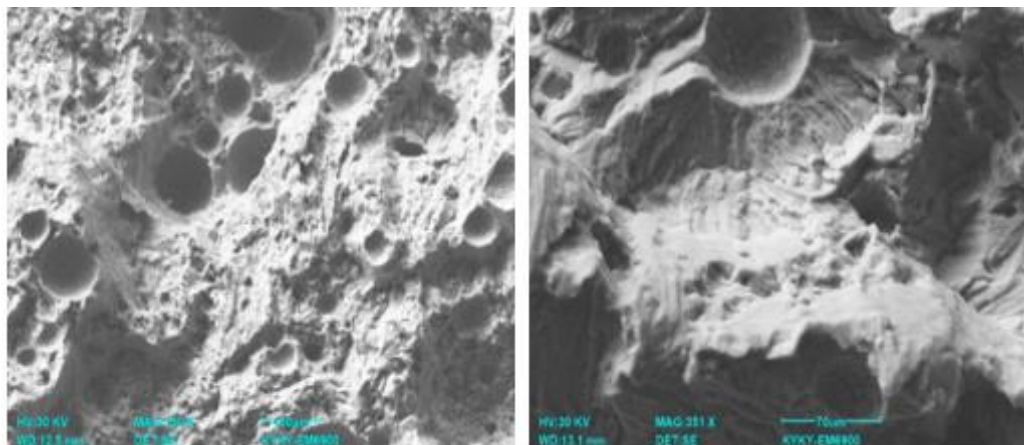


Рисунок 3 - Структура излома алюминиевого сплава Al7075

Видно, что в изломе присутствуют области микротрещин, которые впоследствии могут привести к разрушению образцов [4]. Наибольшее количество пор наблюдается в образце, подвергнутому вязкому излому. Поверхность разрушения после проведения испытания показывает присутствие пор и ямок материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

Библиографический список

1. Адаскин, А.М. Материаловедение (металлообработка): учебное пособие / А.М. Адаскин. - М.: Academia, 2018. - 384 с.
2. Oropeza, D.; Hofmann, D.C.; Williams, K.; Firdosy, S.; Bordeenithikasem, P.; Sokoluk, M.; Liese, M.; Liu, J.; Li, X. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire. *J. Alloy. Compd.* 2020, 834, 154987.
3. Воробьев С.В. Увеличение усталостной долговечности сталей различных структурных классов электронно-пучковой обработкой // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2016. - №4. - С. 260-262.
4. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов. - М.: МГТУ, 2008. - 648 с.

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА

**Сафонов С.О., Лопатина А.О., Дида Н.И., Савичева Д.Н.,
Тархнишвили Г.Э.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru*

Проведены экспериментальные плавки металлического марганца с разным содержанием алюминия и силикокальция в шихтовых материалах. Установлено влияние содержания СК30 в шихте на массу слитка, извлечение ведущего элемента и содержание неметаллических включений в слитке.

Ключевые слова: металлотермия, прямое восстановление, силикокальций, вязкость, неметаллические включения, экзотермический процесс.

Введение

К металлотермическим способам производства металлов и сплавов относятся такие процессы, в основе которых лежит восстановление оксидов металлами, обладающими большим сродством к кислороду, чем металл восстанавливаемого оксида.

Сродство элементов к кислороду характеризует прочность оксида. Количественно эта величина может быть выражена через свободную энергию образования оксида ΔG .

На рисунке 1 приведен ряд зависимостей свободных энергий образования оксидов от температуры. Видно, что прочность оксида (величина ΔG_{MeO}) возрастает в следующем порядке: NiO, MoO₃, WO₃, FeO, Cr₂O₃, MnO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO.

Кислые кремнеземистые шлаки являются довольно тугоплавкими (температура плавления чистого кремнезема 1986 К) и очень вязкими. Известь в этом смысле полезна: она снижает температуру плавления шлака и, следовательно, разжижает шлак при температуре процесса. Снижение температуры плавления и вязкости шлака облегчает разделение металла и шлака после восстановительных реакций. Дополнительное разжижение шлака обеспечивают добавками плавикового шпата.

Поскольку тепловой эффект процесса при восстановлении металлов кремнием в большинстве случаев менее 2400 кДж на 1 кг шихты, то силикотермические процессы обычно являются печными процессами (исключение составляет процесс получения ферромолибдена, где основным восстановителем является кремний с небольшой добавкой алюминия).

Для внепечных процессов восстановителем в большинстве случаев является алюминий. Реакция восстановления оксидов алюминием протекает с

выделением достаточного количества тепла.

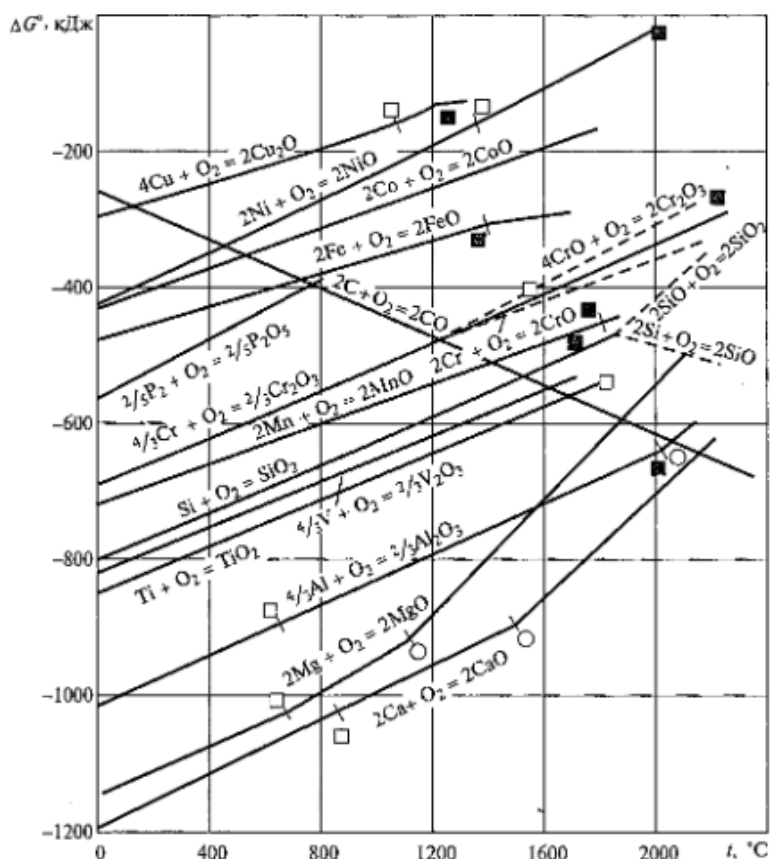


Рисунок 1 – Зависимость свободной энергии образования оксидов от температуры

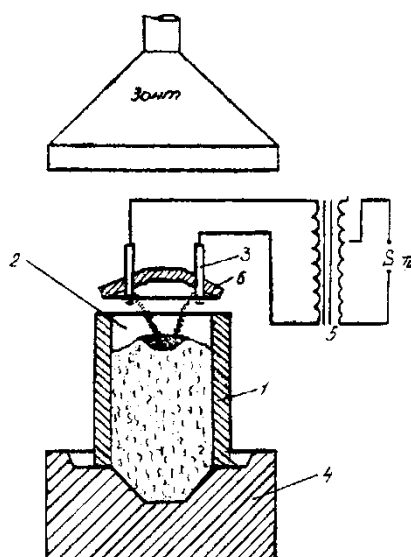
При большом избытке тепла часть алюминия в алюминотермическом процессе заменяют кремнием в виде ферросилиция, либо вводят балластные добавки.

В алюминотермической плавке образуется шлак, насыщенный глиноземом. Такие шлаки очень тугоплавки (температура плавления 2320 К). Снижение температуры плавления и вязкости шлака производят за счет добавки в шихту 10 – 15 % от веса восстановителя извести или плавикового шпата.

Проведение экспериментальных плавок

Эксперимент по внепечной алюминотермической плавке проводится на установке, представленной на рисунке 2, состоящей из графитового тигля 1, в котором проводится проплавление навески шихты, устройства для зажигания шихты за счет нагреваемой нихромовой спирали 2, подключенной между двумя электродами 3, поддона 4, на который помещается тигель с навеской и механизм перемещения электродов со спиралью. Электроды монтируются в своде, который в рабочем положении накрывает тигель.

Все необходимые для плавки материалы измельчаются до фракции 1 мм, взвешиваются на весах с точностью до 1 г и тщательно перемешиваются. Навеска составляется в соответствии с расчетом шихты.



1 – тигель; 2 – спираль; 3 – электрод; 4 – поддон; 5 – трансформатор; 6 – свод

Рисунок 2 – Схема установки

Химический состав шихтовых материалов используемых в опытах приведен в таблицах 1, 2, 3, 4.

Таблица 1 – Элементный состав марганцевых руд

Руда	Содержание, %								
	Mn	Fe	Si	Ni	Cr	P	S	Zn	Pb
Необожженная	90,81	3,41	4,09	0,26	-	0,14	0,09	0,4	0,8
Обожженная	97,05	1,89	0,50	0,31	0,13	0,07	0,06	-	-

Таблица 2 – Химический состав порошка алюминия в перерасчете на основные элементы

Содержание, %						
Al	Si	Fe	Zn	P	Mn	Pb
72,23	8,85	6,64	5,80	4,90	0,66	0,92

Таблица 3 – Химический состав плавикового шпата на основные элементы

Марка плавикового шпата	Содержание, %			
	CaF ₂	SiO ₂	CaO	п.п.п.
ФК-75	76,25	19,7	1,12	2,93

Таблица 4 – Химический состав СК30 на основные элементы

Содержание, %						
Si	Ca	Fe	S	P	V	Ti
50,58	40,31	8,21	0,105	0,39	0,14	0,26

Навеска для плавки состояла из 200 грамм обожженной марганцевой руды, 50 грамм необожженной руды, 100 грамм вторичного алюминия. Каждый опыт менялась навеска восстановителя, алюминий уменьшался на 5 г и вместо него добавлялось 5 г силикокальция. Вся навеска перемешивалась и проводились восстановительные плавки с разной долей силикокальция в восстановителе.

На рисунке 3 и 4 приведены результаты проведенных экспериментальных плавки.



Рисунок 3 – Полученный металлический марганец



Рисунок 4 – Полученный шлак

Полученные слитки металла взвешивались, измельчались и отправлялись на химический анализ (рисунок 5, 6, 7). Шлак тоже измельчался и проходил химический анализ (рисунок 8). Определялась степень извлечения ведущего элемента и содержание глиноземных неметаллических включений.

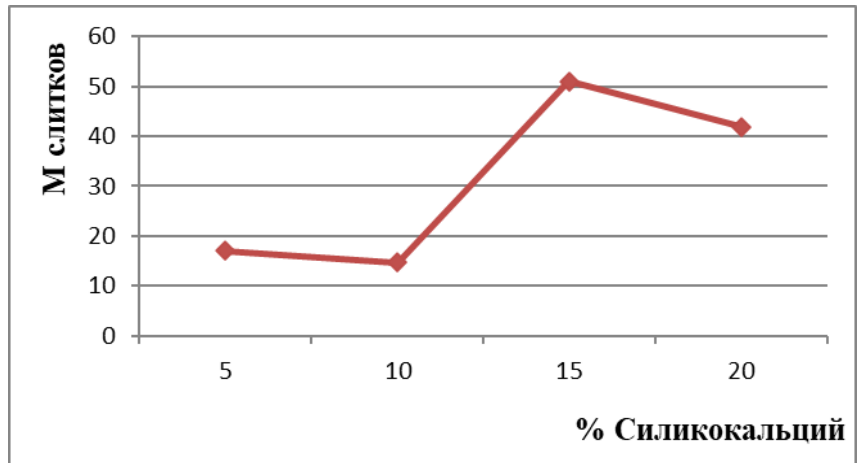


Рисунок 5 – Зависимость массы полученного слитка марганца от доли силикокальция

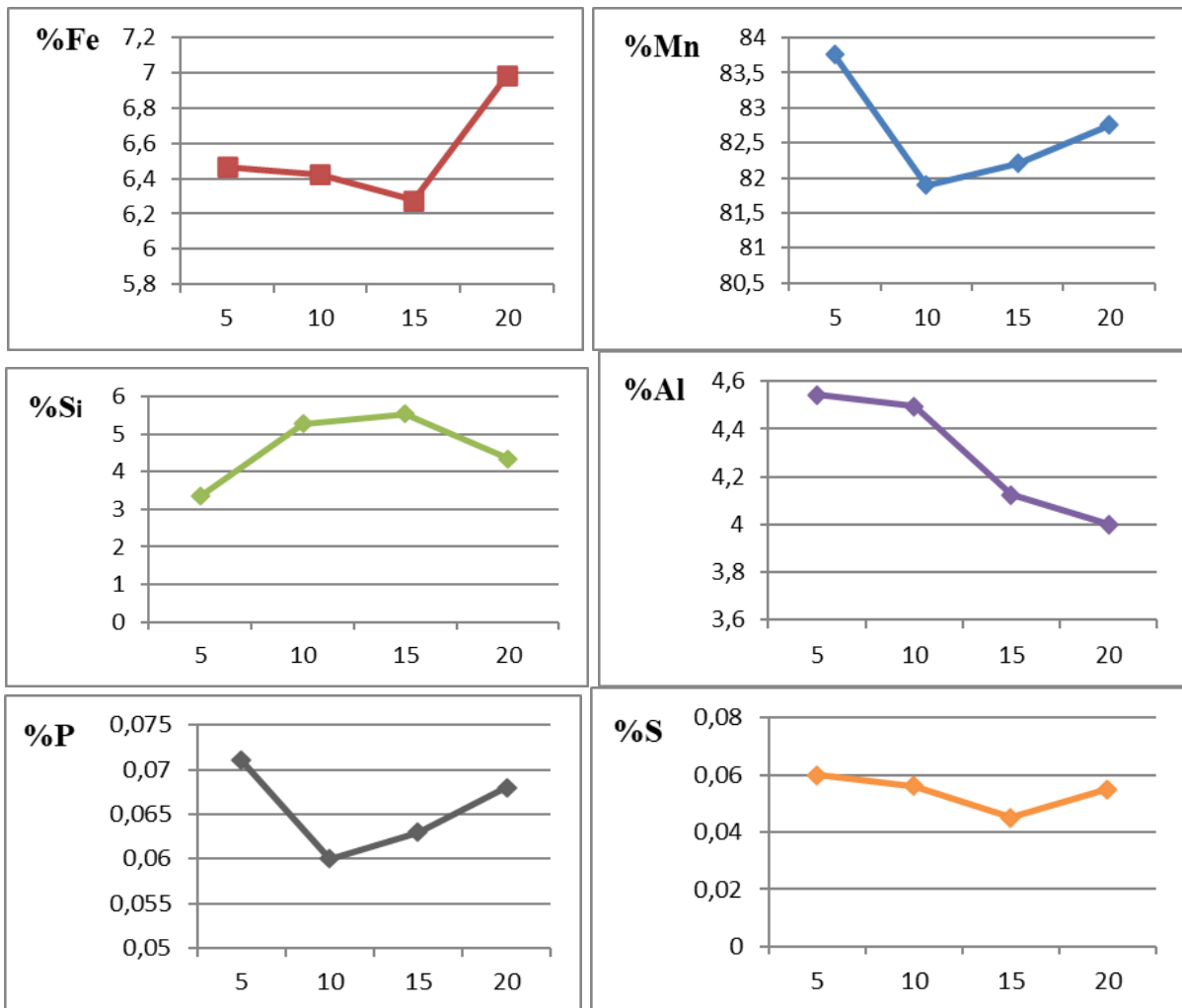


Рисунок 6 – Зависимость элементного состава слитка от доли силикокальция

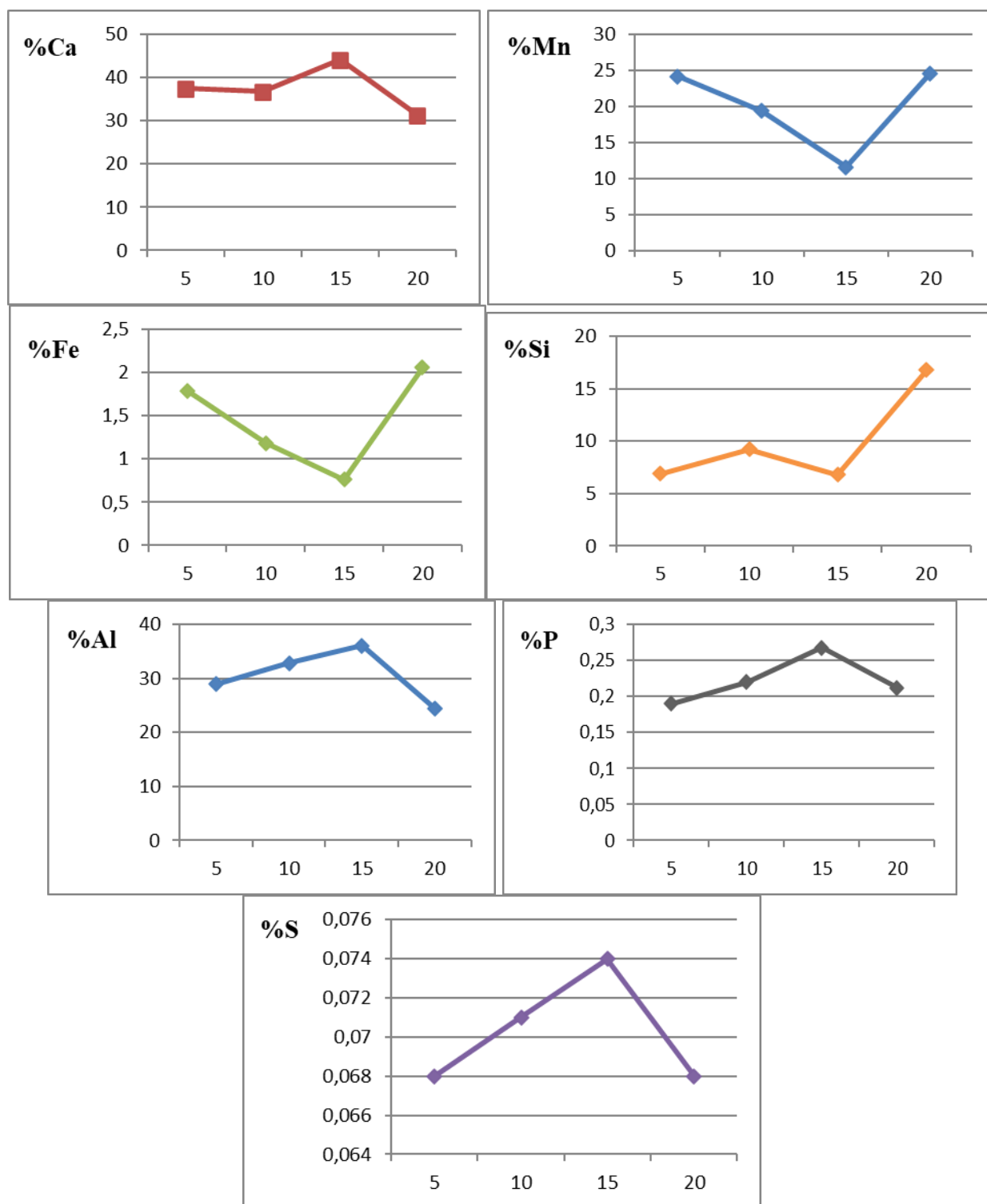


Рисунок 7 – Зависимость элементного состава шлака от доли силикокальция

Выводы:

1. Для получения наибольшей производительности и выхода годного слитка марганца оптимальное содержание силикокальция в шихте от 14 – 17,5 %.

2. Минимальное количество глиноземных включений в слитке при содержании силикокальция от 15 – 20 %.

3. Получение высокого содержания марганца в слитке возможно, либо при минимальном расходе (до 5 %) силикокальция, либо при максимальном (до 20 %). При этом придется пожертвовать производительностью.

4. При содержании силикокальция в шихте от 10 – 17,5 % содержание оксида марганца минимальное, что говорит о повышенном коэффициенте извлечения ведущего элемента в этом диапазоне.

5. Наибольшая степень удаления P и S находится в диапазоне от 10 до 15 %.

Подытожив, можно предположить, что оптимальная доля силикокальция в восстановителе от 14-16 %. При таком расходе силикокальция: максимальный выход годного, минимальное содержание вредных примесей в слитке.

Библиографический список

3. Основы теории и технологии производства ферросплавов: учебное пособие для вузов / И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2017. – 356 с.

4. Влияние разжижителей шлака на эффективность металлургического процесса получения марганца / А.О. Лопатина, Н.И. Дида, Д.Н. Савичева, Г.Э. Тархнишвили // Научно-исследовательские публикации. 2022. №6. С. 61-66.

5. Влияние температуры подаваемого воздуха на процесс агломерации железорудного сырья / С.О. Сафонов, Е.И. Пушкина, Н.И. Дида, А.О. Лопатина // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2022. – С. 370-374.

УДК 621.771.25

ПРОИЗВОДСТВО СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ-РАЗДЕЛЕНИЯ

Вахроломеев В.А., Фастыковский А.Р.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: wladimir170581@mail.ru*

В связи с развитием строительной отрасли потребность в сортовом прокате постоянно увеличивается. Такая тенденция вызывает необходимость повышения эффективности производства по возможности с минимальными затратами. Перспективным в этом плане является использование резерва сил трения в очаге деформации прокатной клетки для реализации технологии прокатки-разделения. Получены теоретические зависимости и экспериментальные результаты для определения продольной силы, необходимой при разделении сочлененных профилей.

Ключевые слова: сортовой прокат, резерв сил трения, прокатка - раз-

деление.

Одним из путей нетрадиционного увеличения эффективности производства сортовой стали является технология прокатки – разделения. Суть которой состоит в том, что из одной заготовки получается несколько изделий путем продольного разделения на одном из этапов передела.

В настоящее время технология прокатки – разделения развивается по двум направлениям. Первое – это формирование сочлененного профиля с одновременным его разделением в валках прокатной клетки. Второе – формирование сочлененного профиля в валках прокатной клетки и последующее разделение в делительной арматуре при помощи неприводного инструмента. Принцип продольного разделения неприводными устройствами разработан фирмами “Sheerness Steel Company” (Великобритания) и “Lake Ontario Steel Company” (Канада) – членами международного объединения “Co – Steel International Group” и получил в настоящее время распространение за рубежом и на отечественных заводах. Интерес к продольному разделению неприводными устройствами обусловлен простотой настройки оборудования, возможностью разделения одновременно до пяти сочлененных профилей, незначительной стоимостью делительного инструмента.

Разделение в неприводном устройстве реализуется за счет использования резерва сил трения в очаге деформации клетки, формирующей сочлененный профиль. Такая особенность процесса продольного разделения накладывает ограничения, которые можно записать в виде:

$$Q_1 \geq Q_2, \quad (1)$$

где Q_1 - продольная сила, создаваемая клетью, формирующей сочлененный профиль за счет использования резерва сил трения;

Q_2 – сила, необходимая для продольного разделения неприводным устройством.

Одна из составляющих условия реализации продольного разделения неприводным устройством является возможность резерва сил трения. В последнее время этому вопросу уделяется большое внимание, что связано с развитием таких процессов как прокатка – разделение, прокатка – прессование, прокатка в приводной – неприводной клетки. Несмотря на повышенный интерес к этой теме, имеющиеся в литературе работы [1 - 5], резерв сил трения, особенно при формировании сочлененных профилей, остается неизученным.

Рассмотрим наиболее часто используемые формы сочлененных калибров (сочлененные прямоугольные калибры, сочлененные квадраты и круги). После решения уравнений равновесия сил в очагах деформации рассматриваемых сочлененных профилей получены зависимости, позволяющие найти величину продольной силы (Q_1), обеспеченной резервом сил трения.

Сочлененные прямоугольные калибры:

$$Q_1 = 2p_{cp}l_d \left[(b_k - n'b_{г}) \left(\mu_y - \frac{\alpha}{2} \right) + \left(\frac{n'h_{г}G_k}{\cos \varphi} + \frac{\Delta b G_k}{2 \sin \varphi} \right) (2\mu_y - \alpha \sin \varphi) \right], \quad (2)$$

где $h_{г}$ – высота гребня, мм;

b_k – ширина по дну калибра, мм;

φ – выпуск калибра, град;

Δb – уширение, мм;

G_k – коэффициент заполнения очага деформации при прокатке в калибре;

μ_y – коэффициент трения на установившейся стадии прокатки;

α – угол захвата;

p_{cp} – среднее нормальное напряжение, Мпа;

n' – количество делительных гребней;

l_d – длина дуги захвата.

Сочлененные квадратные калибры:

$$Q_1 = 2p_{cp}h_p n' G_k l_d (2,8\mu_y - \alpha), \quad (3)$$

где h_p – высота ручья калибра.

Сочлененные круглые калибры:

$$Q_1 = \pi p_{cp} r_l n' G_k l_d (2\mu_y - \alpha), \quad (4)$$

где r_l – радиус круга.

Для изучения влияния геометрических и технологических параметров на величину продольной силы, обеспеченной резервом сил трения клетки, формирующей сочлененный профиль в последствии разделенный неприводным устройством, были проведены лабораторные эксперименты, результаты которых приведены на рисунке 1.

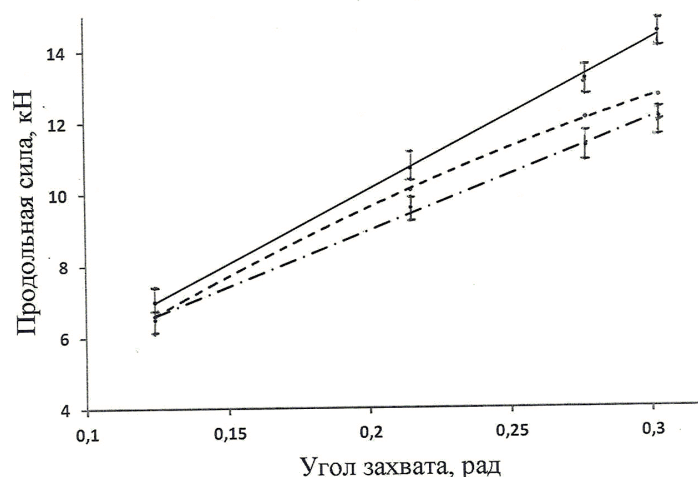


Рисунок - Величина продольной силы, обеспеченной резервом сил трения при прокатке в сочлененных калибрах разной формы

На рисунке сплошной линией отмечены экспериментальные данные при прокатке в сочлененных прямоугольных калибрах, штриховой – теоре-

тические значения продольной силы при прокатке в сочлененных прямоугольных калибрах, штрих с точкой – экспериментальные данные при прокатке в валках с выступом. Проведенные исследования подтвердили достоверность теоретических зависимостей, значения которых не отличались от экспериментальных более чем на 10 %. Определено влияние формы калибра и угла захвата на значения продольной силы при формировании сочлененного профиля. Относительно формы калибра установлено, что чем большую площадь контакта с заготовкой обеспечивает калибр, тем больше величина продольной силы. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости продольной силы, используемой для продольного разделения сочлененных профилей представляют, практический интерес при реализации на сортовых прокатных станах современной энергоэффективной технологии прокатки – разделения.

Библиографический список

1. Фастыковский А.Р. Совмещенные процессы, использующие резервные силы трения в очаге деформации при прокатке: монография. - Новокузнецк: Изд-во НПК, 2007. – 246 с.
2. Фастыковский А.Р. Учет резервных сил трения при проектировании валковой арматуры / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // *Металлург.* – 2001. - № 12. – С. 43 – 44.
3. Фастыковский А.Р. Изучение резервных сил трения при прокатке в вытяжных калибрах / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2002. - № 4. – С. 22 – 24.
4. Фастыковский А.Р. Повышение точности сортовой прокатки / А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяtko // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2002. - № 6. – С. 14 – 16.
5. Фастыковский А.Р. Оценка возможностей процесса прокатки – прессования / А.Р. Фастыковский // *Кузнечно – штамповочное производство. Обработка металлов давлением.* – 2004. - №2. – С. 3 – 6.

УДК 621.771.06

ЦИФРОВОЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

**Раковский В.С., Чернова А.А., Наумченко Д.М., Щербак А.Н.,
Фастыковский А.Р.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: luccheese@inbox.ru*

Показаны возможности современных цифровых технологий для прочностного анализа оборудования прокатной клетки. Достоинства применяемого подхода показаны на примере оценки прочности деталей бесстанинной клетки 630 среднесортного стана 450 АО “ЕВРАЗ ЗСМК” с использованием

модуля прочностного анализа APM FEM Компас – 3D.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, оценка прочности, оборудование прокатной клетки.

Прокатное оборудование широко используется на металлургических предприятиях для получения готовой продукции. Условия работы этого оборудования связаны с большими статическими и динамическими нагрузками, высокой температурой. Такие условия эксплуатации создают высокие риски возникновения нештатных ситуаций, существенно влияют на качество выпускаемой продукции, стоимость основного прокатного оборудования, непосредственно участвующего в формоизменении. Затраты на его эксплуатацию весьма велики, и поэтому все непредвиденные остановки и поломки существенно влияют на себестоимость и конкурентоспособность прокатной продукции.

Одним из возможных путей продления службы прокатного оборудования, снижение затрат на его эксплуатацию – это тщательный прочностной расчет с максимальным учетом всех факторов влияния. Вопросу прочностных расчетов прокатного оборудования в технической литературе уделено большое внимание [1 - 3]. Имеющиеся методики расчета позволяют проводить предварительную оценку работоспособности прокатного оборудования, но точность их невелика, расчеты громоздки, много факторов остается не учтенными. С развитием цифровых технологий появилась возможность решения задач прочностного анализа оборудования на новом современном уровне с учетом влияния всего многообразия факторов [4]. В последних версиях пакетов программ Компас-3D, SolidWorks, T-FLEX CAD предусмотрены модули для прочностного анализа оборудования и конструкций. Модули прочностного анализа базируются на принципах трехмерного конечно-элементного моделирования и позволяют находить распределение напряжений, коэффициенты запаса по пределу текучести и устойчивости детали, температуру в различных точках по объему и др.

Использование упомянутых выше пакетов программ дает возможность конструктору уже на начальных стадиях проектирования принимать правильные и обоснованные конструктивные решения. Это, несомненно, повышает качество и экономит время, затрачиваемое на проектирование.

Основной задачей конечно-элементного моделирования в рассматриваемых пакетах программ является анализ прочности деталей и сборок, для которых важно быстро оценить прочность элементов с возможной оптимизацией конструкции, используя ассоциативную связь геометрической и расчетной моделей.

Проиллюстрируем сказанное выше на примере прочностного расчета бесстанинной клетки 630 среднесортного стана 450 АО "ЕВРАЗ ЗСМК" с использованием приложения APM FEM системы прочностного анализа Компас -3D. На начальном этапе необходимо создать трехмерную сборку подушки верхнего валка и анкером и задать граничные условия по закреплению.

нию. Приложить расчетные нагрузки и сгенерировать конечно-элементную сетку с заданным коэффициентом сгущения на поверхности и коэффициентом разрежения в объеме (рисунок 1). Полученную сетку можно просматривать, как на поверхности, так и в глубине тела детали, изменяя положение бегунка "глубина просмотра".

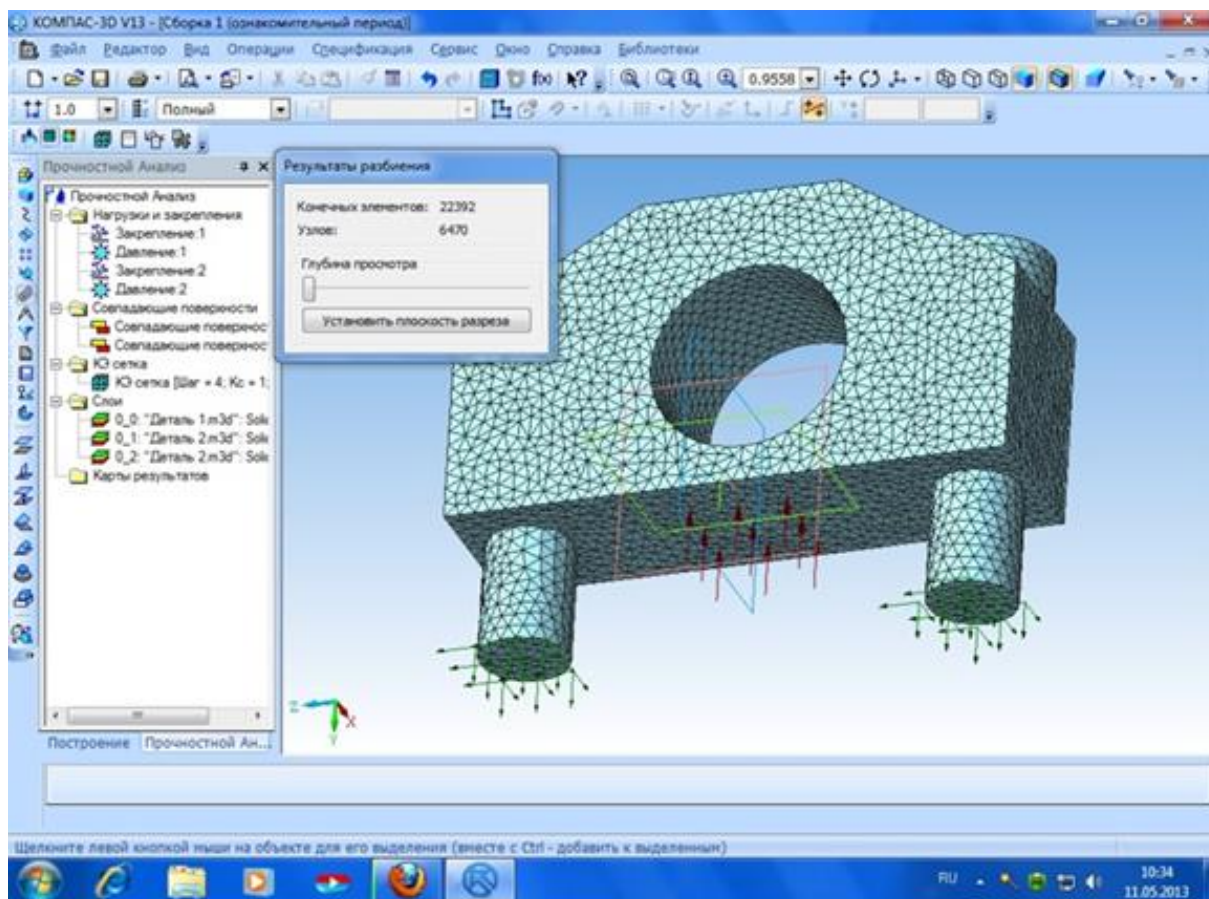


Рисунок 1 – Сгенерированная сетка конечных элементов

После выполнения подготовительных операций проводятся расчеты. В приложении АРМ FEM доступны следующие виды расчетов:

- линейный статический расчет;
- расчет на устойчивость;
- расчет собственных частот (резонанса) и собственных форм колебаний;
- решение задачи стационарной теплопроводности;
- решение задачи термоупругости (при совместном выполнении статического и теплового расчетов).

Полученная при расчетах информация выводится в виде цветных карт, где показано распределение изучаемой величины в любом месте объема исследуемой конструкции. В качестве примера на рисунке 2 показано распределение коэффициентов запаса по пределу текучести в теле сборки.

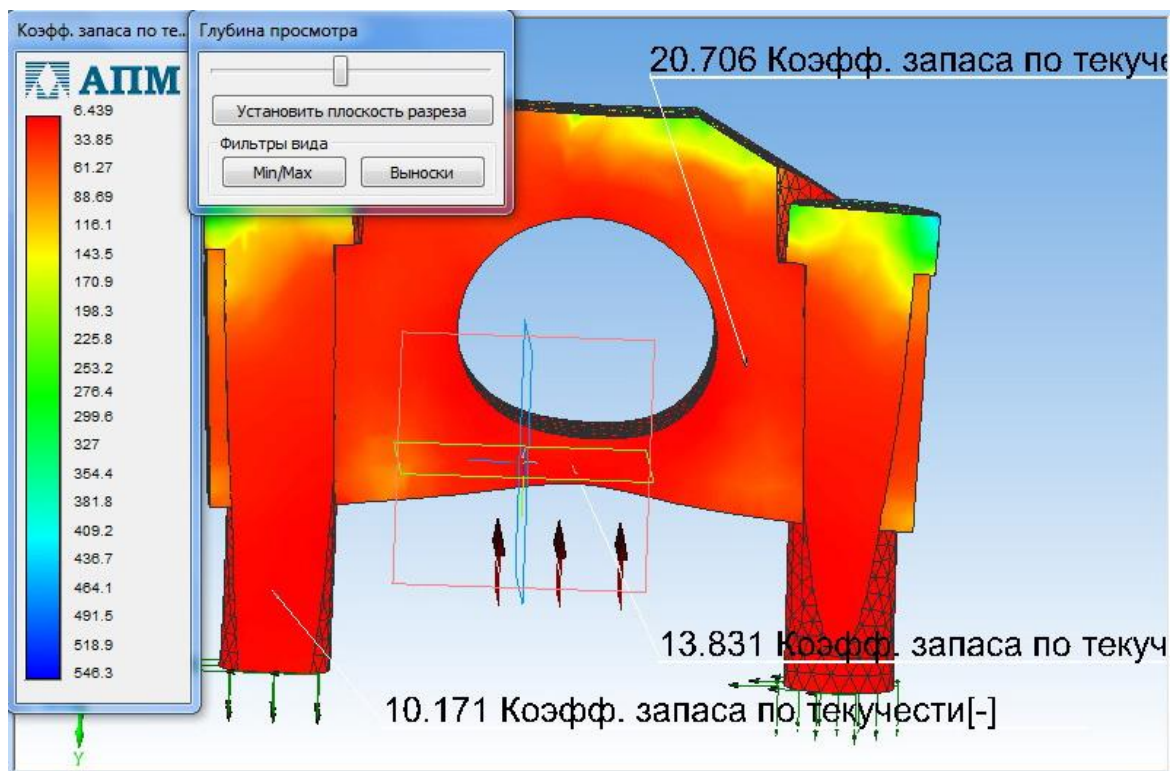


Рисунок 2 – Распределение коэффициентов запаса сборки по пределу текучести в теле сборки

Для оценки достоверности полученных данных были проведены расчеты коэффициентов запаса по пределу текучести традиционными методами [5, 6]. Приведенные на рисунках 1, 2 расчеты коэффициента запаса по пределу текучести выполнены для материала деталей сборки – сталь 10КП. Это марка стали выбирается по умолчанию. В реальных условиях для материала анкеров используется сталь 40Х, а подушки получают литьем из стали 35Л с последующей механической обработкой. Для определения истинных коэффициентов запаса по пределу текучести (K_n) можно воспользоваться зависимостью:

$$K_n = K_{расч} \frac{\sigma_{ист}}{\sigma_{расч}} = K_{\sigma} K_{расч} ,$$

где $K_{расч}$ – коэффициент запаса по прочности для стали 10КП;

$\sigma_{расч}$ – предел текучести для стали 10КП;

$\sigma_{ист}$ – предел текучести материала, из которого изготовлена соответствующая деталь;

K_{σ} – поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент с учетом пределов текучести для стали 40Х - 4,6, для 35Л – 2,3.

Исходя из результатов, приведенных на рисунках 1,2 с учетом поправочных коэффициентов, минимальный коэффициент запаса прочности по пределу текучести для анкеров 46, для подушки 31. Значения коэффициен-

тов запаса прочности по пределу текучести достаточны для нормальной работы анкеров и подушки.

С учетом поправочного коэффициента минимальное значение коэффициента запаса по пределу текучести при компьютерном моделировании для анкера составило 46 для подушки 31. При расчете традиционным способом значения коэффициента запаса по пределу текучести составили соответственно 48 и 34. Сопоставление полученных данных показывает, что результаты близки, расхождение не более 10 %. Возможности компьютерного моделирования позволяют выявить участки конструкции с большим запасом по пределу текучести и уменьшить их металлоемкость, а на участках с небольшим запасом сосредоточить внимание при плановых проверках.

Правильная оценка запаса прочности оборудования прокатной клетки позволит снизить риски, связанные с поломкой оборудования. Для стана 450 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» это обычно 20-21 час в год с учетом стоимости часа простоя стана, эффект может составить до 8 миллионов рублей в год.

Библиографический список

1. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных трубных цехов. М.: Металлургия. 1987. 480 с.
2. Фастыковский А.Р., Савельев А.Н. Особенности конструирования и безаварийной работы валковой арматуры сортовых станов. М.: Теплотехник 2015. - с. 170.
3. Фастыковский А.Р., Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я. Копылов И.В. Оценка степени технологических рисков в системе валки - арматура непрерывного мелкосортного стана // Сталь. - 2008. - № 2. - С. 63 - 64.
4. РФ Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ в гос. Реестре №2006612893. Моделирование деформации в приводных- неприводных клетях / А.Р. Фастыковский, А.Н. Матвиенко. - Заявка №2006611932; зарегистрировано 11.08.06.
5. Фастыковский А.Р. Оборудование прокатных цехов. Учебное пособие с гриф УМО. Новокузнецк. СибГИУ. 2015. – 208.
6. Фастыковский А.Р. Савельев А.Н. Конструкции и расчеты оборудования прокатных клеток сортовых и листовых станов. Учебное пособие с грифом УМО. - Новокузнецк. СибГИУ. 2008. - 316 с.

ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ

Пимахин А.В., Осколкова Т.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: avp730@yandex.ru*

В статье представлен обзор статей, связанный с обезуглероживанием рельсовых сталей при нагреве. Выявлены основные факторы, влияющие на процесс обезуглероживания, а также изменение свойств рельсовых сталей при обезуглероживании после нагрева.

Ключевые слова: обезуглероживание, сталь, непрерывно-литая заготовка, рельсы, микроструктура, нагрев.

Рельсы являются важным элементом железнодорожного полотна, от исправного содержания которого зависит безопасность движения поездов. В настоящее время достигнут определенный прогресс по повышению качества и свойств рельсов. В первую очередь он связан с совершенствованием технологий выплавки, раскисления и внепечной обработки стали, переходом на непрерывную разливку [1]. Вместе с тем, не решен окончательно вопрос, связанный с обезуглероживанием рельсовых сталей в процессе нагрева. С одной стороны, для низкоуглеродистых сталей формирование обезуглероженного слоя приводит к меньшей склонности образования разрывов, отмечается высокая пластичность и вязкость [2]. С другой стороны, снижение концентрации углерода в поверхностных слоях может привести к снижению твердости, увеличивается износ при эксплуатации рельсов, приводит к образованию усталостных трещин [3 – 6]. Намины от накладок, являясь концентраторами напряжений, приводят к образованию трещин под головкой рельса. Неравномерное распределение углерода в поверхностных слоях подошвы приводит к различной интенсивности коррозионных процессов, что в свою очередь оказывает отрицательное влияние на долговечность рельсов [7, 8].

Нагрев металла перед прокаткой сопровождается окалинообразованием и обезуглероживанием поверхностной зоны, при этом диффузионные процессы, связанные с обезуглероживанием металла, протекают быстрее, чем окалинообразование [9]. Образцы, вырезанные из головки рельса Р 65 промышленного производства, подвергали нагреву до 1150 °С (что соответствует температуре прокатки) с разными выдержками (0; 30 и 70 минут) [10].

Металлографические исследования образца без выдержки выявили наличие тонкой разорванной сетки феррита. Увеличение выдержки до 30 и 70 минут приводит к образованию сплошной ферритной сетки и превышает глубину обезуглероженного слоя, при этом увеличения аустенитного зерна не наблюдается. Данные о глубине обезуглероженного слоя после выдержки различной продолжительности при 1150 °С представлены в таблице 1 [10].

Измерение микротвердости образцов при нагрузке 0,5Н показали её

снижение, начиная с глубины 1,0 – 1,2 мм, причем, это снижение по мере приближения к поверхности увеличивается. Разница микротвердости вблизи поверхности для образцов № 1 и № 3 составляет 40 единиц [10].

Таблица 1 - Глубина обезуглероженного слоя рельсовой стали [10].

Образцы	Длительность выдержки, мин.	Глубина обезуглероженного слоя, мм
№ 1	0	0,3 – 0,7
№ 2	30	0,7 – 1,0
№ 3	70	0,8 – 1,0

Результаты испытаний образцов на растяжение согласуются с данными исследования микротвердости. Увеличение глубины обезуглероженного слоя снижает предел текучести $\sigma_{0,2}$ на величину около 80 МПа, а временное сопротивление разрыву σ_B – 75 МПа [10].

В работе [11] исследовано влияние температурно-временного фактора на процессы обезуглероживания рельсовой стали состава 0,71 – 0,82 % С; 0,75 – 1,05 % Мп; 0,18 – 0,40 % Si, применяемой для изготовления железнодорожных рельсов типа Р65, Р75. Образцы из этой стали нагревали до температур 950, 1050, 1150, и 1250 – 1275 °С и выдерживали при данных температурах в течение 10, 35 и 60 минут в атмосфере печи. В образцах, нагретых до 950 °С и выдержанных в течение 25 – 30 минут, видимое обезуглероживание отсутствует, увеличение времени выдержки до 35 – 40 минут приводит к возникновению обезуглероженных локальных участков в виде ферритной сетки по границам зерен, а при выдержке 60 – 65 минут формируется обезуглероженный слой толщиной 0,10 – 0,15 мм. Образование поверхностного слоя стали с полным обезуглероживанием зафиксировано при температуре 1050 °С и выдержке 30 минут и более (рисунок 1). При температуре 1150 °С наблюдается полностью обезуглероженный поверхностный слой, за которым располагается видманштеттовая структура, характерная для доэвтектоидных сталей после ускоренного охлаждения (на воздухе) от температур аустенитизации выше 1100 – 1150 °С (рисунок 1) [12, 13].

При нагреве перед прокаткой заготовок или слитков процессы окалинообразования и обезуглероживания металла протекают в печи параллельно и взаимосвязанно [14 – 16].

При нагреве под прокатку непрерывно-литых заготовок рельсовой электростали марки Э76Ф [17, 18] (ГОСТ 51685 – 2000) до температур 1250 – 1370 °С с выдержками 3 – 9 часов выявлено, что увеличение продолжительности выдержки стали приводит к увеличению глубины обезуглероженного слоя (рисунок 2), а повышение температуры нагрева несколько снижает её, что связано с интенсификацией окисления и, как следствие, с поглощением обезуглероженного слоя окалиной [19, 20].



а



б

а – $t = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 60 \text{ мин.}$; б – $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 60 \text{ мин.}$

Рисунок 1 – Микроструктура обезуглероженного слоя рельсовой стали, $\times 150$, фотомасштаб 1 : 3 [11]

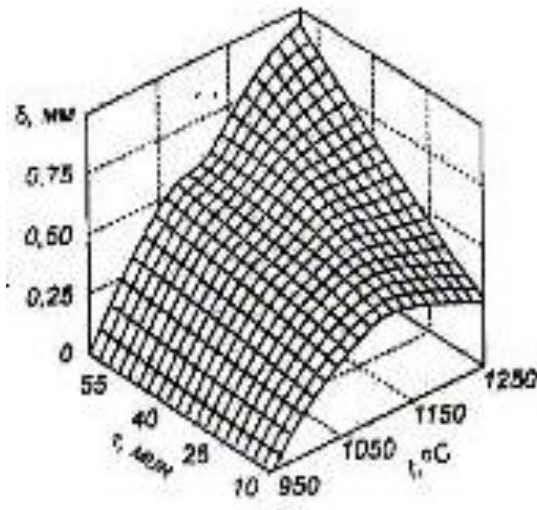
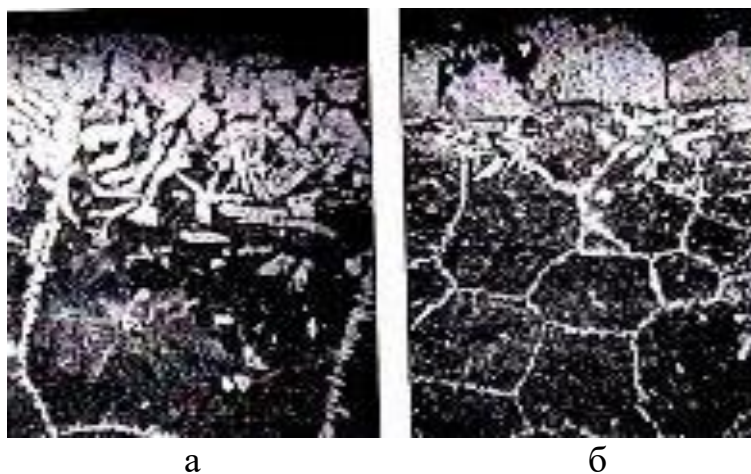


Рисунок 2 – Зависимость глубины обезуглероженного слоя стали Э76Ф от температуры и времени выдержки [20]

На процесс обезуглероживания существенно влияет степень деформации при прокатке, а также, из каких слитков получены рельсы. Так, производство рельсов из слитков показывает, что толщина обезуглероженного слоя в области головки неравномерна и в среднем составляет 0,3 – 0,5 мм [21]. Поверхностное обезуглероживание, полученное из непрерывно-литой заготовки, может достигать 1,5 – 2,0 мм [1]. Работой [21] установлено, что распределение обезуглероженного слоя по периметру рельса определяется особенностями его деформирования в процессе прокатки. При существующей на НКМК калибровке и способе прокатки 25-метровых рельсов шейка претерпевает наиболее интенсивную деформацию (проработку), головка – наименьшую. Сопоставление результатов промышленных опытов по выработке поверхностных дефектов [22] и толщиной обезуглероженного слоя у

рельсов, полученных из разных слитков, показывает, что между этими факторами существует прямая связь, в частности, в области шейки выработка достигает фактически 100 %, в области головки – всего 75 %. Максимальная толщина обезуглероженного слоя характерна для участков контура, не контактирующих с поверхностью калибра, а минимальная – для участков, подвергающихся наибольшей деформации. Таким образом, толщина поверхностного обезуглероженного слоя рельсов, произведенных из непрерывнолитых заготовок, для различных участков профиля в 1,5 – 3 раза больше, чем у рельсов, полученных из слитков. Максимальная толщина обезуглероженного слоя характерна для участков контура, не контактирующих с поверхностью калибра, а минимальная – для участков, подвергающихся наибольшей высотной деформации.

Процесс обезуглероживания зависит также от типов нагревательных устройств, где происходит нагрев заготовок. В работе [23] рассматривается вопрос обезуглероживания непрерывно-литых заготовок стали марки Э76Ф при нагреве до температур 1250 – 1270 °С в нагревательных колодцах и печах Сименса, а также в печах с шагающими балками. Глубина обезуглероженного слоя непрерывно-литых заготовок, нагретых в нагревательных колодцах и печах Сименса составляет 1,54 – 3,08 мм при среднем значении 2,31 мм. После нагрева непрерывно-литых заготовок в печах с шагающими балками глубина обезуглероженного слоя колеблется в пределах 0,77 – 2,00 мм при среднем значении 1,39 мм. На рисунке 3 представлены микроструктуры поверхностных слоев непрерывно-литых заготовок после нагрева в разных нагревательных устройствах. По сравнению с технологией нагрева заготовок в нагревательных колодцах и печах Сименса при нагреве заготовок в печах с шагающими балками средняя глубина обезуглероженного слоя меньше на 0,92 мм. При нагреве непрерывно-литых заготовок в печи с шагающими балками зерно в стали становится мельче [23].



а – нагревательные колодцы и печи Сименса; б – печи с шагающими балками

Рисунок 3 – Микроструктура поверхностных слоев непрерывно-литых заготовок, нагретых в разных нагревательных устройствах, х 100 [23]

Таким образом, установлено, что процесс обезуглероживания зависит от многих факторов, в частности, от температурно-временных условий, степени деформации при прокатке, от типов нагревательных устройств, где происходит нагрев заготовок.

Библиографический список

1. Производство рельсов из электростали / Н.А. Козырев, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: Изд-во ИПК, 2000. – 267 с.
2. Технология производства железнодорожных рельсов и колес / В.Ф. Карпенко, Ю.М. Таптыгин, Н.Ф. Левченко, В.Н. Бардусов // Отраслевой сб. науч. тр. – Харьков: Изд-во УкрНИИ мет, 1989. С 11 – 16.
3. Основные направления развития производства рельсов на ОАО «НКМК» / А.Б. Юрьев, Н.Х. Мухатдинов, Н.А. Козырев, Л.В. Корнева // Сталь. – № 1. – С. 99 – 100.
4. Некоторые вопросы динамики обезуглероживания и науглероживания / И.В. Гусовская, А.И. Ващенко, Л.А. Шульц // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1974. – № 1. – С. 179 – 184.
5. Повреждение рельсов / Е.А. Шур. – М.: Транспорт, 1971. – 112 с.
6. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев, Л.В. Корнева, Т.Н. Осколкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
7. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / А.К. Гурвич, Б.П. Довнар, В.Б. Козлов [и др.]. – М.: Транспорт, 1983. – 318 с.
8. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
9. Математическая модель окалинообразования и обезуглероживания металла в процессе нагрева / А.В. Коновалов, О.Ю. Муйземнек // Металлы. 2000. – № 4. – С. 40 – 43.
10. Влияние обезуглероженного слоя на качество поверхности рельсов / Д.К. Нестеров, В.Ф. Карпенко, Н.Ф. Левченко [и др.] // Бюл. НТИ. Черная металлургия. 1992. – № 1. – С. 33 – 35.
11. Исследование окисления и обезуглероживания сталей для рельсов и рельсовых накладок при нагреве под прокатку / М.В. Темлянцев, В.С. Стариков, Н.В. Темлянцев, А.Ю. Сюсюкин // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. – № 8. – С. 36 – 38.
12. Металловедение и термическая обработка стали. Т.2 Основы термической обработки / Под ред. Б.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – 368 с.
13. Практическая металлография / Р.И. Малинина, Е.С. Малютина, В.Ю. Новиков [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 240 с.
14. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением / М.В. Темлянцев, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
15. Исследование процессов окисления и обезуглероживания стали при

нагреве / М.В. Темлянцев // Сталь. 2007. – 3. – С. 58 – 60.

16. Управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.

17. Ванадий в черной металлургии / Н.П. Слотвинский-Сидак, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

18. Ванадий в стали / И.Н. Голиков, М.И. Гольдштейн, И.И. Мурзин. – М.: Металлургия, 1968. – 291 с.

19. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно-литых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянцев, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, Л.Т. Кожеурова // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. – № 12. – С. 47 – 49.

20. Нагрев под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали / Темлянцев М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю., Темлянцев Н.В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2005. – № 6. – С. 51 – 53.

21. Металлографическое исследование поверхностного обезуглероженного слоя рельсов / М.В. Темлянцев, А.Ю. Сюсюкин, Н.В. Темлянцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2005. – № 8. – С. 37 – 40.

22. Выработка поверхностных дефектов при прокатке / Е.Р. Браунштейн, В.Н. Перетятыко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1997. – № 8. – С. 32 – 35.

23. Определение угара и обезуглероживания непрерывно-литых заготовок рельсовой стали при нагреве в методических печах с шагающими балками / М.В. Темлянцев, Е.А. Колотов, А.Ю. Сюсюкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. – № 12. – С. 62 – 63.

УДК 669.715: 621.78

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ГОМОГЕНИЗАЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗЫ Al_5FeSi В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКАХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $Al-Mg-Si$

Коробейников Д.В., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: den.087@mail.ru*

Приведены результаты исследования влияния температуры и длительности гомогенизации слитков сплавов серии бххх на изменение морфологии железосодержащих интерметаллидов. Установлено, что после нагрева при 575-580°C и выдержки в течение 1,5–2,0 часов коэффициент трансформации игольчатой β -фазы (Al_5FeSi) в глобулярную и компактную α -фазу (Al_8Fe_2Si) равен 95 % и выше.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, микроструктура, железосо-

держателе фазы, слиток цилиндрический, гомогенизация, коэффициент трансформации.

Деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы серии 6XXX (система Al-Mg-Si) широко применяются во многих отраслях современной промышленности, таких как строительство, машиностроение, транспорт и др. Эти сплавы имеют суммарное содержание легирующих элементов от 1 до 2 %. Они менее прочны, чем дуралюмины, но имеют более высокие пластичность и коррозионную стойкость [1, 2].

В структуре литых цилиндрических слитков из сплавов 6063 и 6060 основные легирующие элементы – магний и кремний находятся в основном в твердом растворе и частично – в виде фазы Mg_2Si (рисунок 1).

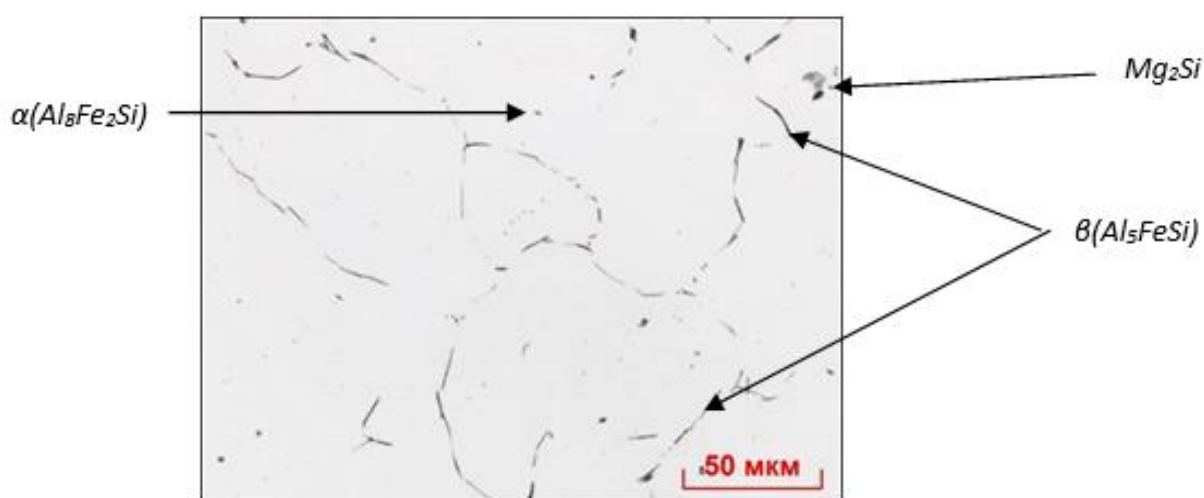


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Al-Si-Mg в литом состоянии

Основная примесь – железо, ввиду незначительной растворимости в алюминии в твердом состоянии, образует железосодержащие фазы: α -фазу (Al_8Fe_2Si) скелетной формы серого цвета и β -фазу (Al_5FeSi) иглообразной (пластинчатой) морфологии, которые расположены по границам зерен твердого раствора и дендритных ячеек (рисунок 1) [3].

Как правило, сплавы 6063 и 6060 легируют марганцем, который растворяется в алюминиевом твердом растворе, а также может входить в состав железосодержащих фаз. В случае высокой концентрации марганца – (сотые, десятые доли масс, %) в сплавах происходит формирование железосодержащей фазы $\alpha(Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2)$ шрифтообразной формы (рисунок 2).

В литом состоянии границы зерен и дендритных ячеек окаймлены выделениями вышеописанных фаз кристаллизационного происхождения, что делает сплав более хрупким. Прессование слитков в таком состоянии будет сопровождаться высоким сопротивлением деформации и недостаточной пластичностью металла при экструзии, а также приводить к возникновению на поверхности прессованного профиля различных дефектов.

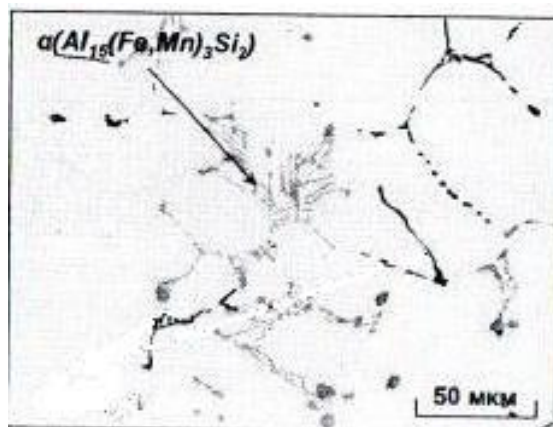


Рисунок 2 – Микроструктура сплава Al-Si-Mg-Mn в литом состоянии

Для подготовки структуры к прессованию, снижения сопротивления деформации и повышения технологичности сплава слитки подвергают процессу гомогенизации с регламентированным охлаждением [4]. Основными факторами, лимитирующими длительность процесса гомогенизации слитков, являются:

- фрагментация (дробление) фаз $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$ и $\alpha(\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2)$ скелетной/шрифтообразной формы;
- трансформация (фазовое преобразование) $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ -фазы пластинчатой (иглообразной) формы в фазу $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$ благоприятной компактной морфологии (рисунок 3).

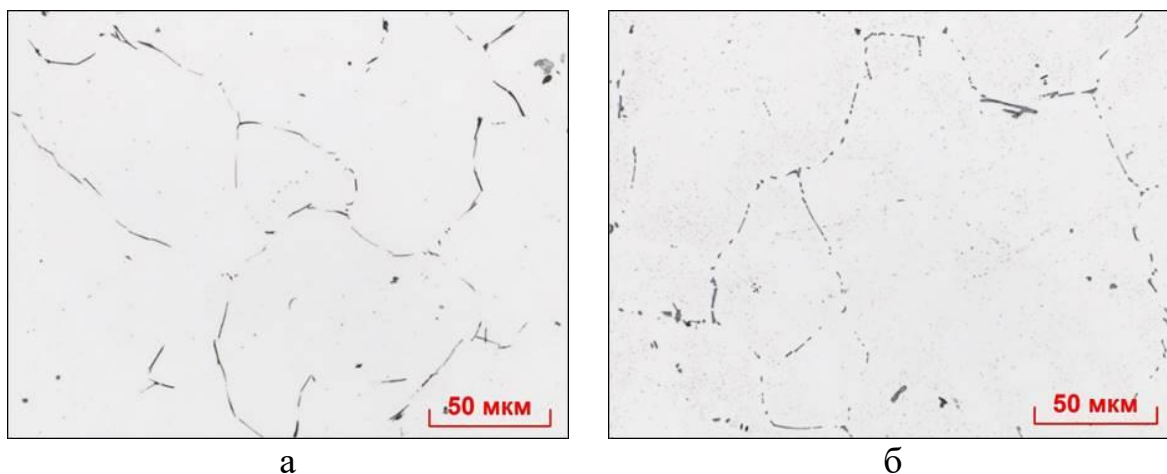


Рисунок 3 – Структура слитка: а – в литом состоянии;
б – после гомогенизации

Потребители цилиндрических слитков одним из требований к качеству гомогенизированных слитков выдвигают степень трансформации. Трансформация фазы $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ в фазу $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$ оценивается по специальной методике и характеризуется коэффициентом трансформации, который определяется при анализе микроструктуры цилиндрического слитка, прошедшего процесс гомогенизации и охлаждения.

Коэффициент трансформации (% α) вычисляют по формуле:

$$\% \alpha = \alpha / (\alpha + \beta) \times 100 \%,$$

где α – количество частиц α -фазы, в шт.;

β – количество частиц β -фазы, в шт.

Подсчет количества частиц $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$ и $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ фаз производится вручную или с использованием программы анализа изображений.

Для Европейского рынка коэффициент трансформации должен быть от 80 до 85 %, для Азиатского – не меньше 85 %, для Американского – не меньше 85 %. Для Японии и Юго-Восточной Азии коэффициент трансформации должен быть не ниже 90 %.

Существующий технологический процесс гомогенизации цилиндрических слитков различных диаметров (\varnothing 127 мм, \varnothing 145 мм, \varnothing 152 мм, \varnothing 178 мм, \varnothing 203 мм) имеет следующие параметры: температура гомогенизации 575 °С, время выдержки – 2 ч 30 мин. При этих параметрах коэффициент трансформации гомогенизированных слитков составляет от 85 до 93 % и полностью соответствует требованиям потребителей.

Целью настоящей работы являлось получение стабильного коэффициента трансформации гомогенизированных слитков из сплава 6023 не менее 95% при сокращении времени выдержки в процессе гомогенизации до 2 часов 00 минут.

Основное оборудование для проведения исследований: лабораторная муфельная печь «Термо Лаун», ручная термопара марки «Fluk».

На литейной машине была отлита плавка СЦ \varnothing 127 мм из сплава 6063 согласно спецификации – ТС 451-04-017. В таблице 1 представлен требуемый потребителем химический состав сплава и фактический состав плавки.

Химический состав определяли методом спектрального анализа на оптическом эмиссионном спектрометре ARL 4460. Пробы для определения химического состава имеют «грибовидную форму», диаметр «шляпки» - \varnothing 45 мм. Пробы отбирали во время литья СЦ из лотка литейной машины дважды, на длине литья \approx 2000 мм и \approx 4000 мм.

Таблица 1 – Химический состав сплава 6063 согласно спецификации

Требование по ТС 6063	Химические элементы, %							
	Si	Mg	Mn	Fe	Ti	Cu	Zn	Cr
min	0,42	0,48	0,03	0,15	-	-	-	-
max	0,48	0,53	0,05	0,20	0,03	0,02	0,02	0,02
Фактическое содержание элементов, %								
Плавка 10 4978	0,44	0,50	0,033	0,17	0,019	0,001	0,008	0,001

Для оценки правильности подбора температуры нагрева в муфельной лабораторной печи «Термо Лаун», размещения темплета в рабочем пространстве печи и режимов охлаждения (имитация промышленного процесса

гомогенизации и охлаждения цилиндрических слитков) провели исследование микроструктуры цилиндрических слитков плавки 10 4978.

В таблице 2 представлены параметры микроструктуры не гомогенизированного слитка, от которого были отобраны темплеты для проведения лабораторных испытаний, а также параметры микроструктуры слитков после гомогенизации по режимам, предусматривающим выдержку при гомогенизации в течение 1,5 и 2,5 часов.

Таблица 2 – Параметры микроструктуры слитков сплава 6063

Параметр	Требования потребителя	Режим гомогенизации		
		не гомогенизированный	575 °С, выдержка 2 часа 30 мин	575 °С, выдержка 1 час 30 мин
Класс пористости (по методу определения «Hydro»)	≤ 4	1,5	3	1,5
Степень трансформации, %	≥ 85	15	96	90–95
Количество частиц Mg ₂ Si размером > 1мкм; шт./0,51мм ²	< 150	91	55	123

Микроструктура слитков до и после гомогенизации представлена на рисунке 4.

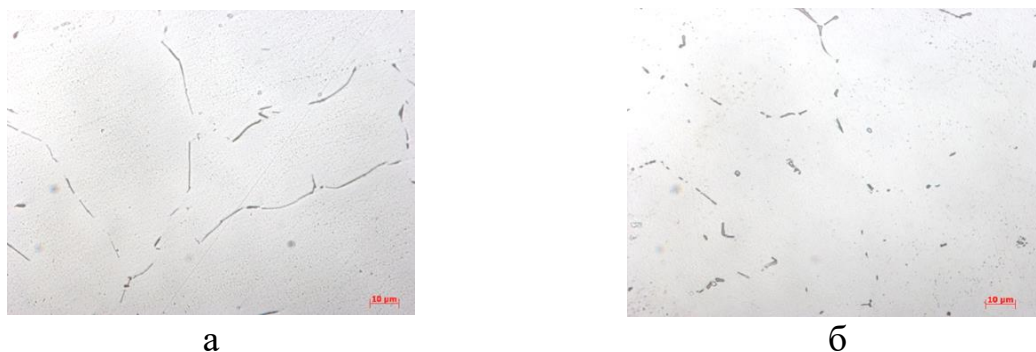


Рисунок 4 – Микроструктура слитков из сплава 6063 (x1000):
а – до гомогенизации; б – после гомогенизации
(выдержка 2 ч 30 мин при 575 °С)

Полученные характеристики микроструктуры темплетов подтвердили, что предложенный режим гомогенизации (характеристики нагрева, выдержки и охлаждения образцов в лабораторных условиях) соответствует по параметрам микроструктуры слиткам, прошедшим гомогенизацию в промышленных условиях.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, гомогенизированная структура, полученная при выдержке опытных образцов при температуре 575 °С в течение 1 ч 30 мин соответствует требованиям

потребителей. Коэффициент трансформации, получаемый при таких параметрах, имеет стабильный характер и составляет от 90 % и выше.

Библиографический список

1. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: справ. изд. / Под ред. Хэтча Дж. Е.– Москва: Металлургия, 1989. – 422 с.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд. – Москва : МИСИС, 2005. – 432 с.
3. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – Москва : Металлургия, 1979. – 640 с.
4. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 413 с.

УДК 669.715'788.017

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА Al-15% Si ПОСЛЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ

Ломиворотов Н.П., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: pddcull100@mail.ru*

В данной работе приведены результаты исследования обработки расплава водородом на структуру, плотность и твердость сплава Al-15% Si. Исследовано влияние различных способов введения водорода в расплав. Установлено, что продувка расплава водородом при 900 °С в течение 10 мин обеспечивает наилучший эффект модифицирования структуры и повышение физико-механических свойств.

Ключевые слова: силумин, обработка расплава, водород, микроструктура, ТКЛР, плотность, твердость.

В настоящее время для силуминов Al-15% Si существуют различные модифицирующие виды обработки. Наиболее распространенные из применяемых модификаторов – натрий, стронций, фосфор и его соединения. Все они, помимо положительного воздействия на сплав, имеют также и свои недостатки, отчего у исследователей нет единого мнения о том, какой из модификаторов использовать более целесообразно [1–10]. Разработаны также способы модифицирования силуминов, которые предусматривают обработку расплава газообразными веществами [11–16]. В связи с этим целью данной работы было изучение влияния обработки расплава на структуру и свойства силумина Al–15% Si с помощью различных методов наводороживания: обработка влажным асбестом, выстаивание в атмосфере водяного пара и продувка водородом. После всех видов обработки и отстаивания расплава в течение 5 минут, проводили заливку в холодный алюминиевый кокиль (ско-

рость охлаждения ~ 60–80 °С/с).

Металлографический анализ проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 при увеличениях 100 и 500. Содержание атомарного водорода в образцах определяли методом вакуум-нагрева. Для определения плотности использовали метод гидростатического взвешивания на аналитических весах АДВ-200М, а микротвердость измеряли на цифровом микротвердомере HVS-1000А. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) определяли с помощью дифференциального оптического дилатометра Шевенара в интервале температур 20–450 °С.

Сравнительный качественный, а затем и количественный металлографический анализ показал, что наводороживающая обработка расплава может привести к существенному улучшению параметров структуры сплава Al-15% Si (таблица 1, рисунок 1). Микроструктура сплава обычного приготовления (рисунок 1, а) представляет собой крупно игольчатую эвтектику, кристаллы первичного кремния (КПК) полиэдрической формы и довольно больших размеров, а также дендриты α -твердого раствора, появившиеся по причине неравновесных условий кристаллизации.

Таблица 1 – Зависимость содержания водорода и параметров микроструктуры сплава Al-15%Si от способов обработки расплава

Способ обработки расплава	Морфология эвтектики	Объемная доля эвтектики, %	Размер структурных составляющих, мкм			Содержание водорода [H], см ³ / 100 г Me
			Эвтектический кремний	КПК	дендриты α -твердого раствора	
Без обработки	Крупно игольчатая, слабо модифицированная	47	30–60	80–120	210–440	0,3
Обработка расплава влажным асбестом	Средне игольчатая, частично модифицированная	53	12–50	70–100	180–320	0,9
Выстаивание расплава в атмосфере водяного пара	Мелкозернистая, модифицированная	67	3–5	45–50	100–150	1,3
Продувка расплава водородом	Мелкозернистая, модифицированная	92	0,5–2,0	5–10	–	1,6

Обработка расплава влажным асбестом, увеличивающая содержание диффузионно-подвижного водорода в сплаве с $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ до $0,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, способствует диспергированию частиц эвтектического кремния с сохранением их игольчатой формы, а также уменьшению размеров дендритных ячеек α -твердого раствора. Дополнительно происходит некоторое уменьшение размеров КПК, а также увеличение объемной доли эвтектики с 47 до 53% (таблица 1).

Более эффективное модифицирующее воздействие оказывают выстаивание расплава в атмосфере водяного пара и продувка расплава водородом, увеличивающие содержание диффузионно-подвижного водорода в сплаве до 1,3 и 1,6 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ металла соответственно. Однако увеличение количества определяемого водорода не сопровождается порообразованием, т.к. водород при кристаллизации расплава практически весь фиксируется в твердом растворе. Оба эти способа введения водорода в расплав обеспечивают диспергирование как эвтектического, так и первичного кремния в структуре сплава Al-15% Si. При этом они положительно влияют на морфологию эвтектики и увеличивают ее объемную долю (таблица 1). Так, после выстаивания расплава в атмосфере водяного пара в структуре силумина наблюдается эвтектика только мелкозернистого строения, объемная доля которой увеличивается с 53 до 67 %.

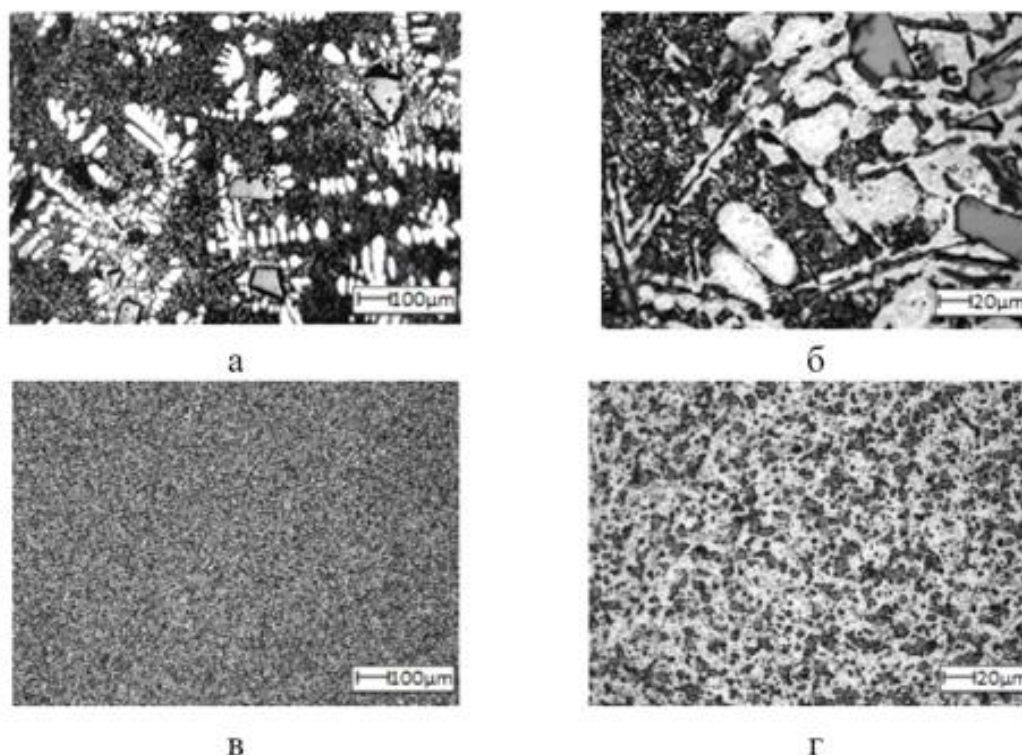


Рисунок 1 – Влияние обработки расплава на микроструктуру сплава Al-15%Si: а, б – без обработки; в, г – продувка водородом

Металлографические исследования позволили установить, что наилучший эффект модифицирования структуры обеспечивает продувка водородом (рисунок 1, в, г). Она приводит к резкому уменьшению размеров

кремнистой фазы, при этом существенно увеличивает объемную долю эвтектики с 47 до 92% и уменьшает объемную долю первичных кристаллов кремния с 19,8 до 8%. Кроме того, в структуре отсутствуют неравновесные дендриты α -твердого раствора.

Таким образом, продувка расплава водородом позволяет получить высоко модифицированную структуру, состоящую в центре слитка преимущественно из эвтектики тонкого строения, а в периферийных зонах слитка – из тонкодисперсной эвтектики и мелких КПК, присутствующих в небольшом количестве.

Эффект одновременного измельчения эвтектического и первичного кремния можно объяснить с помощью известного механизма формирования выделений кремнистой фазы при кристаллизации заэвтектических силуминов в присутствии водорода [17]. Воздействие диффузионно-подвижного водорода приводит не только к увеличению числа центров кристаллизации кремнистой фазы, но и затрудняет рост КПК.

Были изучены физико-механические свойства образцов из сплава Al-15%Si после модифицирования путем продувки расплава водородом. На основании проведенных исследований установлено, что продувка расплава водородом способствует уменьшению плотности сплава и повышению микротвердости КПК. Благодаря увеличению микротвердости КПК увеличивается общая твердость сплава (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние продувки водородом на физико-механические свойства сплава Al-15% Si

Вид обработки	Плотность ρ , кг/м ³	Твердость, НВ	Микротвердость НВ		
			КПК	дендриты α -твердого раствора	эвтектика
Без обработки	2639	80	418	42	55
Продувка водородом	2603	87	462	отсутствуют	56

Положительный эффект наводороживания расплава зависит как от правильного выбора способа введения водорода в расплав и длительности обработки расплава, так и от температуры наводороживания. Поэтому исследовали влияние температуры наводороживания 900 °С и 800 °С (время наводороживания 10 минут) на значения ТКЛР.

Установлено, что наводороживание по обоим изученным режимам приводит к снижению ТКЛР в интервале температур испытания 50–200 °С, но при более высоких температурах испытания (400–450 °С) существенно повышает ТКЛР до значений $\alpha = 21,1 - 21,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (таблица 3). Однако наводороживание расплава при температуре 900 °С по сравнению с 800 °С, более существенно снижает ТКЛР сплава Al-15% Si при низких температу-

рах испытания 50–100 °С, вплоть до значений $(15,7–17,2) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, тогда как у сплава обычного приготовления $\alpha = 18,0–18,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Таким образом, для сплава Al-15%Si лучшими параметрами модифицирующей обработки являются: температура продувки расплава 900 °С, время продувки 10 минут.

Таблица 3 – Влияние температуры продувки расплава водородом на ТКЛР сплава Al-15% Si

Температура продувки расплава	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^6 \text{ К}^{-1}$ при температуре испытания, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
–	18,0	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5	18,0
800°С	17,0	18,2	18,3	18,6	18,8	20,9	21,2	21,6	20,0
900 °С	15,7	17,2	18,2	18,8	19,4	20,9	21,2	20,7	21,1

Заключение. Изучено влияние различных видов обработки расплава, увеличивающих содержание водорода в сплаве Al–15%Si, на параметры его микроструктуры и физико-механические свойства. Установлено, что при увеличении содержания диффузионно-подвижного водорода в сплаве с 0,3 до 1,3–1,6 см³ / 100 г происходит модифицирование всех структурных составляющих, а именно, уменьшение их размеров, изменение морфологии и более равномерное распределение по объему сплава.

Показано, что продувка расплава водяным паром при 900 °С в течение 10 мин обеспечивает наилучший эффект модифицирования структуры. Полученная структура представляет собой тонкодисперсную эвтектику и небольшое количество мелких КПК. Такие структурные изменения приводят к улучшению свойств сплава Al–15%Si: происходит уменьшение значений ТКЛР ($\bar{\alpha}_{50-100} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), уменьшение плотности с 2639 до 2603 кг/м³, увеличение твердости с 80 до 87 НВ.

Библиографический список

1. Напалков В.И. Модифицирование алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, С. В. Махов., А. В. Поздняков. – Москва: МИСИС, 2017. – 347 с.
2. Афанасьев В.К. Новые способы обработки жидких сплавов алюминия с 30-50% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 29-31.
3. Белов В. Д. Поршневые силумины / В.Д. Белов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2005. – №1 (9). – С 32-34.
4. Попова М.В. Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов / М.В. Попова, А.А. Ружило // Литейное производство. – 2000. – № 10. – С. 4-6.
5. Гарибян Г.С. Влияние фосфидов на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Г.С. Гарибян, В.П. Расщупкин, И.В. Зюзько // Омский

научный вестник. – 2010 – №2 (90). – С 64-65.

6. Ушакова В.В. О влиянии обработки расплава на линейное расширение сплавов Al -20÷40% Si / В.В. Ушакова, М.В. Попова, З.А. Лузянина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 69.

7. Скоробагатько Ю.П. Модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с применением активных добавок / Ю.П. Скоробагатько // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С.19-28.

8. Стеценко В.Ю. О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2008. – №1. – С. 149–150.

9. Кузнецов А.О. Модифицирование силуминов – разные подходы для одной системы легирования / А.О. Кузнецов, Д.А. Шадаев, В.Ю. Конкевич, С.Т. Бочвар, Т.М. Кунявская // Технология легких сплавов. – 2014. – №4. – С. 75–81.

10. Афанасьев В.К. Новый модификатор для алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.М. Сагалакова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8. – № 1-2. – С. 84-91.

11. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 11–20.

12. Афанасьев В.К. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, С.В. Долгова, Ю.М. Мусохранов, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 5. – С. 17–21.

13. Гольцова М.В. Водородные технологии в литье и металлургии: настоящее и будущее (обзор) / М.В. Гольцова // Литье и металлургия. – 2018. – №4 (93). – С. 145–154.

14. Афанасьев В.К. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al-Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх, С.В. Долгова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 63-74.

15. Афанасьев В.К. Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.В. Долгова, А.В. Горшенин, М.А. Малюх // Металлург. – 2019. – № 1. – С. 71–76.

16. Афанасьев В.К. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – №6 (804). – С. 10–16.

17. Афанасьев В.К. Водород и деформируемые сплавы Al – 1÷50 % Si / В.К. Афанасьев, М.Н. Чурик, М.В. Попова [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 354 с.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА

Ломиворотов Н.П., Полунин А.М., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: m.popova@rdtc.ru*

Представлен обзор исследований по модифицированию силуминов заэвтектического состава с целью повышения физических и механических свойств. Проведен анализ модификаторов, относящихся к первой и второй группе, а также влияние на расплав операций по наводороживающей обработке и модификаторов комплексного состава.

Ключевые слова: заэвтектические силумины, модифицирование, микроструктура, эвтектика, кремний, механические свойства.

Большой резерв повышения механических свойств сплавов системы Al-Si заключается в разработке и применении различных методов модифицирования их структуры с целью уменьшения размеров структурных составляющих и их более равномерного распределения по сечению слитка или отливки. Актуальность проблемы обусловлена тем, что до настоящего времени не создано единой теории модифицирования силуминов, на основе которой возможен обоснованный выбор состава модификатора и режима модифицирования.

Модифицирование для силуминов является обязательной технологической операцией, поскольку при одном и том же химическом составе сплава позволяет обеспечить повышение механических свойств, в частности, прочности, в 2–5 раз [1–3]. Эффект модифицирования сплавов можно оценивать либо непосредственно по влиянию на структуру, либо косвенно – по влиянию на механические или физические свойства, в частности, на величину температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) [4–6].

Заэвтектические силумины с содержанием кремния 20 % и выше используются как специальные сплавы приборной техники, для которых важны не только высокие механические свойства, но и регламентируются некоторые физические свойства, например, плотность и тепловое расширение. В связи с этим целью настоящей работы является оценка современного состояния проблемы модифицирования силуминов как фактора повышения их физико-механических свойств.

Все модификаторы принято разделять на две группы [1]. К первой группе относятся модификаторы, которые в расплаве образуют высокодисперсную коллоидную взвесь и увеличивают число центров кристаллизации. Во вторую группу входят модификаторы, поверхностно активные частицы которых адсорбируются на гранях зародившихся кристаллов новой фазы и

уменьшают скорость их роста.

Для силуминов заэвтектического состава важнейшими структурными составляющими являются кристаллы первичного кремния (КПК) и эвтектика ($\alpha + \text{Si}$). Без применения модификаторов структура сплавов, содержащих 15-40 % кремния, характеризуется наличием крупных грубых ППК пластинчатой формы и крупноигольчатой эвтектики. Для модифицирования эвтектического кремния используют поверхностно-активные вещества, а для модифицирования КПК наиболее действенны тугоплавкие соединения.

Модифицирование натрием создает эффект измельчения зерна, поскольку он располагается на поверхности кластеров, служащих центрами кристаллизации, и препятствует присоединению атомов к ним из разупорядоченной зоны. Сфероидизация кристаллов способствует повышению механических свойств сплавов [1, 7, 8].

Однако модифицирование силуминов натрием и его солями имеет недостатки: вероятность образования частично модифицированной или перемодифицированной структуры; уменьшение жидкотекучести расплава; повышенная склонность к газопоглощению. Наиболее существенным недостатком является ограниченное время допустимой выдержки расплава после ввода модификатора – до 30 мин, что связано с испарением и окислением легкоплавкого натрия.

Добавление стронция вызывает измельчение эвтектики ($\alpha + \text{Si}$) и обеспечивает стабильный эффект модифицирования расплава при длительном выстаивании до 6 ч и многократном переплаве сплава до 3-4 раз. Стронций уменьшает размеры частиц эвтектического кремния и изменяет их форму от игольчатой до компактной. Изменение морфологии эвтектического кремния уменьшает количество концентраторов напряжений и способствует повышению прочностных и пластических свойств силуминов [9].

В расплаве заэвтектических силуминов при введении скандия образуются частицы интерметаллида Al_3Sc , которые служат зародышами зерен α -твердого раствора, поскольку их кристаллическая решетка имеет высокую степень структурного соответствия с кристаллической решеткой Al. Благодаря этому скандий является эффективным модификатором. При добавлении скандия незначительное уменьшение зерна начинается уже с момента образования эвтектики. Превышение скандием эвтектического содержания, приводит к резкому измельчению зерна [10].

Сурьма создает эффект длительного модифицирования в заэвтектических силуминах. При этом повышается плотность отливок, существенно улучшается их пластичность и прочностные свойства, особенно при высоких температурах. Добавки сурьмы не приводят к газовой пористости даже при литье с низкими скоростями затвердевания. Структура и свойства отливок менее чувствительны к условиям охлаждения. Однако такие добавки могут вызвать укрупнение зерна α -твердого раствора при литье и, следовательно, снижению пластичности и прочности сплавов [1, 7].

Добавление серы уже дает значительный модифицирующий эффект,

аналогичный модифицированию фосфора, а также способствует измельчению структуры. Но стоит учитывать, что повышение содержания серы вплоть до 0,1-0,2 % не производит эффективных изменений структуры. Сера модифицирует также и эвтектику α -Si, но заметно слабее, чем при использовании флюсов с содержанием натрия [7].

Наиболее сильным модификатором высококремнистых силуминов, является фосфор. Фосфор образует с алюминием частицы фосфида алюминия AlP, которые являются центрами кристаллизации КПК [1, 7].

Наравне с фосфором широко применяют обработку расплава фосфидами. Авторами [11–13] были приведены результаты исследований модифицирования силуминов фосфидами, которые показали эффективность данного метода.

В результате обработки силумина заэвтектического состава величина кристаллов первичного кремния уменьшилась до 25-40 мкм; до модифицирования величина КПК составляла 100–120 мкм. Однако механические свойства изменились незначительно $\sigma_b = 180-200$ МПа, $\delta = 0,5-1,0$ %; НВ = 95-120, что не слишком сильно отличается от исходных значений. В таблице 1 представлены результаты обработки расплава фосфидами В, Al, Ga, In.

Таблица 1 – Влияние фосфидов на механические свойства зерен первичного кремния [11]

Сплав	НВ	Микротвердость КПК
Немодифицированный	106	910
BP (0,4%)	113	1600
AlP (0,4%)	106	1460
GaP (0,4%)	106	1190
InP (0,4%)	110	1170

Из представленных значений можно сделать вывод о том, что в результате модифицирования КПК фосфидами различного состава не оказало сильного эффекта. Наблюдается повышение значений микротвердости, но значение твердости повысились только после модифицирования фосфидами бора и индия.

В работах [12–15] показан модифицирующий эффект фосфористой меди на сплавы Al – (20-30 %) Si. На структуру Al-20 % Si совместно с модифицированием лигатурой Cu-P благоприятно влияет термическая обработка, заключающаяся в нагреве до 800 °С с последующей выдержкой в течение 20 минут.

Структура не модифицированных заэвтектических сплавов состоит из КПК размером до 250 мкм в алюминиевом сплаве с 20 % кремния (рисунок 1).

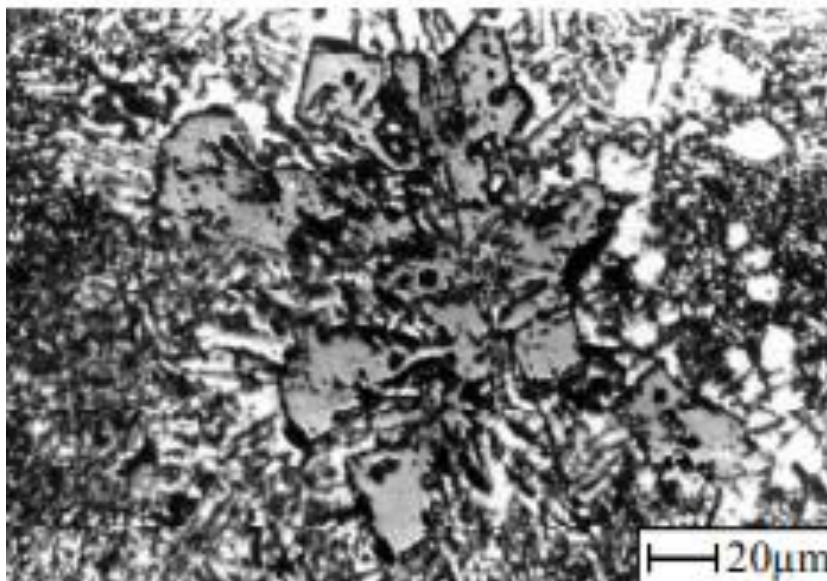


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Al – 20 % Si

Размер КПК заметно уменьшается с увеличением количества фосфора в расплаве. Максимальный модифицирующий эффект наблюдается в количестве 0,05-0,1 масс. % фосфора. При увеличении концентрации фосфора от 0,1 до 0,4 масс. % наблюдается эффект «перемодифицирования». При модифицировании фосфидом меди размер КПК значительно уменьшается, однако влияние на эвтектику негативное. Модифицирование фосфором приводит к формированию грубо дифференцированной эвтектики, снижающей пластичность силуминов.

Одним из наиболее широко используемых модификаторов для заэвтектических силуминов является соединение Cu_3P (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние обработки фосфористой медью (0,1 % от массы расплава) на прочность и пластичность силуминов с 20–40 % Si

Сплав	Механические свойства	
	σ_B , МПа	δ , %
Al–20 % Si	168	1,5
Al–30 % Si	75	0,7
Al–40 % Si	20	0,2

После обработки расплава фосфористой медью сплава Al–20% Si происходит диспергирование кремнистой фазы и эвтектики. Кристаллы кремния приобретают более округлую форму, но огрубляется эвтектика.

Часто применяемым видом обработки расплавов высококремнистых силуминов является наводороживание [16-19]. При данной обработке происходит измельчение КПК и повышается содержание атомарного водорода в слитках. Первичные и эвтектические частицы кремния диспергируются и сплав приобретает эвтектическую структуру. Поэтому повышаются механические свойства и деформируемость.

Авторы [16] исследовали охлаждение изложницы и внутренней поверхности отливки из заэвтектического силумина водой. Результатом исследования стали отливки с полностью модифицированной микроструктурой без использования модификаторов. Такая структура значительно повышает антифрикционные свойства заэвтектического силумина.

Обработка расплава, увеличивающая содержание атомарного водорода, оказывает модифицирующее влияние на микроструктуру силуминов, которое зависит от содержания кремния в сплаве. Оптимально выбранный режим наводороживания позволяет измельчить структурные составляющие и улучшить их морфологию, а также уменьшить ТКЛР силуминов [17–20].

Благодаря этому в исследованиях [21, 22] была разработана серия заэвтектических легированных сплавов на основе Al – 15...20 % Si, которые были модифицированы водородом и фосфором с целью обеспечения хорошей деформируемости и высокого комплекса механических свойств при использовании следующих легирующих элементов: медь, магний, марганец, никель, хром и другие [22].

Библиографический список

1. Напалков В.И. Модифицирование алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, С. В. Махов., А. В. Поздняков. – Москва: МИСИС, 2017. – 347 с.
2. Афанасьев В.К. Новые способы обработки жидких сплавов алюминия с 30-50% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 29-31.
3. Афанасьев В.К. Новый модификатор для алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.М. Сагалакова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8. – № 1-2. – С. 84-91.
4. Попова М.В. Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов / М.В. Попова, А.А. Ружило // Литейное производство. – 2000. – № 10. – С. 4–6.
5. Ушакова В.В. О влиянии обработки расплава на линейное расширение сплавов Al–20÷40% Si / В.В. Ушакова, М.В. Попова, З.А. Лузянина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 69.
6. Попова М.В. Воздействие модифицирования на микроструктуру и физические свойства сплавов Al-(20÷40)% Si / М.В. Попова, М.А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении: Сборник материалов 5-ой Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2018.– Т. 5. – № 1-2. – С. 132-138.
7. Скоробагатько Ю.П. Модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с применением активных добавок / Ю.П. Скоробагатько // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С.19-28.
8. Белов В.Д. Поршневые силумины / В.Д. Белов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. –2005. – №1 (9). – С 32-34.
9. Белов В.Д. Влияние стронция на структуру и свойства заэвтектиче-

ского силумина / В.Д. Белов, В.В. Гусева, Л.В. Глотова, А.И. Гаврилов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1998. – № 4. – С. 51-54.

10. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов / В.В. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 7. – С. 7-15.

11. Нгуен К.Х. Влияние технологических параметров на эффективность процесса модифицирования лигатурой медь-фосфор заэвтектического силумина / К.Х. Нгуен, В.Д. Белов // Национальный исследовательский институт «МИСиС», Москва. – 2019. – №8. – С. 63-68.

12. Махов С. В. Комплексное модифицирование заэвтектических силуминов / С. В. Махов, Д.А. Попов // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 4. – С. 21-23.

13. Гарибян Г.С. Влияние фосфидов на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Г.С. Гарибян, В.П. Расщупкин, И.В. Зюзько // Омский научный вестник. – 2010 – №2 (90). – С 64-65.

14. Пригунова А.Г. Модифицирование заэвтектических силуминов обработкой расплава импульсным электрическим током / А.Г. Пригунова, С.В. Пригунов, Д.Н. Ключник // Металлофизика и новые технологии. – 2015 – Т. 37. – № 3. – С. 367-378.

15. Стеценко В.Ю. О модифицировании заэвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // Литьё и металлургия. – 2008. – №1 (45). – 151-154.

16. Марукович Е.И. Вертикальное центробежное литье заэвтектического силумина при охлаждении литейной формы и отливки / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Литьё и металлургия. – 2017. – №2 (87). – С 5-11.

17. Афанасьев В.К. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, С.В. Долгова, Ю.М. Мусохранов, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 5. – С. 17–21.

18. Афанасьев В.К. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al-Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх, С.В. Долгова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 63-74.

19. Афанасьев В.К. Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.В. Долгова, А.В. Горшенин, М.А. Малюх // Металлург. – 2019. – № 1. – С. 71–76.

20. Афанасьев В.К. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – №6 (804). – С. 10–16.

21. Афанасьев В.К. Водород – легирующий элемент алюминиевых сплавов / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.В. Зезиков, А.В.

Горшенин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 36–39.

22. Прудников А. Н. Совершенствование термической обработки поршневых деформируемых силуминов с добавками фосфора и водорода // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2009. №1 (42). – С 8-11.

УДК 669.715.017.16

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МЕДИСТЫХ СИЛУМИНОВ

Полунин А.М., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк. e-mail: aleksandr2025@mail.ru*

В статье приведены результаты металлографических и дилатометрических исследований заэвтектических силуминов с 20 и 30 % кремния, легированных медью в количестве 2, 4, 15, 20, 30, 40, 50 %. Установлено, что введение в сплавы более 20 % меди значительно изменяет морфологию структурных составляющих и их соотношение, что сказывается на величине температурного коэффициента линейного расширения.

Ключевые слова: легированные силумины, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения, кристаллы первичного кремния.

Одним из важнейших легирующих элементов алюминиево-кремниевых сплавов является медь. Медь необходима для повышения прочности силуминов за счет увеличения их восприимчивости к упрочняющей термической обработке [1–3]. Помимо этого, фосфористая медь является важным компонентом многих модификаторов, которые диспергируют кристаллы первичного кремния (КПК) в структуре заэвтектических сплавов Al-Si [4–9].

Промышленные алюминиевые сплавы содержат от 4,5 до 10 % Cu [10], их структура и свойства хорошо изучены, в отличие от особенностей структуры высокомедистых силуминов [11–14]. Поэтому металлографические исследования тройных сплавов с содержанием меди, многократно превышающим предел ее растворимости в алюминии, являются значимыми для расширения представлений о структурообразовании легированных силуминов. В связи в данной работе было проведено исследование металлографических особенностей и определение величины температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) медистых силуминов.

Материалами исследования являлись силумины с содержанием кремния 20 и 30% Si. Для выплавки сплавов использовали алюминий марки А7, кремний марки Кр0 и медь марки М1. Сплавы выплавляли в муфельной электропечи типа SNOL. Алюминий марки А7 расплавляли, затем добавляли

кремний. Медь вводили в количестве 2, 4, 15, 20, 30, 40 и 50 %. После того, как все легирующие элементы растворятся, проводили заливку сплава в кокиль при температуре 1100 °С. Из полученных слитков вырезали образцы для дилатометрического и металлографического исследований. При проведении эксперимента использовали оптический микроскоп и дилатометр Шевенара.

Металлографические исследования показали, что введение в двойной сплав Al–20 % Si меди в количестве 20 % позволяет получить более дисперсные кристаллы первичного кремния (рисунок 1).

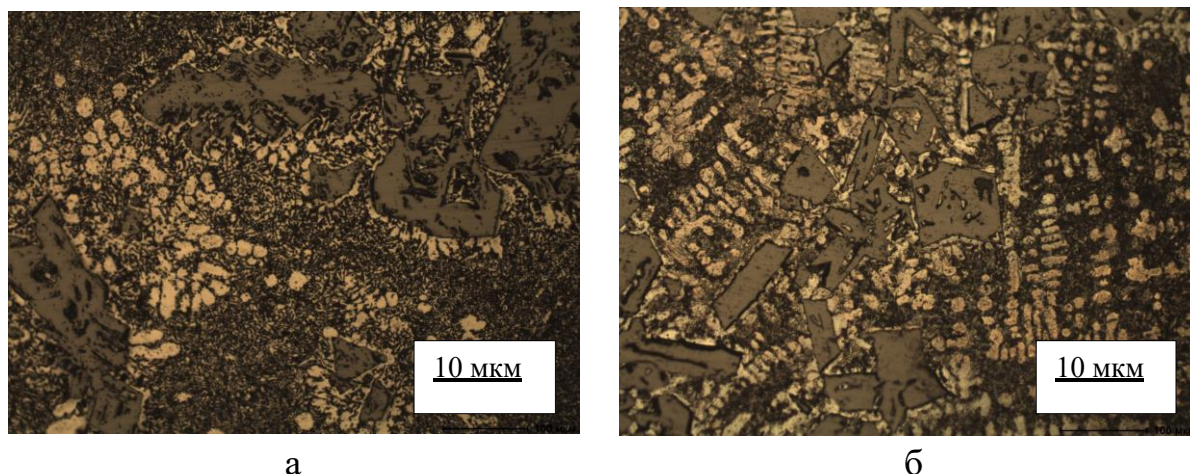


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Al–20 % Si: а – без меди, б - сплав легированный 20 % Cu

Установлено, что легирование медью в количестве 20 и 30 % приводит к частичному размодифицированию тройной эвтектики ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) (рисунок 2). При увеличении концентрации меди в КПК увеличивается число мест повышенной травимости. В сплаве без меди КПК обрамлены неравновесными дендритами α -твердого раствора, а при добавлении меди в эти сплавы дендритов α -твердого раствора не наблюдается.

В тройном сплаве Al – 20 % Si – 20 % Cu первичные кристаллы кремнистой фазы имеют наименьшие размеры и более компактную форму. Кремнистая фаза двойного сплава имеет более правильную форму, тогда как при введении меди КПК приобретают пластинчатое строение.

Установлено, что легирование медью высококремнистых силуминов с 20 и 30 % Si способствует формированию эвтектики неоднородного строения, в которой присутствуют участки различной травимости.

Таким образом, металлографический анализ позволил установить, что легирование высококремнистых силуминов медью в количестве 20–30 % увеличивает объемную долю кремнистой фазы, КПК приобретают пластинчатую форму и в них увеличивается число мест повышенной травимости. Тройная эвтектика ($\alpha + \text{Si} + \text{CuAl}_2$) имеет более неоднородное строение, чем двойная ($\alpha + \text{Si}$).

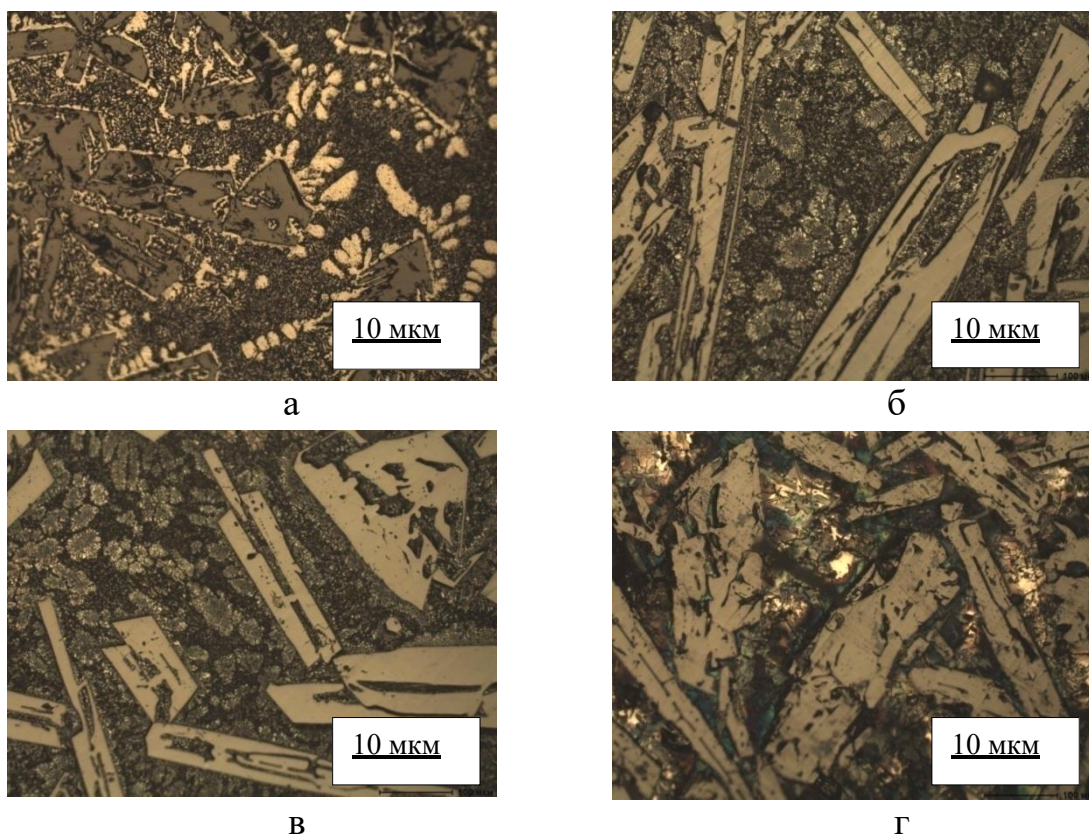


Рисунок 2 – Микроструктура сплавов на основе Al – 30% Si – Cu:
 а – без Cu, б – 20% Cu, в – 30% Cu, г – 40% Cu

В результате дилатометрического исследования установлено, что медь в количестве 2, 4, 15 % снижает ТКЛР в интервале температур 50-250 °С (таблица 1). В интервале температур испытания 50–250 °С наблюдается плавное изменение ТКЛР. Однако легирование медью в количестве 2-15 % приводит к формированию аномалии линейного расширения в интервале температур 250-350 °С. При более высоких температурах 350-450 °С вновь наблюдается снижение ТКЛР, что согласуется с данными о влиянии меди на жаропрочность алюминиевых сплавов [1].

Легирование сплава Al – 20 % Si медью в количестве 2 % дает средние значения ТКЛР в низкотемпературном интервале испытаний $\bar{\alpha}_{50-250} = 18,1 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Добавка меди в количестве 4 % приводит к дальнейшему снижению ТКЛР до значения $\bar{\alpha}_{50-250} = 16,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Однако увеличение содержания меди в сплаве до 15 % не обеспечивает дальнейшего снижения среднего ТКЛР, $\bar{\alpha}_{50-250} = 18,0 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Из сравнения средних значений, можно сделать вывод о том, что легирование малыми добавками меди более целесообразно в количестве до 4 %.

Увеличение меди до 20 % приводит к стабилизации значений ТКЛР в температурном интервале 50 - 250 °С. Кроме того, легирование медью в больших количествах устраняет аномалию линейного расширения. Были вычислены средние значения в интервале температур 50-250 °С при легировании большими добавками меди. Введение меди в количестве 20 и 30 % сни-

жает значения среднего ТКЛР соответственно до $\bar{\alpha}_{50-250} = 14,4$ и $14,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Анализ полученных средних значений позволяет утверждать, что наиболее низкие значения ТКЛР в рабочем интервале температур приборной техники имеет сплав Al – 20 % Si, легированный 50 % меди, средний ТКЛР которого равен $\bar{\alpha}_{50-250} = 6,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Таблица 1 – Влияние меди на тепловое расширение сплава Al – 20 % Si

Содержание меди в сплаве, %	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ при температуре испытания, °C								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
-	17,4	18,2	18,7	19,2	20,1	19,2	17,2	17,4	11,3
2	16,5	17,4	17,8	18,8	20,1	21,7	20,7	20,1	19,5
4	16,7	17,7	18,0	18,1	19,4	24,4	21,6	17,6	15,4
15	16,4	16,8	16,9	17,2	17,4	17,7	20,1	17,2	15,5
20	13,6	14,6	14,6	14,6	14,4	15,1	15,7	15,9	16,3
30	10	13,5	14,4	14,6	16,3	16,6	16,8	17,2	17,5
40	8,5	9,3	9,9	10,5	10,9	11,1	12,0	13,3	14,2
50	5,3	5,7	6,2	7,0	7,1	7,3	7,4	8,6	8,8

Таким образом, по результатам металлографического анализа установлено, что легирование медью в количестве 20 % влияет на микроструктуру сплава Al – 20 % Si следующим образом: формируются более мелкие и округлые первичные кристаллы кремнистой фазы, между которыми располагаются дисперсная эвтектика и дендриты α -твердого раствора. Металлографический анализ позволил установить, что легирование сплава Al – 30 % Si медью в количестве 20-40 % увеличивает объемную долю кремнистой фазы, КПК приобретают пластинчатую форму, и в них увеличивается число мест повышенной травимости. Тройная эвтектика (α +Si+CuAl₂) имеет более неоднородное строение, чем двойная (α +Si). В ходе dilatометрического исследования были получены значения ТКЛР, на основании которых можно сделать вывод об оптимальном количестве вводимой меди в сплав Al – 20 % Si. Введение в силумин меди в количестве 50 % дает самые низкие значения ТКЛР во всем температурном интервале испытаний.

Библиографический список

1. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – Москва : Металлургия, 1977. – 272 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – Москва : Металлургия, 1979. – 640 с.
3. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд. – Москва : МИСИС, 2005. – 432 с.

4. Напалков В.И. Модифицирование алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, С. В. Махов., А. В. Поздняков. – Москва: МИСИС, 2017. – 347 с.
5. Afanas'ev V.K. New treatment methods for liquid aluminum alloys with 30-50% silicon / V.K. Afanas'ev, M.V. Popova // Steel in Translation. – 2001. – Т. 31. – № 2. – С. 50-53.
6. Кузнецов А.О. Модифицирование силуминов – разные подходы для одной системы легирования / А.О. Кузнецов, Д.А. Шадаев, В.Ю. Конкевич, С.Т. Бочвар, Т.М. Куньявская // Технология легких сплавов. – 2014. – №4. – С. 75–81.
7. Куцова В.З. Влияние легирования на структуру, фазовый состав и свойства промышленных заэвтектических поршневых силуминов / В.З. Куцова, О.А. Носко, А.С. Шерстобитова // Стародубовские чтения. – 2008. – №3. – С. 10-19.
8. Махов С.В. Комплексное модифицирование заэвтектических силуминов / С. В.Махов, Д.А. Попов // Metallurgy машиностроения. – 2012. – № 4. – С. 21-23.
9. Афанасьев В.К. Новый модификатор для алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.М. Сагалакова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8. – № 1-2. – С. 84-91.
10. Алиева С.Г. Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева. – Москва : Metallurgy, 1984. – 526 с.
11. Афанасьев В.К. Тепловое расширение сплавов Al-Cu после обработки расплава и термообработки / В.К. Афанасьев, М.А. Малюх, М.В. Попова, В.А. Лейс, С.В. Долгова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 87-94.
12. Афанасьев В.К. О возможности получения легких инваров на основе системы Al-Si-Cu / Афанасьев В.К., Попова М.В., / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх // Metallurgy: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2021. – С. 154-158.
13. Афанасьев В.К. Особенности структурообразования и свойства высоколегированных сплавов специального назначения системы Al-Si-Cu / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 2022. – № 11 (809). – С. 48-53.
14. Афанасьев В.К. Влияние меди на структуру и тепловое расширение сплавов Al – 40 % Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх // Metallurgy: технологии, инновации, качество: труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2022. – С. 379-385.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ Al-Mg-Si

Попова М.В., Михеева М.В., Караваева К.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: m.popova@rdtc.ru*

Представлен обзор научных публикаций, посвященных изучению влияния магния совместно с кремнием на свойства алюминиевых сплавов типа авиаль (6XXX). Проведен анализ влияния легирующих элементов на особенности структуры, прочность, пластичность и коррозионную стойкость сплавов. Показаны области применения авиалей.

Ключевые слова: авиали, кремний, магний, железосодержащие интерметаллиды, технологическая пластичность, гомогенизация.

Алюминиевые сплавы являются широко распространенными конструкционными материалами, объемы применения которых в промышленности постоянно увеличиваются. Номенклатура промышленных алюминиевых сплавов велика, но среди них особое место занимают среднепрочные термически упрочняемые деформируемые сплавы системы Al-Mg-Si (авиали) [1, 2]. Более 90 % от общего объема прессованных изделий из алюминиевых сплавов изготавливается именно из этих этой группы. Это объясняется высокой пластичностью авиалей как в горячем, так и в холодном состоянии и возможностью получать детали сложной формы, в том числе со сложными поперечными сечениями. Кроме того, сплавы системы Al-Mg-Si отличаются значительной коррозионной стойкостью, удовлетворительной механической прочностью и свариваемостью, хорошей технологичностью [3–6]. Авторы [7] установили, что сплавы системы Al-Mg-Si (алюминиевые сплавы серии 6XXX) характеризуются не только хорошими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью, улучшенной свариваемостью, но также снижением остаточных напряжений в крупногабаритных пластинах и листовых изделиях.

Важно то, что магний не только повышает прочностные свойства алюминия после пластической деформации, но и делает возможным упрочнение после закалки и старения [2, 8]. Кремний в сочетании с магнием обеспечивает малую плотность и высокую коррозионную стойкость сплавов этого типа. Увеличение содержания легирующих элементов позволяет получить на основе этой системы легирования легкие сплавы со специальными свойствами, в частности, с низким температурным коэффициентом линейного расширения [9–11]. Имеется большое количество научных публикаций, подтверждающих активное участие водорода в формировании структуры и служебных свойств алюминиевых сплавов, получаемых различными способами [12–17]. В работах [16, 17] изучено влияние водорода на поведение сплавов Al-Mg-Si в условиях усталостных испытаний. Показано, что введение добавок меди

снижает склонность сплавов Al-Mg-Si к наводороживанию в процессе усталостных испытаний, при этом не образуются областей охрупчивания.

Химический состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si в нашей стране соответствует ГОСТ 4784-74 и ОСТ 1.90048-72. За рубежом состав промышленных сплавов соответствует EN 573-3. Все промышленные сплавы системы Al-Mg-Si имеют суммарное содержание легирующих элементов от 1 до 2%. В настоящее время в международном реестре насчитывают около 100 марок сплавов этого типа. Причина такого многообразия в том, что часто производитель корректирует химический состав сплава в зависимости от его конкретного применения [18].

Например, в сплаве 6060 отношение Si/Mg более высокое, чем у сплавов 6063 и АД31. Содержание кремния во всех сплавах примерно одинаково, а содержание магния в сплаве 6060 значительно ниже: 0,35-0,60 вместо 0,45-0,90 %.

В 2000 году в ГОСТ 4784-74 были внесены изменения, из-за которых в сплаве АД31 появилось больше примесей. Максимальное содержание железа в сплаве АД31 может быть равно 0,50 %, тогда как у сплава 6060 оно равно 0,30%, у сплава 6063 – 0,35 % Fe. Более высокое содержание допустимых примесей, в первую очередь, железа, позволило использовать для выплавки вторичный алюминий. Но, с другой стороны, увеличение содержания железа приводит к охрупчиванию вследствие наличия нерастворимых железосодержащих интерметаллидов игольчатой формы.

В состав сплавов системы Al-Mg-Si (авиали, сплавы 6XXX) кроме основных компонентов входят также марганец, медь и хром. Эти легирующие элементы необходимы для повышения коррозионной стойкости, исключения потери прочности в результате вылеживания, а также для дополнительного упрочнения авиалей после естественного и искусственного старения. Марганец и хром препятствуют также зернограничному охрупчиванию вследствие выделения интерметаллидных частиц по границам зерен в процессе старения.

Многие сплавы Al-Mg-Si содержат медь ($Cu \leq 0,10\%$). Медь, находясь в твердом растворе, дополнительно повышает прочность сплавов, однако после искусственного старения увеличивает чувствительность к межкристаллитной коррозии. Поэтому современные авиали условно делят на две группы: содержащие меди не более 0,5 % и с добавками меди в количестве 0,5–1,5 % [18].

К сплавам первой группы относятся АД31, 6063, 6060. Они имеют невысокую прочность ($\sigma_b = 190$ МПа), но очень высокую технологическую пластичность, что позволяет обеспечивать большие скорости истечения металла (30–60 м/мин) при горячем прессовании и получать тонкостенные полые полуфабрикаты сложной конфигурации с хорошим качеством поверхности (рисунок 1). Еще одно достоинство данных сплавов – весьма низкая критическая скорость закалки, которая позволяет закаливать профили на желобе пресса в процессе естественного охлаждения на воздухе [18].

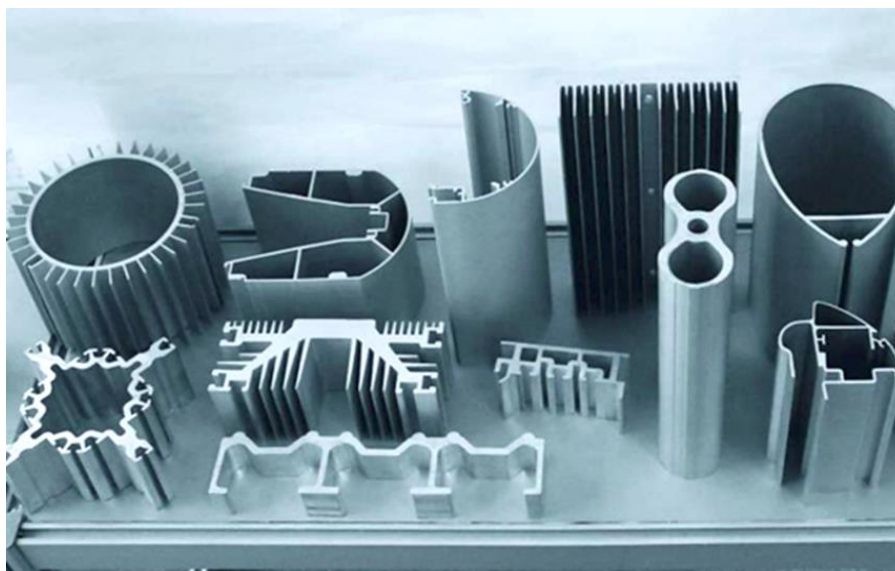


Рисунок 1 – Примеры прессованных изделий из сплавов серии 6XXX

Сплавы второй группы, такие как АД33, АД35, АВ, 6061, 6082 и т. д. имеют более высокие прочностные свойства ($\sigma_b = 240\text{--}270$ МПа), однако меньшую технологическую пластичность и коррозионную стойкость. Сплавы этой группы применяют в наземном транспорте взамен сталей, что позволяет снизить массу конструкции, уменьшить расход топлива, улучшить экономические показатели и экологичность транспортных средств.

Особенностью системы Al-Mg-Si является то, что магний и кремний образуют интерметаллидную фазу Mg_2Si , выделение которой из пересыщенного твердого раствора обеспечивает упрочнение сплавов после закалки ($515\text{--}525$ °С и охлаждение в воде) и последующего искусственного старения ($160\text{--}170$ °С, выдержка 10–12 ч) [2]. Кроме основной упрочняющей фазы Mg_2Si уровень механических свойств авиалей зависит от интерметаллидов, которые могут быть образованы при участии других легирующих элементов, например, меди, марганца и хрома ($\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$, $\text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$, AlCrFeSi , AlSiMnFe), а главное – от наличия железосодержащих интерметаллидов. Дело в том, что даже малое содержание железа, ввиду его очень малой растворимости в алюминии в твердом состоянии вызывает появление железосодержащих фаз игольчатой формы, которые расположены по границам зерен твердого раствора и дендритных ячеек. К ним относятся фаза $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ скелетной формы серого цвета, фаза Al_5FeSi иглообразной или пластинчатой морфологии, а также фаза $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ шрифтообразной формы.

Особенно опасное снижение механических свойств происходит при содержании железа в сплавах в количестве 0,5–0,7 %.

Таким образом, в литом состоянии границы зерен и дендритных ячеек окаймлены первичными выделениями интерметаллидов, что делает сплав более хрупким. Прессование слитков в таком состоянии будет сопровождаться высоким сопротивлением деформации и недостаточной пластично-

стью металла при экструзии, так же приводит к возникновению на поверхности профиля различных дефектов.

Для повышения производительности процесса производства прессованных полуфабрикатов и изделий слитки сплавов системы Al-Mg-Si подвергают гомогенизационному отжигу с регламентированным охлаждением. Его назначение – повышение технологической пластичности слитков за счет формирования в структуре сплава компактных частиц интерметаллидных фаз. Однако оптимальные режимы гомогенизационного отжига применительно к конкретным условиям производства могут существенно различаться как по температуре, так и по времени изотермической выдержки, а более всего – по скорости охлаждения. В связи с этим режимы гомогенизационного отжига необходимо совершенствовать как для повышения прессуемости слитков, так и для сокращения общего времени гомогенизации.

В настоящее время деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы серии 6XXX системы Al-Mg-Si) широко применяются во многих отраслях современной промышленности, таких как авиастроение (малонагруженные узлы самолетов, различные детали арматуры гидравлических систем, внутренняя декоративная отделка кабин самолетов и вертолетов), строительство (оконные блоки, магазинные входные группы, межкомнатные перегородки), машиностроение (детали машиностроительных линий, трубы разных видов), транспорт (кузовные детали грузовиков, изделия для внутреннего обустройства железнодорожных вагонов) и другие.

Библиографический список

1. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд./ С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян [и др.]. – Москва: Металлургия, 1984.–528 с.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд. – Москва : МИСИС, 2005. – 432 с.
3. Dahle A.K., Lee Y.C., Nave M.D., Schaffer P.L., StJohn D.H.. Development of the as cast microstructure in magnesium-aluminium alloys, *Journal of Light Metals*, 2001. – Vol. 1. – Issue 1. – P. 61–72.
4. S. Toros, F. Ozturk, I. Kacar. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 207, issues 1–3, p. 1–12.
5. B. Milkereita, M.J. Starinka. Quench sensitivity of Al-Mg-Si alloys: A model for linear cooling and strengthening, *Materials & Design*, 2015, vol. 76, p. 117–129.
6. Chang-Yeol Jeong. High Temperature Mechanical Properties of Al-Si-Mg-(Cu) Alloys for Automotive Cylinder Heads // *Materials Transactions – Vol. 54.* – 2013. – №. 4. – P. 588-594.
7. Ehrstrom J, Warner T. Metallurgical design of alloys for aerospace structures // *ICAA 7.* – 2000. – V.1. – P. 5–16.

8. Афанасьев В.К. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 8 – 13.
9. Ушакова В.В. О влиянии магния на линейное расширение силуминов / В.В. Ушакова, П.Б. Рудаева, М.В. Попова // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1996. – № 4. – С. 45-46.
10. Afanas'ev V.K. Effect of alloying on the thermal expansion of aluminum / V.K. Afanas'ev, M.V. Popova, A.A. Ruzhilo, V.F. Frolov. – *Russian metallurgy (Metally)*. – 2002. – № 6. – P. 539-544.
11. Афанасьев В.К. Алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния и магния. Часть I. Al-11÷30%Si+5÷30%Mg // В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, М.А. Малюх, В.В. Герцен, А.В. Горшенин // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – № 2. – С. 10-15.
12. Афанасьев В.К. Водород и деформируемые сплавы Al – 1÷50 % Si / В.К. Афанасьев, М.Н. Чурик, М.В. Попова, С.В. Долгова, С.А. Гладышев, А.В. Горшенин, В.А. Самонь, В.В. Герцен. – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 354 с.
13. Афанасьев В.К. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, С.В. Долгова, Ю.М. Мусохранов, М.В. Попова // *Металлургия машиностроения*. – 2015. – № 5. – С. 17–21.
14. Афанасьев В.К. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al-Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх, С.В. Долгова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 63-74.
15. Афанасьев В.К. Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.В. Долгова, А.В. Горшенин, М.А. Малюх // *Металлург*. – 2019. – № 1. – С. 71–76.
16. Horikawa K., Yamada H., Kobayachi H. Hydrogen Evolution during Fatigue Deformation in 6061 and 7075 Aluminium Alloys // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama. – 2010. – P. 371–376.
17. Ichitani K., Koyama K. Effect of Experimental Humidity on Fatigue Fracture of 6XXX-series Aluminium Alloys // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama. – 2010. – P. 363–370.
18. Бенариев И. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) / И. Бенариев, Л.Б. Бер, К.В. Антипов, С.В. Сбитнева // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – №3 (56). – С. 14–22.

ВЛИЯНИЕ ВИДА ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

Прудников В.А., Рексиус В.С., Прудников А.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: a.prudnikov@mail.ru*

Изучено влияние прессования иковки заготовок на свойства полуфабрикатов из легированного заэвтектического силумина, с микродобавками фосфора и водорода. Показано, что прочностные и пластические свойства кованных прутков из заэвтектических силуминов превышают свойства прессовок на 10 и 6-7 % соответственно.

Ключевые слова: заэвтектический силумин, состав,ковка, прессовка, пруток, структура, механические свойства

Широкий спектр заэвтектических легированных силуминов позволяет выбрать сплав для различного вида деталей с разнообразными эксплуатационными свойствами. Однако требования, предъявляемые развитием современной науки и производства, диктуют необходимость разработки новых материалов, в том числе многокомпонентных сплавов типа легированных заэвтектических силуминов [1, 2]. При этом предпочтение отдается группе деформируемых силуминов в отличие от аналогичных литейных сплавов, которые обладают более низкими механическими характеристиками [3, 4]. Для увеличения пластичности заэвтектических силуминов используют разнообразные пути: подготовку шихты, обработку расплава, изменения условий кристаллизации, термическую обработку и другие [5-10]. При этом использование различных видов пластической деформации приводит к неодинаковым результатам улучшения прочности и пластичности сплавов. В связи с этим целью работы является оценка воздействия процессовковки и прессования на механические характеристики легированного заэвтектического силумина.

Химический состав слитков из исследуемого силумина, которые подвергались пластической деформации, следующий, в (вес.) %: кремний – 15,2; медь – 1,42; магний – 0,71; марганец – 0,83; титан – 0,09; железо – 0,16; остальное – алюминий. Для измельчения в микроструктуре силумина первичного и эвтектического кремния, а также сложных фаз, содержащих Al, Cu, Mg, Mn, в жидкий сплав добавляли микронавески реагентов Cu_3P и LiH в количестве 0,1 % и 0,2 % от веса расплава соответственно.

Для определения влияния вида деформации использовали изотермическое прессование и свободную ковку заготовок.

Изотермическое прессование на пруток из исследуемого силумина проводили на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 20 МН прямым способом в условиях ПО "Полет" (г. Омск). Температура нагрева под

прессование равнялась 420-450 °С. Коэффициент вытяжки составлял 7, а диаметр прессованного прутка силумина 57 мм. Ковку заготовок из силумина проводили на кузнечном пневматическом молоте МА4134 с массой падающих частей 250 кг и энергией удара 0,64 кДж на плоских бойках. Исходная заготовка имела квадратное сечение 106×106 мм. Перед ковкой заготовки подвергали отжигу для получения в них равновесной структуры при температуре 450±10 °С в течение 2 ч. Температура нагрева под ковку составляла 420-450 °С. Ковку заготовок осуществляли за три прохода по схеме изменения стороны квадрата 106 → 95 → 60 → 27 мм. Общий коэффициент укова составил 15,5. Общий вид кованого и прессованного прутков и образец для определения механических характеристик из легированного силумина приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид кованого и прессованного прутков и образец для определения механических характеристик из легированного силумина

Металлографический анализ прессовок и поковок из силумина показал, что послековки размер структурных составляющих, в том числе кристаллов первичного и эвтектического кремния, упрочняющих фаз CuAl_2 , Mg_2Si , S-фазы (Al_2CuMg), W-фазы ($\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$), имеют меньший размер чем в прессовке.

Характеристики прочности и пластичности деформированных прутков разного сечения показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства кованного и прессованного прутков из заэвтектического легированного силумина

Вид заготовки	Сечение прутка	Механические свойства			Средний ТКЛР, α , $\cdot 10^6$, град ⁻¹ в интервале, °С	
		σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	50-200	200-450
пруток кованый	квадрат, 27×27, мм	255	6,6	13,7	19,9	21,2
пруток прессованный	круг, диаметр, 57 мм	232	6,2	12,9	20,1	20,9

Из данных таблицы видно, что кованные полуфабрикаты обладают более высокими характеристиками прочности и пластичности. По-видимому, это связано с более жесткой схемой деформации при ковке, чем в случае прессования и соответствующими изменениями, происходящими в структуре полуфабрикатов различного типа. Так, временное сопротивление разрыву поковок выше на 10 %, а характеристики пластичности на 6-7 %, чем прессованных прутков из легированного заэвтектического силумина.

Библиографический список

1. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.
2. Афанасьев В.К. Перспективный путь развития поршневых сплавов / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, А.А. Ружило // *Материалы и технологии XXI века: Сб. материалов Всероссийской науч.-техн. конф.*– Пенза: ПГТУ, 2001.– С. 24-26.
3. Прудников А.Н. Технологические аспекты изготовления поршней из деформируемых заэвтектических силуминов / А.Н. Прудников // *Сборник трудов СибГИУ.*– Новосибирск: Наука, 2004.– С. 190-197.
4. Афанасьев В.К. Разработка поршневого заэвтектического силумина и технологии изготовления поршней обработкой давлением / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия.*– 1999.– № 6.– С. 53-56.
5. Афанасьев В.К. Модифицирование бинарного заэвтектического силумина / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия.*– 1999.– № 10.– С. 33-35.
6. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // *Деформация и разрушение материалов.*– 2014.– № 2.–С.14 - 20.
7. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины / А.Н. Прудников // *Технология металлов.*– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.
8. Прудников А.Н. Исследование комплексного модифицирования заэвтектических силуминов с содержанием кремния 20...30 % фосфидами и оксидами некоторых металлов / А.Н. Прудников // *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия.* – 1995. – № 2. – С. 38-41.
9. Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Е.И. Панов, Г.И. Эскин // *МиТОМ.*– 2004.– № 9.– С. 7-13.
10. Прудников А.Н. Получение прессованных заготовок из заэвтектического силумина и их свойства / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // *Актуальные проблемы в машиностроении.* – 2018.–Т. 5.– № 1-2.– С. 126-131.

СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛИТКОВ И ПРЕССОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

Прудников В.А., Шелтреков М.О., Прудников А.Н.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: a.prudnikov@mail.ru*

Исследовано влияние изотермического прессования на структуру и свойства слитка из легированного заэвтектического силумина с 15 % Si, модифицированного фосфидом меди и гидридом лития. Показано, что деформация заэвтектического силумина приводит к уменьшению среднего размера КПК до 20÷40 мкм и измельчению эвтектических частиц кремния и, соответственно, позволяет значительно повысить механические характеристики полуфабрикатов из заэвтектического силумина.

Ключевые слова: заэвтектический силумин, состав, структура, слиток, прессовка, эвтектика, кристаллы первичного кремния, свойства

В последнее десятилетие все большее внимание стало уделяться заэвтектическим силуминам, особенно в области машиностроения, приборостроения и других важных отраслей промышленности. Причем подавляющая часть исследовательских работ затрагивает либо методы улучшения структуры силуминов, такие как рафинирование, модифицирование, условий кристаллизации и др. [1-6], либо процессы деформации (ковку, штамповку, прокатку, прессование) или совмещенного воздействия деформации и термической обработки эвтектических или заэвтектических сплавов [7-10]. Поэтому целью данной работы является исследование структуры и свойств прессованных полуфабрикатов из легированного заэвтектического силумина с 15 % кремния.

В качестве материала исследования использовали слитки из легированного заэвтектического силумина с 15 % Si (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемого силумина

Сплав	Компоненты сплава, вес. %							
	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Ni	Fe	Al
Al-Si-Cu-Mg	15,21	1,42	0,71	0,83	0,09	0,02	0,16	ост.

Выплавку силумина проводили в индукционной высокочастотной печи ИАТ-0,06 в графито-шамотном тигле емкостью 40 кг. в промышленных условиях цеха ЦЦР АО «Русал-Новокузнецк». Сплав готовили на алюминии марки А6 (ГОСТ 11069–74), кремнии марки Кр0 (ГОСТ 2169–69), технически чистых металлов меди М1 и магнии Mg0, а также лигатурах Al-Mn и Al-Ti. Для модифицирования структуры силумина в расплав вводили комплекс-

ный состав, состоящий из фосфида меди (Cu_3P) в количестве 0,1 % и гидрида лития (LiH) – 0,2 % от веса расплава. После выдержки в течение 30 минут для растворения фосфида меди и снятия шлака с поверхности расплава проводили заливку в стальной кокиль цилиндрической формы при температуре $750\text{ }^\circ\text{C}$. Габариты слитка составляли: диаметр 150 мм, высота 600 мм, вес $35\pm 0,5$ кг.

Процесс прессования проводили в условиях ПО "Полет" – филиал АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева" (г. Омск). Прутки из исследуемого силумина прессовали, используя горизонтальный гидравлический пресс, с усилием прессования 20 МН. Метод изотермического прессования, реализуемый прямым способом, позволяет получать пруток с гарантированно одинаковой структурой на всех участках. Перед ковкой заготовки подвергали отжигу для получения в них равновесной структуры при температуре $450\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. Температура нагрева под прессование равнялась $420\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент вытяжки составлял 7, а диаметр прессованного прутка силумина 57 мм. Общий вид прутка показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид прессованного прутка диаметром 57 мм и заготовка для металлографического образца из легированного силумина

Металлографический анализ слитков и прессовок проводили на поперечных темплетах, приготовленных по стандартной методике для алюминиевых сплавов с использованием оптического микроскопа ЛабоМет-И1. Механические свойства силумина определяли при статических испытаниях на растяжение на разрывной машине Р-20 с использованием стандартных цилиндрических образцов. Диаметр рабочей части образцов составлял 6 мм. Для расчета среднего коэффициента линейного расширения использовали дилатограммы, снятые с помощью дифференциального оптического дилатометра Шевенара.

Микроструктура слитка в поперечном сечении и прессованного прутка из легированного заэвтектического силумина с 15 % Si приведены на рисунке 2.

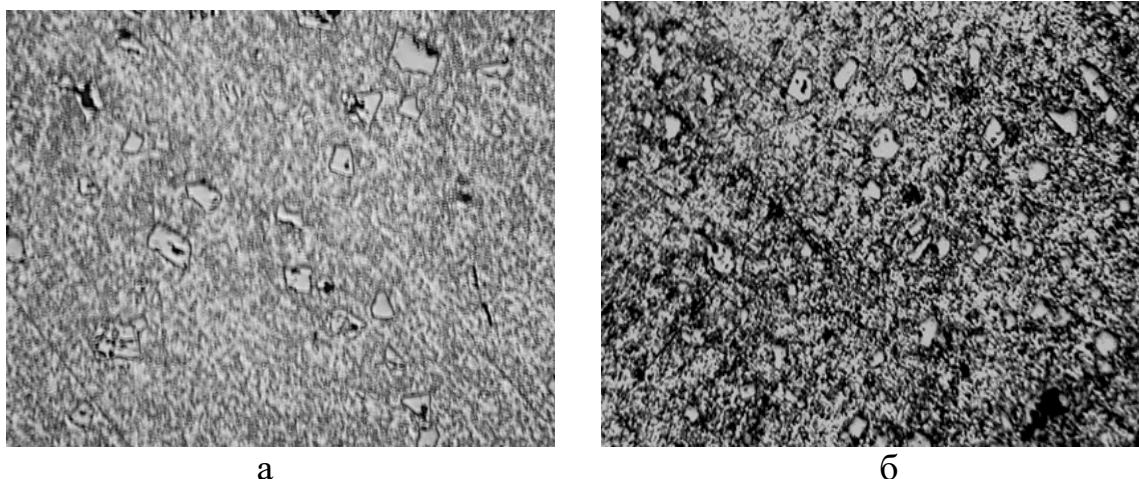


Рисунок 2 – Микроструктура слитка в поперечном сечении (а) и прессованного прутка (б) из легированного заэвтектического силумина, $\times 120$

Известно, что при модифицировании заэвтектических силуминов составами, содержащими фосфор или его соединения, происходит не только уменьшение размеров первичных кристаллов кремния (КПК), но огрубление эвтектики (Al+Si) [11]. Те же процессы наблюдаются и в исследуемом слитке из легированного силумина (рисунок 2). Средний размер КПК в структуре слитка составляет $30 \div 60$ мкм, что ниже величины КПК в структуре необработанного сплава. Деформация заэвтектического силумина приводит к уменьшению среднего размера КПК до $20 \div 40$ мкм и измельчению эвтектических частиц кремния в полуфабрикate. Изотермическое прессование слитка позволило получить пруток диаметром 57 мм с одинаковой структурой на всех участках, характеризующейся высокой однородностью и равномерностью.

Механические характеристики слитка и прессованного прутка из легированного заэвтектического силумина, а также средний температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние изотермического прессования на свойства заэвтектического легированного силумина

Состояние	Механические свойства			Средний ТКЛР, α , $\cdot 10^6$, град $^{-1}$ в интервале, $^{\circ}\text{C}$	
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	Ψ , %	50-200	200-450
слиток	161	1,1	0	18,9	19,7
пруток	232	6,2	12,9	20,1	20,9

Из данных таблицы видно, что изотермическое прессование слитков из легированного заэвтектического силумина с 15 % Si улучшает как прочностные характеристики (временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ на 44 %), так и характеристики пластичности (δ , Ψ) в несколько раз. При этом значения среднего ТКЛР в различных интервалах возрастают более чем на 6 %.

Таким образом, пластическая деформация легированного заэвтектиче-

ского силумина позволяет значительно повысить механические характеристики полуфабрикатов.

Библиографический список

1. Prudnikov A.N. Production, structure and properties of engine pistons made from transeutectic deformable silumin // A.N. Prudnikov // *Steel in Translation*. – 2009.–Т. 39. – № 5. – С.391-393.

2. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.09 / НГТУ, Новосибирск, 2013. – 40 с.

3. Prudnikov A.N. Deformable heatproof transeutectic silumin for pistons // A.N. Prudnikov // *Steel in Translation*. – 2009.– Т. 39. – № 6. – С. 456-459.

4. Афанасьев В.К. Разработка поршневого заэвтектического силумина и технологии изготовления поршней обработкой давлением / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия*.– 1999.– № 6.– С. 53-56.

5. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины / А.Н. Прудников // *Технология металлов*.– 2014.– № 2.– С. 8 - 11.

6. Афанасьев В.К. Модифицирование бинарного заэвтектического силумина / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*.– 1999.– № 10.– С. 33-35.

7. Панов Е.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Е.И. Панов, Г.И. Эскин // *МиТОМ*.– 2004.– № 9.– С. 7-13.

8. Прудников А.Н. Получение прессованных заготовок из заэвтектического силумина и их свойства / А.Н. Прудников, В.А. Прудников // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2018.–Т. 5.– № 1-2.– С. 126-131.

9. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжигов и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // *Деформация и разрушение материалов*.– 2014.– № 2.–С.14 - 20.

10. Афанасьев В.К. Технология получения слитков, деформированных заготовок и поршней из заэвтектического жаропрочного силумина и их свойства / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, А.В. Горшенин // *Обработка металлов*.– 2010.– № 3.– С. 28-31.

11. Афанасьев В.К. Применение гидрида лития и фосфида меди для обработки расплава поршневых алюминиево-кремниевых сплавов / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, А.А. Ружило и [др.]. / *Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов: сб. материалов VIII Межд. конф. ICHMS*. – Киев: ADEF-Ukraine, 2003. – С. 380-381.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Алексеева Е.А., Кибко Н.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: alexseevae@mail.ru*

Изучены классификация и химический состав, механические и эксплуатационные свойства, способы и режимы термической обработки, влияние химического состава на структурные составляющие и свойства рельсовой стали. Проведен анализ влияния химического состава и способов термической обработки на улучшение структуры и повышение уровня свойств рельсовой стали.

Ключевые слова: термическая обработка, рельсовая сталь, химический состав, структура, эксплуатационные свойства.

Железнодорожные рельсы работают в максимально сложных условиях, их состояние оказывает прямое влияние на безопасность движения поездов. Поэтому нужно соблюдать требования к использованию рельсов.

При этом необходимо учитывать:

- оптимальный химический состав необходимый для создания благоприятных условий применения термической обработки рельсов, улучшающих их прочностные характеристики;
- характеристики прочности и износостойкости, обеспечивающие высокую пропускную способность и срок службы;
- улучшенные эксплуатационные характеристики;
- оптимальные характеристики по свариваемости и обрабатываемости для применения бесстыкового пути и достижения высокого качества стрелочных переводов;
- соблюдение требований к допускам на геометрические размеры, конфигурацию и качество поверхности.

Химический состав рельсовой стали влияет на параметры микроструктуры, механические и эксплуатационные свойства рельсов, такие как твердость, истирание, смятие, трещиностойкость. Классификация химического состава металла рельсов регламентируется действующим стандартом качества ГОСТ Р 51685-2013 [1-3].

Высокая работоспособность рельсов достигается за счёт образования структуры тонкопластинчатого мелкодисперсного перлита. Углерод и другие стабилизирующие аустенит элементы (Mn, Cr, Mo, Ni), способствуют улучшению структуры, за счет чего наблюдается повышение уровня свойств. На повышение работоспособности рельсов оказывает значительное влияние достижение структурной однородности металла. Это обеспечивается

получением структуры с минимальным количеством структурно-свободных фаз, выделяющихся по границам зёрен, – феррита в доэвтектоидной и цементита в заэвтектоидной стали. Уменьшения доли структурно свободных фаз можно добиться путем корректировки содержания углерода на близкое к эвтектоидному (0,8 %) значение. Легирование элементами упрочняющими феррит, такими как кремний и марганец, также способствует повышению работоспособности и износостойкости [4-6].

Для повышения эксплуатационных свойств необходимо устранить выделение в структуре стали структурно-свободного феррита в процессе производства. Это возможно за счет исключения микролегирующих элементов [7].

Термическая обработка применяется практически на всех предприятиях по производству рельсов. Для упрочнения стали применяют закалку; в целях снятия напряжений используют отпуск; для удаления водорода и предотвращения образования флокенов производят противфлокеновую обработку; чтобы измельчить зерна и улучшить пластические и вязкие свойства металла проводят нормализацию или термоциклирование; для снижения твердости делают высокий отпуск.

В зависимости от характера распределения упрочненного слоя по сечению рельса применяют различные способы обработки. Для упрочнения металла по всему профилю рельса используют объемную обработку; для упрочнения металла головки на определенную глубину проводят поверхностную обработку; для получения эффекта поверхностного упрочнения головки рельса на заданную глубину и дифференцированной прочности в остальном сечении рельса применяют объемно-поверхностную или дифференцированную термическую обработку [3].

Процессы термической обработки различаются по виду охлаждающей среды, способу нагрева под термообработку и виду термического упрочнения.

До недавнего времени наиболее распространенным среди способов термической обработки рельсов был метод объемной закалки рельсов в масле с печного нагрева. Индустриальное масло обладает высокой охлаждающей способностью, что обеспечивает высокие механические свойства, однако при процессе объёмной закалки практически не удается контролировать формирование остаточных напряжений, поэтому был разработан метод дифференцированной термической обработки, предполагающий различную скорость охлаждения элементов профиля рельсов. К тому же в связи с минимальным технологическим воздействием на параметры охлаждающей среды процесс объёмной закалки невозможно использовать для производства рельсов различного химического состава, что обуславливает выход на передний план более перспективных видов термической обработки и использование более экологичных и безопасных сред, таких как водные растворы полимеров, воздух и водовоздушные смеси.

Водополимерные растворы имеют существенное преимущество перед индустриальным маслом и обеспечивают более высокие механические свойства. Вместе с тем, для обеспечения однородности перлитной структуры

стали при использовании данных сред необходим жёсткий контроль температурно-временного режима закалки и концентрации раствора [8].

Дифференцированная термическая обработка в воздушной и водовоздушной среде получила достаточно широкое распространение и применяется для производства рельсов на предприятиях. Технология обеспечивает высокую твердость и оптимальную структуру. В результате применения дифференцированного термического упрочнения рельсовой стали с использованием сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды получена новая категория рельсов (ДТО350НН), характеризующаяся благоприятным сочетанием прочностных свойств, характеристик пластичности и показателей сопротивления хрупкому разрушению [9].

В начале развития термической обработки рельсов необходимость противоблоковочной обработки обуславливала проведение закалки с повторного нагрева. При этом использовали различные способы нагрева под термообработку: печной нагрев и индукционный. Повторный нагрев характеризуется низкой энергоэффективностью и производительностью установки, поэтому была разработана и внедрена технология термического упрочнения рельсов с использованием тепла предпрокатного нагрева. Данный метод широко применяется на предприятиях, занимающихся производством термоупрочненных рельсов [10].

В настоящей работе проведен анализ зависимости микроструктуры и свойств рельсов от химического состава, от способа нагрева под термическую обработку и вида охлаждающей среды. В результате сравнительного анализа определен оптимальный химический состав, обеспечивающий получение структуры тонкопластинчатого перлита для улучшения износостойкости рельсов и продления им срока службы; определены способы термической обработки, оказывающие положительное влияние на структуру и свойства рельсов.

Библиографический список

1. Смирнов Л.А. Повышение качества отечественных железнодорожных рельсов / Л.А. Смирнов [и др.]// Бюллетень научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия». – 2005. – № 6. – С. 43–49.
2. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1): национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2013 г. N 1155-ст: введен взамен ГОСТ Р 51685–2000: дата введения 2014-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 95 с.
3. Шур Е.А. Повреждения рельсов / Е.А. Шур. – Москва : Интекст, 2012. – 192 с.
4. Технологические аспекты производства железнодорожных «суперперлитных» рельсов / А.Б. Юрьев [и др.] // Москва : Сталь, – 2009. – №8. –

С. 78-79.

5. Ершов Г.С. Физико-химические основы рационального легирования сталей и сплавов / Г.С. Ершов, Ю.Б. Бычков. – Москва: Металлургия, 1982. – 360 с.

6. Колбасников Н.Г. Исследование эксплуатационной надежности железнодорожных рельсов, прокатанных по разным технологиям / Н.Г. Колбасников [и др.] // Москва : Сталь – №12 – 2014 – С. 76-83.

7. Павлов В.В. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянец, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – Москва: Теплотехник, 2007. – 280 с.

8. Абдурашитов А.Ю. О разработке рельса типа Р65 с улучшенным профилем / А.Ю. Абдурашитов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений : сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия», Новокузнецк, 26–28 октября 2010 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 144–159.

9. Токмакова Е.Н. Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации / Е.Н. Токмакова, И.Е. Перков, П.В. Иванов, К.Л. Заграничек / Вестник ВНИИЖТ. 2022. – Т. 81. – №4. – С. 339–346.

10. Масару Уэда. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшиеразработки NipponSteel / Масару Уэда, Кацуя Ивано, Такэси Ямамото // Москва: Инженерные решения. – 2012. – №1. – С. 9–11.

УДК 621.791.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК

Михно А.Р., Махнев И.А., Крюков Р.Е., Панченко И.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: mikno-mm131@mail.ru*

В работе представлены результаты получения высокоэнтропийного сплава, полученного путем электродуговой наплавки порошковой проволоки системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni. Представлено описание изготовления высокоэнтропийной порошковой проволоки, приведены режимы получения наплавленного покрытия, а также результаты химического состава покрытия.

Ключевые слова: наплавка; порошковая проволока; сварочный флюс; высокоэнтропийные сплавы; покрытие; химический состав.

Развитие современной авиационной, космической и военной техники, а также тепловой и ядерной энергетики требует разработки нового поколения конструкционных материалов, обладающих повышенными абсолютными и удельными характеристиками. Внедрение таких материалов позволит, с од-

ной стороны, разработать новые образцы техники, обладающие улучшенными характеристиками, а с другой – повысить экономическую эффективность и безопасность их эксплуатации [1-5].

В настоящее время одной из основных проблем, возникающих при электродуговой наплавке широко распространенными порошковыми проволоками, являются сложности обеспечения стабильной структуры, присутствие пор и дефектов структуры, что, соответственно, приводит к постепенному ухудшению ресурса наплавляемых изделий [6-10]. В настоящее время данную проблему предлагается решить получением порошковой проволоки, наполненной высокоэнтропийным сплавом, и ее дальнейшим наплавлением на подложку. В проекте будет проведен аналитический расчет элементного состава высокоэнтропийных проволок состава Al-Co-Cr-Fe-Mn и Co-Cr-Fe-Mn-Ni, затем получена композиция высокоэнтропийных проволок из них и проведено наплавление на стальную основу. Будет выполнен всесторонний анализ структуры, механических и физических свойств полученных покрытий, а также проанализировано изменение тонкой структуры, параметров структуры и микротвердости в зависимости от расстояния от основы.

В условиях НПЦ «Сварочные процессы и технологии» ФГБОУ ВО «СибГИУ» был осуществлен процесс изготовления порошковой проволоки на лабораторной установке по технологии с пропусканием через фильтры. Диаметр изготавливаемой проволоки 4.5 мм, оболочка выполнена из ленты 08пс размером 14×0.6 мм.

Для изготовления высокоэнтропийной порошковой проволоки использовались порошкообразные материалы: хром ПХ-1С по ТУ 14-1-1474-75, марганец МР-0 по ГОСТ 6008-82, никель ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722-97, кобальт ПК-1у по ГОСТ 9721-79. Состав шихты брался из расчета 25% всех используемых элементов.

Наплавка исследуемого состава проводилась под высококремнистым марганцевым флюсом АН-348А по ГОСТ 9087-81, который обеспечивает хорошее формирование, малую склонность к образованию пор и удовлетворительную отделимость шлаковой корки от наплавленного металла.

Таблица 1 - Компонентный состав используемого флюса

Марка флюса	Массовая доля, %									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	CaF ₂	K ₂ O	S	P
АН-348А	41.0-44.0	0.5-2.0	6.0	10.0	7.0	34.0-38.0	4.0-6.0	-	Не более 0,12	Не более 0,12

В качестве подложки была использована пластина из стали 09Г2С размером 20*70*500 мм.

Наплавка исследуемых образцов осуществлялась с использованием режима наплавки, рекомендованного по ГОСТ 26101-84, сила тока 450А, напряжение 28В, скорость наплавки 15 см/мин. После процесса наплавки

были вырезаны образцы размером 40*20 мм.

В лабораторных условиях ЦКП «Материаловедение» определяли химический состав наплавленного покрытия рентгенофлуоресцентном методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС -71. Определение химического состава наплавленного металла проводили химическими методами: на содержание углерода по ГОСТ 12344-2003, серы по ГОСТ 12345-2001 и фосфора по ГОСТ 12347-77. Результаты химического состава представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Протокол рентгеноспектрального и спектрально-эмиссионного анализа исследуемых образцов

Массовая доля элементов, %													
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	W	V	Co	Al	Nb	S	P
0,09	0,38	5,13	6,43	8,01	0,06	0,006	0,049	0,003	8,42	0,051	<0,001	<0,002	0,055

Полученный результат указывает на то, что изготовленная порошковая проволока состоит из 70% стальной оболочки (Fe) и 30% легирующих элементов (Mn, Cr, Ni, Co).

Выводы:

1. В лабораторных условиях изготовлена экспериментальная порошковая высокоэнтропийная проволока системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni. Проведено наплавление изготовленной проволоки на стальную основу на режимах: сила тока 450А, напряжение 28В, скорость наплавки 15 см/мин.

2. Установлено, что химический состав полученного наплавленного слоя состоит в основном: из Fe – 70 %, Mn – 5,13%, Cr – 6,43%, Ni – 8,01%, Co – 8,42 %, что в свою очередь указывает на необходимость снижения содержания железа в наплавленном слое.

Исследование выполнено финансовой поддержке Российского научного фонда, № 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>.

Библиографический список

1. Структура и свойства системы «покрытие ВЭС Кантора (Mn-Fe-Cr-Co-Ni) / подложка (сплав 5083)» / С. В. Коновалов, М.О. Ефимов, И.А. Панченко, Ю.А. Шлярова // Известия Алтайского государственного университета. – 2023. – № 1(129). – С. 37-43. – DOI 10.14258/izvasu(2023)1-05.

2. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process (2020) International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107 (7-8), pp. 3315-3332.

3. Исследование высокоэнтропийных сплавов в качестве перспективных материалов / А.В. Дуб, А.Г. Лебедев, А.Г. Баликоев [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 13-19.

4. Исследование технологичности жаропрочных высокоэнтропийных

сплавов / А.Г. Лебедев, А.Г. Баликоев, Д.С. Змиенко [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 9-13.

5. Lee D.Y., Leifsson, L., Kim, J.-Y., Lee, S.H. Optimisation of hybrid tandem metal active gas welding using Gaussian process regression (2020) *Science and Technology of Welding and Joining*, 25 (3), pp. 208-217.

6. Yang L., Wang Y., Sun T., Huang Y., Zhai Y., He T. Microstructure and mechanical properties of FCTIG-welded DH36 steel with rutile-type and basic-type flux cored wires (2020) *Journal of Materials Processing Technology*, 275.

7. Степанов Н.Д. Влияние алюминия на структуру и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cr–Fe–Mn–Ni с повышенным содержанием Fe и Cr / Н. Д. Степанов, Д. Г. Шайсултанов // Уральская школа молодых металловедов : материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, Екатеринбург, 21–23 октября 2017 года / Ответственный редактор: А.А. Попов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Ключевой Центр превосходства "Материаловедение перспективных металлосодержащих материалов и технологий их обработки". – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – С. 247-249.

8. Структурно-фазовые состояния покрытия ВЭС Al-Fe-Co-Cr-Ni, сформированного на сплаве 5083 / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов [и др.] // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 41-51. – DOI 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.005.

9. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала / Н.А. Кочетов, А. С. Рогачев, А.С. Щукин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2018. – № 2. – С. 35-42. – DOI 10.17073/1997-308X-2018-2-35-42.

10. Прогнозирование фазового состава высокоэнтропийных сплавов на основе Cr–Nb–Ti–V–Zr с помощью CALPHAD-метода / И.И. Горбачев, В.В. Попов, А. Кац-Демьянец [и др.] // *Физика металлов и материаловедение*. – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 408-416. – DOI 10.1134/S0015323019040065.

5D-ПЕЧАТЬ. АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Коток М.М., Коновалов С.В., Панченко И.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kotok04@bk.ru*

В работе приводится описание процесса и технологии 5D печати. Представлены исследования, проводимые на базе СибГИУ. Описана разница между технологиями 3D и 5D печатей. Представлены результаты исследования технологий 5D принтера, анализ полученного образца. Определены дальнейшие планы по развитию этого направления.

Ключевые слова: 5D принтер, аддитивное производство, металлический филамент.

Научная новизна и практическая значимость изучения аддитивных технологий для промышленного производства объясняются, прежде всего, тем, что они рассматривают новую область технологических знаний [1].

В настоящем исследовании были поставлены следующие задачи:

- Создать модель для печати на 5D модуле;
- Провести пробную печать;
- Проанализировать качество полученной модели.

«Аддитивное производство» – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели.

5D принтер – это инновационный пятиосевой 3D принтер с технологией 5Dtech для печати прочных функциональных изделий. Технология 5Dtech повышает прочность напечатанных изделий до 400 %. Уменьшается время печати до 80 % и сокращает количество поддержек. Принтер оснащен дополнительной рабочей платформой с подогревом, которая позволяет использовать 5D принтер в качестве обычного 3D принтера. Особенностью конструкции 5D-принтера является наличие наклонно-поворотного стола вместо плоской платформы печати. Принтер печатает детали с помощью наложения нити материала в разных направлениях.

В данный момент на базе СибГИУ разрабатывается технология аддитивного производства при помощи 5D принтера Stereotech 530 HYBRID. Была выполнена экспериментальная печать куба размерами ребер 10 мм. Материалом печати являлся металлический филамент. В результате модель получилась хорошего качества, не требовала дополнительной обработки, обладала достаточной твердостью.

Данная технология только набирает обороты в своем развитии и распространении [2]. Уже идет процесс использования технологии 3D печати в крупных и полезных для общества проектах.

Библиографический список

1. Livintsova M. Additive technologies as a promising component of the innovative production process / Livintsova M., Ponyaeva I., Chatinian H. // Proceedings of the International Scientific Conference - Digital Transformation on Manufacturing, Infrastructure and Service – 2020. – No 2 – pp. 1–5. – <https://doi.org/10.1145/3446434.3446447>
2. Михайлова, А. Е. 3D принтер – технология будущего / А. Е. Михайлова, А. Д. Дошина. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 20 (100). – С. 40-44. – URL: <https://moluch.ru/archive/100/22467>

III ЭКОЛОГИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 622'17

ВСКРЫШНЫЕ ПОРОДЫ УГЛЕДОБЫЧИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Царева Е.Е., Коротков С.Г.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: E.E.Tsareva@yandex.ru*

В работе представлен обзор возможного применения вскрышных пород как перспективное сырье для производства бетона.

Ключевые слова: вскрышные породы, переработка вскрышных пород, физико-механические характеристики, строительные материалы.

При добыче каменного угля открытым способом, сначала разрабатывают и удаляют в огромном количестве пустые горные породы, которые лежат над угольным пластом. Толщина вскрышных пород достигает до 40 м, поэтому их удаляют послойно путем взрыва и последующей разработкой. Затраты угольных предприятий на разработку, транспортировку и хранение вскрышных пород в отвалах достигает до 40-60 % от себестоимости добычи каменного угля.

Уголь залегает в осадочных породах, представленных в основной массе глинистыми, песчаными и карбонатными породами, каждая из которых характеризуется определенными физико-механическими свойствами. При добыче его открытым способом в отвалы складироваться значительные массы вмещающих пород, занимая большие площади. Техногенные сооружения таких размеров могут нести в себе большую опасность как для всех работ на разрезе, так и для окружающей среды, и в том числе рабочего персонала. Отвалы являются экологически неблагоприятными образованиями. Основные негативные явления, возникающие при этом пылевые выбросы, водная и ветровая эрозия, просадки и оползни, самовозгорание [1].

Выявлено, что по химико-минералогическим составам и физико-механическим характеристикам местные вскрышные породы угледобычи являются сырьем для производства строительных материалов. Существует возможность получения бетона высокой прочности, керамического кирпича и пористого заполнителя из отходов угледобычи, а также их применение в качестве минеральной добавки для минеральных вяжущих.

Практика показывает, что перспективным потребителем вскрышных пород угледобычи является промышленность строительных материалов, так как по своим химико-минералогическим составам отходы угледобычи пригодны как сырьевые материалы для производства различных строительных

материалов. В лаборатории строительных материалов Тувинского государственного университета выполнены исследования по возможности применения местных вскрышных пород для производства строительных материалов.

В работе [2] изучены вскрышные сопутствующие породы угледобычи. Показано, что они представлены различными породами осадочного и метаморфического происхождения, которые могут подвергнуться уплотнению и термической обработке.

Некоторые породы содержат серые песчаники и гнейсы слоистой структуры, однако так же могут встречаться с наличием красно-коричневых глиежей и серыми песчаниками. По размеру частиц вскрышные породы углеобогащения, полученные взрывным способом, делятся на щебень (5-40 мм), валуны (100-300 мм) и блоки (более 500 мм). Основная их масса представлена щебнем (10-20 %) и валунами (40-50 %). Химический состав пород характерен для алюмосиликатного сырья, где преобладают оксиды кремния и алюминия. Песчаники отличаются повышенным содержанием щелочеземельных оксидов (CaO и MgO) при умеренном содержании железистых соединений.

В глиежах наблюдается максимальное содержание оксида кремния и высокой концентрации железистых соединений. При этом доля CaO и MgO минимальное. Из-за предварительной термической обработки глиежи имеют наименьшие потери при прокаливании.

В аргиллитах при оптимальном содержании SiO_2 , Al_2O_3 и высоком содержании железистых элементов (более 7 %), в значительном количестве присутствуют щелочные оксиды (K_2O и Na_2O более 4 %), что очень важно при получении керамических изделий.

Минералогические составы вскрышных пород, определенные рентгенофазовым и дифференциально-термическим анализами, а также оптической микроскопией содержат традиционные породообразующие минералы силикатного сырья. Выявлено, что в песчаниках наряду с кварцем и альбитом присутствуют кальцит и биотит. В глиежах в значительном количестве (70-74 %) присутствует кварц, анортит (18-20 %), гетит (8-10 %), а также кальцит.

Изучение физико-механических характеристик вскрышных пород показало, что объемная насыпная масса песчаной фракции (0,14-3,0 мм) равна: песчаника - 1640 кг/м³; глиежей - 1610 кг/м³; глинистых аргиллитов - 1580 кг/м³. Их водопоглощение составило: 4,1; 7,2 и 4,7 % соответственно. Предел прочности при сжатии равен: песчаника - 51,4; глиежей - 44,5; глинистых аргиллитов - 36,1 МПа.

Анализ химического, минералогического и гранулометрического составов, а также физико-механических характеристик вскрышных пород углеобогащения показывает, что они являются сырьевыми компонентами различных видов строительных материалов.

В результате проведенных исследований выявлено, что песчаники, которые имеют самые большие объемы в отвалах, могут быть перспективным сырьем в качестве заполнителя для изготовления тяжелого и легкого бетона. Валуны и щебеночные частицы песчаника в результате действия природных

осадков (дождевые и талые воды) становятся чистыми, в сравнении с искусственными заполнителями (отсев и щебень), производимые дорожниками. Они отличаются повышенным содержанием глинистых и пылеватых частиц. Последние, попадая в бетонную смесь, снижают сцепление цементного камня с заполнителями.

Полученные взрывным способом валуны и щебень песчаника имеют более развитую поверхность (повышенная шероховатость) и микротрещины в структуре, что обеспечивает прочное сцепление цементного камня с заполнителем при твердении.

На основе двух фракций (20-40 и 5-10 мм.) щебня песчаника, где соотношение между мелкими и крупными заполнителями 1:4, а также песчаных частиц (0,14-2,5 мм) песчаника приготовлена бетонная смесь с осадкой конуса 6 см (цемент марки М400), которая после тщательного уплотнения и тепловлажностной обработки, после месячного твердения имела прочность при сжатии 42-47 МПа, что на 30-35 % больше, чем прочность бетона цеха железобетонных изделий.

Результаты работы по получению пенобетона неавтоклавного твердения на основе 60 % измельченного песчаника (частицы менее 0,63 мм) и 40 % цемента, а также традиционного пенообразователя (ПБ-2000) показали возможность получения легкого стенового материала со средней плотностью 720-800 кг/м³, предел прочности при сжатии 4,8-6,2 МПа и теплопроводностью 0,38 Вт/(м °С). Пенобетон из вскрышных пород менее теплопроводен, чем шлакобетон и керамзитобетон из-за наличия в структуре равномерно распределенных пор примерно одинаковым диаметром (0,5-2 мм). Прочность полученного легкого бетона вполне достаточна для восприятия вертикальной нагрузки одноэтажных зданий.

Аргиллиты из-за наличия глинистых минералов после тонкого измельчения являются потенциальным сырьем для производства керамических изделий пористого и плотного черепка. При увлажнении тонкоизмельченные глинистые аргиллиты переходят пластическую массу с формовочной влажностью 20 %, воздушной усадкой 3,4 %, связующей способностью (предел прочности при сжатии сырца) 2,1 МПа. Обожженные при 950°С изделия (образцы-цилиндрики диаметром и высотой 50 мм) характеризуются следующими физико-механическими свойствами: средняя плотность - 1760 кг/м³; огневая усадка -6,2 %; водопоглощение - 16,4 %; предел прочности при сжатии - 21,5 МПа; морозостойкость более - 25 циклов. Структура керамического материала отличается наличием закрытых пор диаметром 100-250 мкм, что связано с выгоранием органических составляющих присутствующих в исходном сырье. С применением пластического способа формования, на основе измельченных аргиллитов -вскрышных пород углеобогащения, возможно получение керамических стеновых материалов марки М100; М125.

Наряду с получением стеновых материалов еще одним направлением применения вскрышных пород углеобогащения является получение теплоизоляционных материалов. На основе глинистых аргиллитов (70-75 %) и соды (15-

20 %) получены пористые круглые гранулы диаметром от 1 до 4 см. В результате помола глинистых аргиллитов до удельной поверхности не менее 6000 см²/г и смешивания с газообразователем (измельченный местный известняк в количестве 5-6 %) получена пенообразующая смесь, окатанная на тарельчатом грануляторе с целью изготовления гранулированного материала. Осуществление процесса вспенивания гранулированной шихты в электрической печи при температуре 900 °С позволило получить пеностекло - кристаллический материал с плотностью 280-320 кг/м³, водопоглощением 8-10%, прочностью при сжатии в цилиндре 0,8-1,0 МПа и теплопроводностью 0,10-0,12 Вт/(м °С).

В результате использования получен пористый гранулированный материал не только для утепления покрытий здания, но и заполнитель для производства легких бетонов.

Другим направлением использования попутных продуктов углеобогащения может стать применение их в качестве компонента комплексного вяжущего, что установлено на примере глиежей (горелые породы) угольного бассейна. Введение до 30 % тонкоизмельченной термообработанной породы в состав цементного вяжущего не вызывает существенного снижения прочности цементного камня при сжатии (уменьшение прочности с 47,2 МПа до 41,4 МПа при добавке 30 % глиежей).

Выявлено, что при введении 10 % горелой породы наблюдается повышение прочности при сжатии цементного камня до 49,1 МПа. Возможно, при добавке 10 % тонкоизмельченной термообработанной породы изменяются процессы гидратации в результате взаимодействия компонентов глиежей и гидроксида кальция, а также соотношение гидратных фаз, что приводит к повышению прочности цементного камня. Следует отметить, что с увеличением содержания добавки повышается плотность цементного камня и стойкость к сульфатной коррозии [2].

Возможность получения стеновых и теплоизоляционных материалов, а также смешанного вяжущего на основе вскрышных пород углеобогащения, позволяет рассматривать их как сырье для производства местных строительных материалов. Такая переработка вскрышных пород, может обеспечить значительный экономический и экологический эффект в производстве местных строительных материалов.

Библиографический список

1. Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А. Вскрышные породы гледобычи – перспективное сырье для производства строительных материалов / Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А // ВЕСТНИК. Технические и физико математические науки: ТГУ, г. Кызыл, 2017. - 6 с.

2. Стрекалова Т.А., Стрекалова В. А, Меренкова Е.С. Мероприятия, снижающие вредное воздействие отвалов на окружающую среду / Стрекалова Т.А., Стрекалова В. А, Меренкова Е. С. // Научный журнал. Успехи современного естествознания: вып. 2013. - № 4 / ФГАОУ ВПО «СФУ», «ЦМиМ», с. 118-121.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ СО ВСКРЫШНЫМИ ПОРОДАМИ

Царева Е.Е., Коротков С.Г.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: E.E.Tsareva@yandex.ru*

Рассмотрен опыт рекультивации отвала вскрышных пород карьера угольного бассейна по технологии биологической рекультивации.

Ключевые слова: горная промышленность, вскрышные породы, отходы горного производства, отвалы вскрышных пород.

Несмотря на безвредность самих вскрышных пород, их складирование на отвалах оказывает существенное влияние на окружающую среду и человека. Для решения этой задачи до сих пор проводятся научные исследования и опыты.

Множество экологов ведут споры при рассмотрении проблем использования отходов производства для рекультивации нарушенных земель и в качестве вторичных материальных ресурсов.

В настоящее время Кузбасс является крупнейшим регионом в России по добычи полезных ископаемых из недр земли. Именно в Кузбассе добывается 58 % черного топлива, причем 66 % добывается открытым способом. На землях Кузбасса расположен Кузнецкий угольный бассейн – самое богатое угольное месторождение в мире. Из общих запасов для добычи открытым способом пригодно 140 млрд т угля. В процессе деятельности горнодобывающих предприятий деформируется ландшафт земной поверхности. За всем этим стоит вопрос о правильной утилизации промышленных отходов.

На сегодняшний день актуальной проблемой становится утилизация производственных отходов и рекультивация техногенно-нарушенных земель предприятий. Многообразие состава и свойств техногенных ресурсов, сосредоточенных в отвалах, определяет широкий диапазон возможных направлений для их применения и утилизации [1].

Заслуживает внимания опыт рекультивации отвала вскрыши карьера угольного бассейна [2].

Участок 0,5 га делится на опытные площадки по 25 м каждая, ориентированные по розе ветров по линии юго-запад-северо-восток. После планировки участка выполнялись четыре варианта подготовки площадок: 1 - контрольный, борозды не нарезались, 2 - нарезали борозды 10-15 см с расстоянием между ними 70-80 см по направлению северо-восток, юго-запад; 3 - нарезали борозды высотой 10-15 см через каждые 70-80 см по направлению юго-восток, северо-запад; 4 - нарезали борозды высотой 10-15 см через каждые 70-80 см по направлению северо-юг.

Через год после нарезки борозд опытные площадки разбивались на учетные квадраты площадью в 1 м, на которых определялись показатели видового состава: встречаемость и общее количество поселившихся растений.

В течение 1-2 лет происходит быстрое и равномерное зарастание поверхности отвалов, обусловленное созданными условиями влагонакопления, влагораспределения, почвообразования.

Биологическое рекультивирование отвалов вскрышных пород, включающее планировку и создание микрорельефа на поверхности отвала, отличается тем, что, для улучшения условий зарастания (за счет снижения ветровой эрозии и стимуляции почвообразования) микрорельеф создается путем бороздо-создания перпендикулярно направлению господствующих ветров с расстоянием между бороздами 20-80 см.

Такой подход биологической рекультивации является весьма интересным и малозатратным, но, к сожалению, не многие разрезы подвергаются такому способу рекультивации и в некоторых случаях это будет являться прямым нарушением Федерального закона. На этот счет Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, разъясняет законодательство по вопросу размещения отходов организациями, производящими добычу полезных ископаемых «письмом» от 19 мая 2014 года N 05-12-44/10285.

«В соответствии с Федеральным законом от 24.06.98 N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" (далее - Закон об отходах) под объектом размещения отходов понимается специально оборудованное сооружение, предназначенное для размещения отходов (полигон, шламохранилище, хвостохранилище, отвал горных пород и другое)[3].

Требования к объектам размещения отходов определены, в частности, пунктами 2 и 5 статьи 12 Закона об отходах, устанавливающими, в том числе, запрет на захоронение отходов в границах населенных пунктов и обязательность проведения специальных исследований для определения места строительства объекта размещения отходов.

Согласно статье 11 Федерального закона от 23.11.95 N 174-ФЗ "Об экологической экспертизе" проектная документация объектов, связанных с размещением (хранение и захоронение) отходов I-V класса опасности, является объектом государственной экологической экспертизы федерального уровня [4].

Таким образом, все организации, осуществляющие эксплуатацию объектов размещения отходов (в том числе отвалы горных пород и хвостохранилища) обязаны разрабатывать и представлять на государственную экологическую экспертизу проектную документацию указанных объектов.

Между тем, необходимо учитывать, что в соответствии с основными положениями о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы, утвержденными совместным приказом Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации и Комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 22.12.95 N 525/67 "Об утверждении

Основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы" и зарегистрированному в Минюсте России 29.07.96 N 1136, рекультивация нарушенных земель осуществляется для их восстановления в сельскохозяйственных, лесохозяйственных, водохозяйственных, строительных, рекреационных, природоохранных и санитарно-оздоровительных целях.

При этом, в соответствии с межгосударственными стандартами ГОСТ 17.5.1.01-83 "Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения" [5] и ГОСТ 17.5.1.03-86 "Охрана природы. Земли." [6], для рекультивации карьерных выемок могут использоваться только вскрышные и вмещающие породы, не содержащие радиоактивные элементы и токсичные соединения в концентрациях, опасных для жизни человека и животных, при этом будет обеспечено отсутствие негативного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, рекультивация карьерных выемок и искусственно созданных полостей с использованием отходов производства и потребления фактически является размещением (захоронением) отходов.

При этом деятельность по обезвреживанию и размещению отходов I-IV классов опасности в соответствии с Федеральным законом от 04.05.2011 N 99-ФЗ "О лицензировании отдельных видов деятельности" является лицензируемым видом деятельности.

По мнению Минприроды России, рекультивация карьерных выемок и искусственно созданных полостей с использованием отходов производства и потребления (в том числе вскрышных пород, образующихся при добыче полезных ископаемых) возможна при наличии положительного заключения государственной экологической экспертизы и лицензии на деятельность по обезвреживанию и размещению отходов I-IV классов опасности» [7].

Вскрышные породы относятся к отходам V класса опасности, т. е. в большинстве своем не наносят ущерба окружающей среде, однако их нерациональное использование может спровоцировать многие техносферные происшествия. Такой способ биологической рекультивации является достаточно эффективным и мало затратным.

Библиографический список

1. Журнал «Добывающая промышленность». [Электронный ресурс]. URL: Регионы добычи угля: ТОП-7 | Добывающая промышленность (drom.online) (дата обращения 18.02.2023 г.).

2. Способ биологической рекультивации отвалов вскрышных пород: пат. SU 1 496 661 A1 СССР: A01B 79/02(2006.01), A01B 13/16(2006.01) / Куприянов А.Н., Жаров С.В., Арсенов Г.П., Екатов О.В; патентообладатель Куприянов А.Н.

3. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 19.12.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2023) "Об отходах производства и потребления"// Федеральный закон "Об экологической экспертизе" от 23.11.1995 N 174-ФЗ.

4. ГОСТ 17.5.1.01-83. "Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения". Официальное издание. Охрана природы. Земли: Сб. ГОСТов. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. - 8 с.

5. ГОСТ 17.5.1.03-86 "Охрана природы. Земли." Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель: введ. 1988-1-1. – М.: Изд-во стандартов, 1986 7 - с.

6. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: письмо N 05-12-44/10285 «О разъяснении законодательства по вопросу размещения отходов организациями, производящими добычу полезных ископаемых»: 2014-05-19. – 1 с.

УДК 549

МАЛАКОФАУНИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ – КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И КОРРЕЛЯЦИИ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Лысенко Н.Е., Тетерина И.И.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: ya.teterinairina@yandex.ru*

В статье описывается возможность использования ископаемых пресноводных моллюсков для реконструкции физико-географических условий прошлого и изучения природных геосистем. Описывается возможность выполнения палеогеографических реконструкций по материалам отложений с изучением палеонтологического материала из вмещающих пород.

Ключевые слова: фауна, моллюски, палеоэкология, экосистема, поздний кайнозой, палеонтология.

Палеоэкология – это наука о «взаимоотношениях между миром организмов геологического прошлого и средой их обитания» (Геккер, 1957).

Палеоэкология занимается восстановлением условий обитания и образа жизни древних организмов, их реакцией на изменение этих условий. Основателем палеоэкологии стал замечательный русский исследователь Роман Федорович Геккер. Результаты своих работ, начавшихся с конца 20-х годов прошлого века, он обобщил в монографии "Введение в палеоэкологию" (1957). Эти исследования были посвящены биотам морей различных эпох палеозоя, мезозоя и кайнозоя. В дальнейшем палеоэкологические методы были распространены и на континентальные фауны и флоры. [1]

Основным методом, используемым в палеоэкологии, является актуализм. Он построен на предположении, что в разные периоды на земле действовали одни и те же экологические законы. Изучение современных организмов и тщательный анализ накопленных данных даёт возможность выявить экологические особенности вымерших форм путем сравнения их с современными формами, близкими таксономически или морфологически.

Малакофаунистический анализ является одним из наиболее активно используемых приемов реконструкции и корреляции палеогеографических событий. Объекты его изучения – раковины моллюсков, которые являются информативной палеонтологической группой, присутствующей в отложениях почти всех литолого-генетических типов. Особенно многочисленны они в морских образованиях, так же широко развитых по периферии материков, и в осадках внутриконтинентальных водоемов.

Микрофаунистический анализ кайнозойских отложений проходит в несколько этапов:

1. Растворение образца в воде; для лучшего растворения используют кипячение с добавлением соды (бикарбонат натрия).

2. Разделение осадка на фракции отмучиванием и промывание водой с использованием сит (диаметр ячеек 0,2мм).

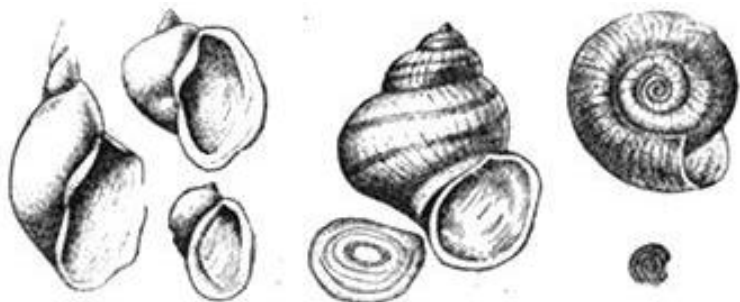
3. Высушивание образца в сушильном шкафу при температуре 60°C.

3. Для изучения крупных раковин моллюсков (*Gastropoda*, *Bivalvia*) требуется предварительное препарирование образца с очищением поверхности ископаемых организмов.

4. Ископаемые остатки отбираются из проб вручную под биноклем.

Моллюски (*Mollusca*) – один из самых богатых видами типов, представители которого благодаря своей известковой раковине хорошо сохранились в ископаемом состоянии. Среди нескольких его классов наиболее важными для палеогеографических реконструкций плейстоцена являются два: *Gastropoda* (брюхоногие) и *Pelecypoda* или *Bivalvia* (двустворчатые) (рисунок 1).

1. БРЮХОНОГИЕ

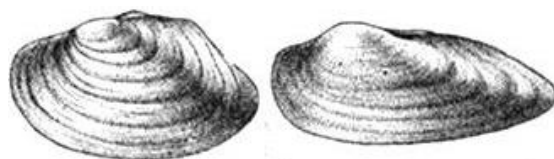


ПРУДОВИКИ:
обыкновенный,
ушастый, яйцевидный

ЛУЖАНКА
и её
крышечка

КАТУШКИ

2. ДВУСТВОРЧАТЫЕ ИЛИ ПЛАСТИНЧАТОЖАБЕРНЫЕ



БЕЗЗУБКА

ПЕРЛОВИЦА

Рисунок 1 – Классы типа Моллюски (Mollusca)

Условия среды обитания всех организмов делятся на две группы – абиотические факторы (физико-географические, физико-химические, воздействия со стороны не живой природы) и биотические факторы (воздействия со стороны других организмов). К абиотическим факторам морской (и озерной) среды относятся: тип осадка, рельеф дна, его обнаженность, соленость, глубина, газовый режим, температура, режим волнения [2].

Анализ малакофауны. В настоящее время известно несколько десятков тысяч видов моллюсков, населяющих различные водоемы и сушу. В ископаемом состоянии моллюски установлены с раннего палеозоя и включают около 50 тыс. вымерших видов. В плейстоценовых отложениях они присутствуют в разных количествах почти повсеместно. Особенно многочисленны они в осадках внетриконинентальных водоемов. Наземные моллюски многочисленны и в верхней части почв, почвенной подстилке и нижнем ярусе растительности. Присутствие раковин моллюсков установлено также в лёссах, лессовидных суглинках. [3, 4, 5].

Пресноводные моллюски обитают в разнообразных континентальных водоемах, что позволяет по их присутствию и составу устанавливать характер древних вод – стоячих (застойных) и проточных, холодных и теплых, мелких и глубоких, особенности грунтов и содержание солей.

Наземная малакофауна, заселяющая разнообразные ландшафты от лесов и лугов до пустынь и горных вершин, представлена классом брюхоногих (гастроподы) моллюсков. Их анализ помогает реконструировать этапы континентального развития территории и существования определенных биотопов, приземную температуру и влажность, характер грунтов и рельефа местности. [2,4, 5].

Наземная малакофауна, заселявшая сушу от лесов и лугов до пустынь и горных вершин, представлена классом *Gastropoda* (брюхоногие). Большая ее часть относится к подклассу легочных моллюсков (*Pulmonata*). Их отличительной чертой является приспособление к наземному существованию: легочный тип дыхания, развитие органов обоняния. [2,4,5].

Актуальность возможности применения малакофаунистического анализа при реконструкциях палеогеографических условий голоцена связана с широким распространением малакофауны и хорошей сохранностью раковин в разногенетических отложениях. Благодаря тесной зависимости условий обитания моллюсков и окружающей среды можно оценить условия увлажнения и осадконакопления, температурный режим, характер развития растительного покрова, восстановить древние ландшафты и их динамику во времени.

На кафедре геологии, геодезии и безопасности жизнедеятельности в геологическом музее, в палеонтологической экспозиции собраны образцы моллюсков. В перспективе, на основе этой коллекции в музее возможно проводить тематические экскурсии. Палеонтологическая коллекция дает значи-

тельную картину истории геологического прошлого, возможность изучать геологические условия обитания живых организмов прошлого.

Библиографический список

1. Геккер Р.Ф. Введение в палеоэкологию. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 126 с.

2. Методы палеогеографических реконструкций: Методическое пособие / Коллектив авторов: Блюм Н.С., Болиховская Н.С., Большаков В.А., Глушанкова Н.И., Каплин П.А., Клювиткина Т.С., Маркова А.К., Николаев С.Д., Новичкова Е.А., Полякова Е.И., Поротов А.В., Свиточ А.А., Судакова Н.Г., Талденкова Е.Е., Фаустов С.С., Янина Т.А. / Под редакцией П.А. Каплина, Т.А. Яниной. – М.: Географический факультет МГУ, 2010 –430с.

3. Общая палеоэкология: Учебное пособие /Под ред. Г.Н. Киселева, А.В. Попова. — СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2000. 132 с.

4. Старобогатов Я.И. Фауна моллюсков и зоогеографическое районирование континентальных водоемов Л.: Изд-во «Наука», Ленингр. отд., 1970. – 372 с.

5. Стеклов А.А., Чепалыга А.Л. Основные этапы развития континентальных моллюсков антропогена СССР //Основные проблемы антропогена Евразии. М.: Наука, 1969. С. 71-81.

УДК 666.76

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ УЧАСТКА ПЕРЕРАБОТКИ ЛОМА ОТРАБОТАННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ФУТЕРОВОК

Рожкова О.А., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проведена оценка технологических операций переработки лома огнеупорных футеровок, необходимая для проектирования производственного участка. Показана роль огнеупорных отходов в структуре энерго- и ресурсосбережения металлургических предприятий. Представлены сведения о технологиях дробления и измельчения. Приведено описание продукции на основе дисперсных порошков, полученных из лома отработанных огнеупорных футеровок. Представлены результаты исследования параметров сырьевой смеси для производства огнеупорной продукции.

Ключевые слова: лом огнеупорной футеровки, металлургическое производство, неформованные и формованные огнеупорные материалы, способы дробления и измельчения лома огнеупорных футеровок, гранулометрический состав.

Высокая стоимость и дефицит некоторых видов огнеупорных изделий и материалов ориентирует производство огнеупоров на частичную замену минерального сырья техногенными вторичными ресурсами. Переработка вторичного сырья позволяет организовать природоохранную деятельность предприятий, снизить затраты на дорогостоящее производство огнеупоров за счет использования недорогого вторичного сырья, обеспечить экономию природных ресурсов, энергии и снизить загрязнение окружающей среды [1, 2]. В технике инженерной защиты окружающей среды от негативного воздействия отходов существуют несколько путей рециклинга лома отработанной огнеупорной футеровки (ООФ): непосредственное использование в тепловых агрегатах с меньшей тепловой нагрузкой или применение их в качестве вспомогательного сырья для изготовления востребованных видов формованной или неформованной огнеупорной продукции. Аналогичные тенденции развиваются в технике окускования металлургического сырья [3]. Относительно новым направлением в технике утилизации лома ООФ является использование переработанного сырья, как правило, тонкодисперсного, для производства материалов сопутствующего назначения: огнезащитных мастик и покрытий, дисперсных наполнителей, дисперснонаполненных химпродуктов, связок и клеящих веществ, абразивных материалов, изделий строительного назначения и др. Для проектирования участка по переработке лома огнеупорных футеровок необходимо выполнить проектные работы, одной из составляющих которых является функциональное описание технологических операций. Описание основных технологических операций переработки лома огнеупорных футеровок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Описание основных технологических операций переработки лома огнеупорных футеровок

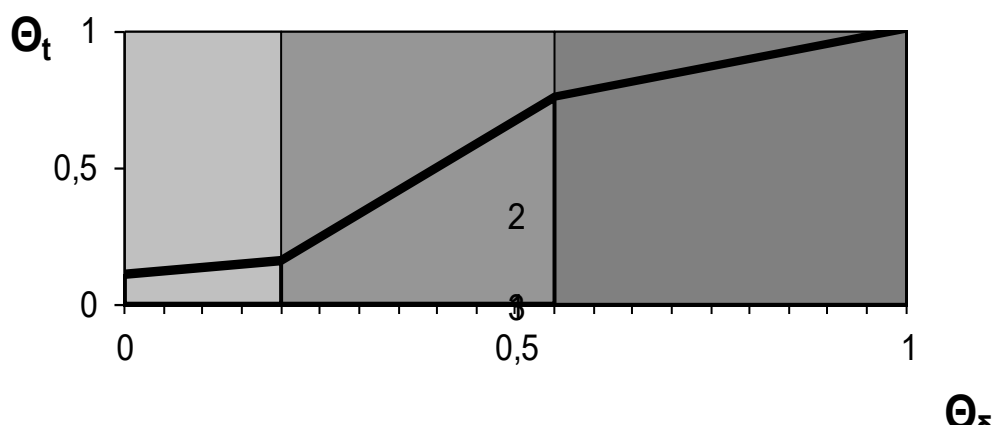
№	Технологическая операция	Технологическое оборудование	Технологические особенности
1	Разборка отработанной огнеупорной футеровки	Гидро- и пневмотехника с частичным использованием ручного труда	Проводится в действующем цехе
2	Первичное складирование лома ООФ	Транспортерная лента или автотранспорт	Закрытый холодный склад
3	Сортировка лома ООФ	Полумеханизированная	Там же
4	Дробление крупной фракции лома ООФ	Щековая дробилка	Проводится на участке дробления
5	Магнитная сепарация и классификация лома ООФ	Мобильный электромагнит	Там же
6	Дозирование компонентов смеси на ос-	Бункерные дозаторы	Проводится на участке прессования

	нове измельченной фракции лома ООФ		
--	---------------------------------------	--	--

Продолжение таблицы 1

№	Технологическая операция	Технологическое оборудование	Технологические особенности
7	Смешивание и увлажнение массы	Барабанный смеситель	Там же
8	Формообразование прессованием или торкретированием с применением физических полей	Гидравлический пресс с приложением виброполю или электронагрева	Там же
9	Термообработка сырых изделий	Камерные сушила и печи	Там же
10	Сортировка и складирование изделий	Холодный склад	Там же
11	Контроль качества	Визуальный и инструментальный контроль	Там же

Разборка отработанной огнеупорной футеровки с использованием гидро- и пневмотехники с частичным применением ручного труда является одной из трудоемких операций. На этом участке формируются негативные производственные факторы, связанные с повышенной запыленностью и загазованностью, температурой и вибрационными полями. Здесь повышенные шумовые нагрузки. По этим причинам на этом участке должны быть широко использоваться возможности механизации и автоматизации за счет привлечения роботов и манипуляторов. Это направление одно из перспективных в современной технике. Разборка многослойных огнеупорных футеровок промышленных нагревательных печей (рисунок 1) имеет свои особенности, обусловленные температурными полями, действующими в процессе эксплуатации.



Слой: 1- теплоизолирующий; 2 - промежуточный огнеупорный;
3 - основной огнеупорный

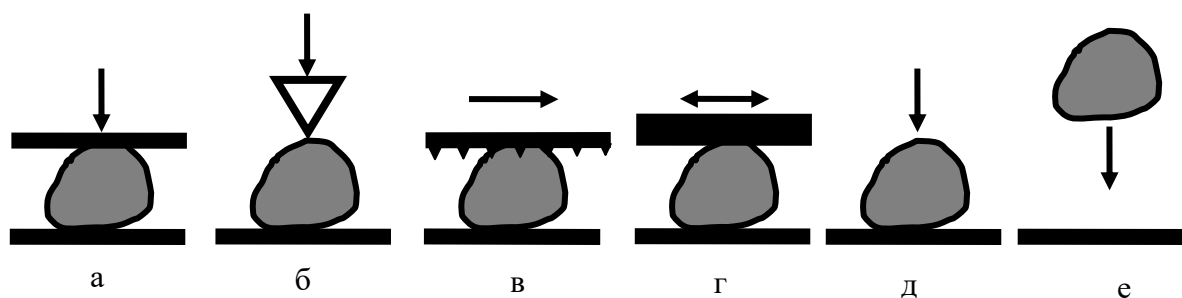
Рисунок 1 - Распределение температур в многослойной огнеупорной футеровке промышленных печей

Основной огнеупорный слой в процессе эксплуатации испытывает наиболее интенсивные тепловые нагрузки (температуру, тепловые потоки, термические напряжения) и механические воздействия (статическое и динамическое давление, абразивный износ). Поэтому этот слой в наибольшей степени подвержен высокотемпературному крипу, трещино- и структурообразованию. Его следует разбирать по особой методике и сортировать изделия отдельно от материалов других слоев футеровки. Промежуточный огнеупорный слой материалов подвергается существенно меньшим тепловым нагрузкам (0,4–0,5 от максимальных), а механические воздействия - динамическое давление и абразивный износ этого слоя отсутствуют полностью. Огнеупоры этого слоя в процессе эксплуатации сохраняются в максимальной степени. Поэтому разборка этого слоя предполагает повторное использование изделий в ремонтных и восстановительных процедурах действующих промышленных печей. Теплоизолирующий слой футеровки практически не испытывает тепловых нагрузок, но последствия производственной эксплуатации могут проявляться в уплотнении или деформации блоков из волокнистых материалов, либо в загрязнении сыпучих теплоизоляционных материалов промышленной пылью. Здесь важен визуальный контроль и регламентированное складирование.

Складирование лома разрушенной ООФ вызывает необходимость нахождения производственных площадей или прицеховых территорий для сооружения участка для переработки лома. Эта сложная задача требует близкого расположения водо- и электроснабжения, транспортных коммуникаций и других условий. На участке должен быть сооружен холодный склад с бункерным хозяйством для складирования материалов после сортировки. Сортировка предполагает высокую степень механизации, включая использование передвижных ленточных конвейеров, автоманипуляторов и погрузчиков, кранового хозяйства. Дробильное и помольное оборудование должно быть размещено в технологической доступности к складу материалов, подвергаемых дроблению. Основой для получения продукции широкого назначения является технология получения порошковой или зерновой сыпучей массы. Для получения измельченной массы используется техника и технология дробления и измельчения [4].

Дроблением и измельчением называются процессы уменьшения размеров кусков или крупных агрегатов полезных ископаемых или техногенного вторичного сырья в мелкодисперсное состояние путем разрушения под действием внешних сил. В технике применяют процессы дробления и измельчения, осуществляемые механическими силами, самоизмельчения и другие. Реже применяют электрогидравлическое дробление ударными направленными волнами; взрывное дробление или измельчение, основанное на диспергации пород и отходов под действием внутренних сил; вибрационное измельчение, генерируемое вибрационными силами; центробежное измельчение, действующее в центробежном поле; струйное измельчение за счет кинетической энергии движущихся с высокой скоростью навстречу

друг другу потоков высокоабразивных частиц и др. Основные схемы дробления и измельчения лома ООФ показаны на рисунке 2.



а – раздавливание: б – раскалывание: в – разламывание; г – истирание;
д, е – стесненный и свободный удар

Рисунок 3 – Основные способы дробления и измельчения лома ООФ

Наиболее широко используется обычное механическое дробление, измельчение и самоизмельчение. Принципы самоизмельчения также реализованы в технике напыления при производстве металлургического сырья [5–9].

Производственники считают, что при дроблении получают продукты крупнее, а при измельчении мельче 5 мм. Целью дробления и измельчения является отделение (разъединение) полезных компонентов от пустой породы минералов в результате разрушения минеральных сростков. Если получаемый продукт не подвергается переработке, а является товарным, то он подлежит непосредственному использованию (угли перед их коксованием; известняки и доломиты, используемые в качестве сырья и др.). Это также относится к лому отработанных футеровок. Крупность дробленых или измельченных продуктов определяется предъявляемыми к ним техническими условиями и стандартами (ТУ и ГОСТ). Степень измельчения оценивают по процентному содержанию определенного класса крупности (+0,100 мм; – 0,074 мм или – 0,044 мм) в измельченном минерале. Измельчение считают грубым, если содержание класса – 0,074 мм в измельченном продукте составляет 20 – 40 %, и тонким, если его содержание превышает 75.

В работе современных дробилок и мельниц используются способы раздавливания, раскалывания и удара, а также сочетание этих способов с разламыванием и истиранием. При разрушении подводимая энергия расходуется на деформацию кусков и рассеивается в окружающее пространство в виде тепла. Другая часть энергии дробилки расходуется на образование новой, включая удельную, поверхности порошков, превращаясь в свободную энергию тела. Границы контакта минералов в сростках из-за различия их кристаллических решеток являются именно теми дефектными зонами, которые формируют зародышевые микротрещины и обеспечивают избирательное раскрытие минералов.

Перспективным является использованием пульсирующих нагрузок (например, сжатием материала в рабочей зоне аппарата по синусоиде; пуль-

сирующим изменением давления газовой среды; многоступенчатыми ударами кусков друг о друга или о преграду и т. д.); воздействием колебаниями различной частоты или энергией ударных волн, вызывающих структурные напряжения на границах зерен минералов; термосиловой обработкой материала, усиленной механодинамикой, минералы которого резко отличаются термическими коэффициентами объемного или линейного расширения или анизотропией теплофизических характеристик; силовой нагрузкой электрическими, магнитными или электромагнитными полями, если минеральные свойства зерен обладают различными электромагнитными свойствами. Мощность энергетического воздействия на каждый кусок должна обеспечивать образование микротрещин на границах зерен. Частота и скорость деформаций должны быть концентрированными, чтобы снизить потери энергии на деформацию материала, а трещина находилась под действием напряжений длительное время.

Некоторые области использования кусковых и измельченных частиц на основе лома огнеупорных футеровок приведены в таблице 2.

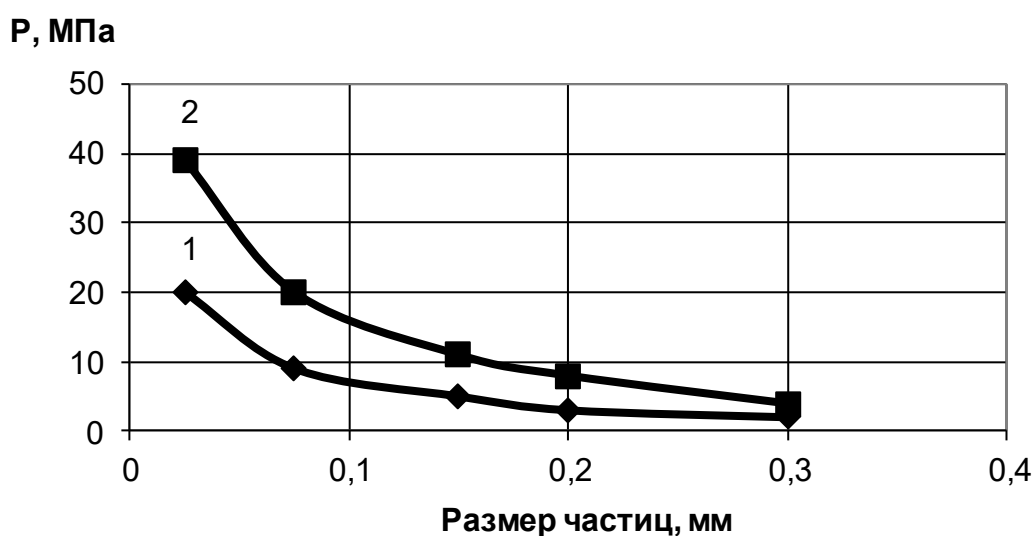
Таблица 2 – Области использования кусковых и измельченных частиц на основе лома огнеупорных футеровок

№	Размер кусков и частиц, мм	Область использования
1	60 – 300	Менее ответственные участки футеровки и тепловой изоляции низкотемпературных тепловых агрегатов
2	40 – 60	Наполнители огнеупорных бетонов и фундаментов низкотемпературных бытовых и промышленных агрегатов
3	8 – 25	Утеплители, засыпки, наполнители
4	1,0 – 8,0	Шебень, пескосмеси, наполнители, пневмоабразивы
4	0,1 – 1,0	Наполнители, мертели, торкрет-массы, наварочные смеси, обмазки, термопокрытия
5	0,05 – 0,1	Наполнители для абразивов, мастик, пластификаторов, термопокрытий и обмазок
6	менее 0,05	Связующие, термоклей, мастики, суспензии

Порошковые термопокрытия на основе жидкого стекла являются одними из самых распространенных в промышленности. Промышленное жидкое стекло является раствором неорганических полимеров, содержащих гидратированные мономер-катионы натрия и полимерные кремнекислородные анионы низкой степени полимеризации. Полярные группы обеспечивают высокую вязкость, а при затвердевании – образование полимерного соединения (гель кремниевой кислоты). Для ускорения твердения в состав жидкого стекла вводится ускоритель – кремнефтористый натрий. Введение ультра-

дисперсных частиц ОМ в связующем усиливает вяжущую способность ЖС. Для получения тонкой коллоидной фракции материал должен быть переизмельчен до субмикроскопического размера (3–5 мкм). Дополнительную активацию тонкодисперсных порошков можно обеспечить масляной суспензией. Аналогичный результат получен при производстве керамической вяжущей суспензии (КВС), разработанной в СибГИУ (авт. канд. дисс. А.А. Терре). В этой технологии керамосвязка была активирована сверхдлительным измельчением кремнеземистых и алюмосиликатных оксидных материалов при повышенной температуре процесса. Содержание твердого наполнителя в высококонцентрированной связке составляло 60–70 %. Дисперсным наполнителем были частицы субмикроскопического размера (3–5 мкм). Механотермическая активация связки была генерирована в лабораторных условиях при температуре 50–60 °С в щелочной среде (рН=9–10), при которой формируется поверхностно-активный коллоидный раствор. Близкий эффект достигнут у бентополимерной связки (БПС), разработанной специалистами НПО «ТОРЕКС» (г. Екатеринбург), предназначенной для производства окатышей [3, 4]. Механизм формирования свойств у окускованных материалов на основе бентополимерной связки предопределен действием коллоидных сил. Авторы связки утверждают, что в основе упрочнения частиц концентрата лежат особые физико-химические явления, осложненные электростатическим взаимодействием компонентов смеси для производства окатышей.

В работе представлены результаты лабораторных исследований прессования смеси на основе измельченного лома ООФ из шамотных изделий (рисунок 2). В качестве связки использовали водный раствор жидкого стекла (ВРЖС). Давление прессования составляло 50 МПа. Цилиндрические образцы имели размер 15 мм, пористость составляла 18–22 %. Прочность образцов на сжатие зависела от размеров частиц и количества связки (рисунок 3).



Содержание ВРЖС, %: 1 – 7; 2 – 15

Рисунок 3 – Зависимость прочности образцов на основе измельченного лома ООФ от размеров частиц

Результаты экспериментов показывают принципиальную возможность получения прочных сформованных изделий с регламентированной структурой на основе измельченного лома ООФ. Стандартная прочность огнеупоров этого минералогического класса изделий несколько выше показателей, полученных в лабораторных условиях, но в производственных условиях она достигается высокотемпературным обжигом. Для безобжиговых изделий прочность формовок можно повысить применением более эффективной упрочняющей связки. Опытные данные позволяют сформировать пакет производственных условий для получения формованных изделий из переработанного лома ООФ. Это могут быть преимущественно формованные огнеупорные изделия или торкрет покрытия для нагревательных и плавильных печей черной и цветной металлургии.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 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. 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.
6. 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.
7. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.
9. Павловец В.М. Сравнительная оценка термических напряжений в объеме железорудных окатышей, полученных с дифференцированным распределением пористости / В.М. Павловец, А.С. Герасимук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 8. – С. 536–542.
9. Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 83–87.

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОРКРЕТ ПОКРЫТИЙ

Рожкова О.А., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проведена оценка использования лома отработанных огнеупорных футеровок промышленных печей для получения сырьевой смеси в производстве огнеупорных торкрет-покрытий. Показана роль огнеупорных отходов в структуре ресурсозатратных промышленных металлургических технологий. Представлены результаты исследования процесса получения огнеупорных торкрет масс на основе лома отработанной шамотной футеровки.

Ключевые слова: лом огнеупорной футеровки, металлургические печи, промышленное производство, неформованные и формованные огнеупорные материалы, способы и технологии переработки лома огнеупорных изделий, торкрет покрытия.

Торкретирование огнезащитных футеровок теплотехнических агрегатов огнеупорными материалами представляет собой метод безопалубочного нанесения торкрет покрытий с помощью энергии сжатого газа [1]. Технология предусматривает струйное послойное нанесение торкрет массы воздушнодисперсной струей, сформированной давлением сжатого воздуха более 0,2–0,4 МПа. Основным достоинством технологии торкретирования является то, что она может применяться как для выполнения кладки новой печи, так и для ремонта уже эксплуатируемых агрегатов. Торкретирование позволяет успешно создавать и ремонтировать футеровки, имеющие сложную или изогнутую поверхность, дает возможность проведения ремонтных работ за короткое время в труднодоступных местах. Высокая механизация технологии снижает трудовые и экономические затраты при любых видах ремонтов. Сравнивая различные методики восстановления футеровок печей, можно отметить, что торкретирование позволяет быстро производить ремонтные работы, как на холодной, так и горячей поверхности теплового агрегата. Это характерно для большинства тепловых установок, работающих на всех стадиях металлургического передела. Технология полусухого торкретирования послужила прототипом для перспективной технологии получения качественного железосодержащего сырья в металлургии на основе техники напыления [2–5].

Основной целью технологии торкретирования тепловых установок керамическими массами с огнеупорными свойствами является продление срока службы плавильных агрегатов, промышленных печей и тепловых установок, как в целом, так и между текущими ремонтами. Использование данной технологии позволяет решить одновременно несколько задач: устранение дефектов и трещин путем их заполнения, что препятствует распространению

эрозий стен; формирование слоя с высокой степенью уплотнения, повышающей механическую устойчивость конструкции, снижающей водо- и газопроницаемость, тепловые потери.

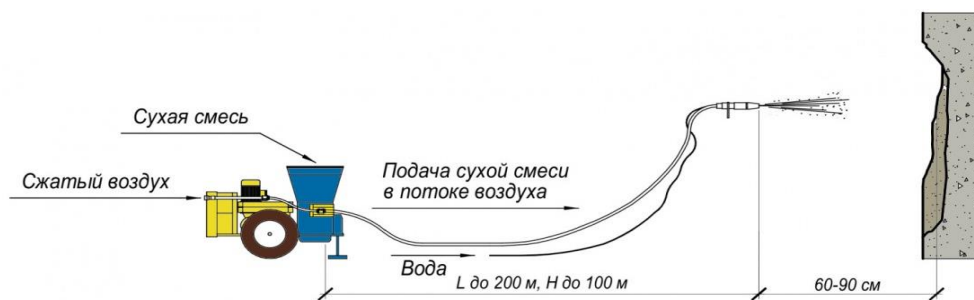
Одновременно с высокими механическими и теплофизическими свойствами торкрет-слоя, метод аэродинамического напыления дает возможность нанесения нескольких тонких слоев торкрет массы, что обеспечивает хорошее сцепление с поверхностью; позволяет напылять массу любой толщины и плотности. Можно проводить ремонт и восстановление горячих поверхностей без остановки производственного процесса. В технике торкретирования не нужна опалубка, в некоторых случаях – арматура. В напыленном покрытии отсутствуют соединительные швы.

В технике реализации различают два вида торкретирования, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Сухое торкретирование предусматривает смешивание сухой огнеупорной смеси с водой непосредственно в сопле подающего агрегата, а затем его нанесение на обрабатываемую поверхность со скоростью подачи до 150 м/сек и образование слоя, толщиной от 10 до 15 мм. Некоторые смеси определенного грансостава дают возможность формирования слоя до 60 мм. Данный способ отличается высокой производительностью, дает возможность работы с большого расстояния, торкретируемая поверхность не требует специальной подготовки. Недостатками метода является необходимость в высокой квалификации операторов торкретпушки и повышенные финансовые затраты из-за значительного расхода сухой огнеупорной смеси, обусловленного отскоком массы до 25 %.

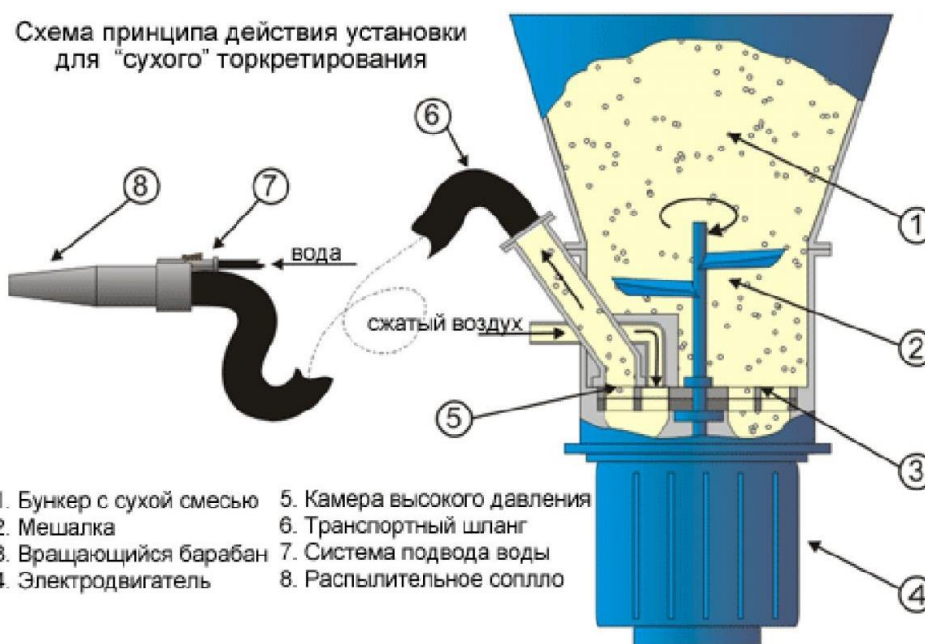
Смешивание напыляемого порошка с энергоносителем и увлажнителем осуществляется непосредственно в процессе торкретирования. По транспортному рукаву к соплу под давлением воздуха подается торкрет масса в сухом виде. По второму транспортному рукаву поступает вода или другой увлажнитель, соединяясь и образуя перед соплом пластическую массу. Скорость, с которой набрызгивается торкрет масса на ограждение - 130–170 м/сек. На первых секундах к поверхности прилипает тонкодисперсное цементное «молочко» и происходит отскок грубодисперсных или скоагулированных полусухих твердых частей. Затем прилипают мелкие частицы, в дальнейшем – слой полностью удерживается на формируемой футеровке, и толщина его растет. Основная проблема метода заключается в оптимальном балансе между количеством воды и смеси (соотношение примерно 1:4). Это достигается визуальным контролем с помощью стабилизации давления воды, подбором плотности смеси в сухом виде и регулируемым давлением сжатого воздуха от компрессора. При недостатке воды процесс гидратации массы может замедляться, а при избытке воды раствор становится жидким и стекает по ограждению или отскакивает от свода печи. Оператор установки для «сухого» напыления бетонной или огнеупорной смеси должен пройти обучение и стажировку с более опытным специалистом. Режимные параметры технологии, как правило, отрабатывают опытным путем.

Одним из рабочих достоинств «сухого» напыления является возможность применять любые виды расходных смесей в строительных и металлургических технологиях. Гидроизоляционные, морозостойкие добавки, поро- и структурообразующие компоненты, пластификаторы или регуляторы скорости гидратации позволяют получать смесь с заданными свойствами и выполнять работы в любых атмосферных условиях. Раствор под давлением заполняет трещины, выравнивает полости и другие дефекты формуемой поверхности, формируя повышенную прочность всей конструкции.

Схема сухого торкретирования представлена на рисунке 1.



а



б

а – схема торкретирования; б – конструктивное оформление

Рисунок 1 – Схема сухого торкретирования и его конструктивное оформление

Объекты, где эффективно применяется «сухое» торкретирование, представлены ниже: внутренняя или наружная гидроизоляция строящихся и ремонтируемых зданий на уровне цокольного или подвального этажа; ремонт и гидрозащитное покрытие мостов, эстакад и других железобетонных

строительных конструкций; отделка и устройство монолитных конструкций тоннелей, заделка щелей и стыков в бетонных конструкциях, бассейнах и пожарных резервуарах; ремонт заглубленных строений типа подземные парковки, ангары, крупные коллекторы; укрепление и профилирование откосов дорог, котлованов и т.п.

Мокрое торкретирование – наиболее предпочтительный вариант технологии, при котором на рабочую поверхность наносится уже готовый раствор, предварительно замешанный с водой и загруженный в подающий агрегат. Распределение торкрет массы в данном случае осуществляется с помощью пневматического оборудования. Используется готовый раствор, который с помощью насоса по шлангу подается к распылительному соплу. По дополнительному шлангу направляется сжатый воздух, который обеспечивает набрызгивание бетонной смеси на поверхность. Скорость подачи при данном способе значительно ниже. Толщина напыляемого слоя снижается до 30 мм. Основным достоинством этого метода является небольшой отскок массы, при котором торкретирование может проводиться в закрытых пространствах. При работе необходимо учитывать сложности при использовании короткого шланга, что снижает маневренность техники; необходимость безостановочной работы устройства во избежание схватывания массы в торкрет установке.

Методика торкретирования осуществляется с соблюдением определенных технологических процедур;

- подготовка поверхности напыления: механическое удаление поврежденного слоя с обрабатываемой поверхности, очистка стен от старого гарнисажа и объемных шлаковых наростов, расшивка и модифицирование поверхности трещин для увеличения сцепления. В этой стадии можно использовать пескоструйную или гидравлическую установку. Если присутствует только тонкий шлаковый слой, то его удаление необязательно;

- для металлоконструкций проводится устранение коррозии с металлических элементов при их наличии;

- установка маячков или уровнемеров для контроля толщины торкрет слоя;

- смачивание поверхности водой или вспомогательной жидкостью либо грунтование;

- Непрерывное нанесение торкрета круговыми или циклическими движениями, выдерживая угол подачи 90 градусов, как правило, в несколько слоев. Первый слой накладывают с дистанции напыления полтора метра, последующие слои с более близкого расстояния – до 80 см. Дистанция зависит от плотности раствора и скорости напыления. Выполнение данного этапа основано на визуализации процесса и распыление производится с расстояния от поверхности около 1,5 м и образованием слоев, толщиной от 10 до 60 мм;

- газовая сушка каждого нанесенного слоя массы от 20 мин до 2 часов (в зависимости от типа и влажности добавок);

- финишная затирка и выравнивание стен металлическими полутерками;

- увлажнение стен агрегата и ограждения в течение недели (при необходимости).

Для того, чтобы добиться высокой эффективности процесса торкретирования, восстанавливаемую область печи разделяют на секции или блоки, а работу по формообразованию продолжают только по влажному краю законченной полосы.

В зависимости от назначения напыляемого объекта (печи, топки, горны, сушила, горелочные камеры, дымовые трубы, тоннели, резервуары, фундаменты, перекрытия, трубные поверхности и др.) в составе торкретбетона используются специальные добавки, обеспечивающие огнеупорность, морозостойкость, износостойкость, гидроизоляционные и другие характеристики материала. Для техники торкретирования и торкрет сварки печей применяют, как правило, огнеупорные и теплозащитные материалы, предназначенные для использования на тепловых агрегатах специального назначения.

Торкрет смеси для всех технологий напыления и сварки делятся по виду напыляемого материала: на периклазовые (на основе периклаза и хромита) – используемые для торкретирования облицовки плавильных агрегатов в ЦМ, ограждений сталеплавильных агрегатов, ковшей в конвертерном производстве стали; глиноземистые и шамотные – для восстановления шахты доменной печи, ремонта футеровок ковшей, торкретирования электродуговых сталеплавильных печей; известковые с углеродными добавками или периклазовыми огнеупорами – для ремонта миксеров, ковшей и кислородного конвертера способом факельного торкретирования; кремнеземные – для ремонта и восстановления кладки и регенеративной насадки коксовой печи, в последнее время сваркой огнеупоров.

Все указанные материалы являются огнеупорами с очень высокой температурой плавления и огнеупорностью. Процедура торкретирования с использованием таких добавок позволяет создать огнезащитное покрытие повышенной прочности, годное к эксплуатации сразу после высыхания. Кроме этого, в процессе экзотермической реакции, возникающей во время работы печи, в составе напыленной массы синтезируются особые химические соединения. Часть из них переходит в легкоплавкую фазу, образующую клеящий слой, а другая – интегрируется в тугоплавкий материал, формирующий на поверхности торкрет слоя прочное огнеупорное защитное покрытие. Оборудование для торкретирования поставляется комплектно и включает: бункер смесителя; привод дозатора и перемешивателя; компрессор воздушный; шланги с заданным условным проходом; смеситель (сопло) и соединительную раму.

Перспективным направлением в металлургии является использование в качестве сырьевой основы или ее частичной замены для производства огнеупорной продукции отходов промышленности, имеющих огнеупорную основу, в том числе, и лом отработанной огнеупорной футеровки. Для получения огнеупорной суспензии используют мелкозернистые огнеупоры с размером частиц 0,05–0,063 мм. Для торкретирования, высокотемпературной сварки и формирования первого и второго слоев огнезащитного покрытия

применяют зернистые огнеупоры фракции 0,2–0,315 мм и частицы с размером 0,63 мм для последующих слоев. В качестве основного грубодисперсного наполнителя, играющего роль простейшего порообразователя, применяют огнеупоры более крупных фракций – размером зерен 1–3 мм. В технологии торкретирования ими можно легко заменить часть основного огнеупорного наполнителя. При полусухом торкретировании влажность массы обычно составляет 8–15, а при мокром – 20–30 %, и контролируется визуально. Для торкретирования футеровки сталеразливочных ковшей, применяемых при разливке рядовых марок стали, используют шамотные или кварцевые торкрет-массы с добавкой 5–15 % огнеупорной глины. Связкой служит водный раствор жидкого стекла. Торкрет-массы на основе дробленого кварцита характеризуются более низкими свойствами по сравнению с шамотными торкрет-массами. Для торкретирования 250-т сталеразливочного ковша или вакуум агрегата используют шамотноглинистый торкрет-порошок марки ПГШТ-2 по ТУ 14-8-265-78 с массовой долей Al_2O_3 более 37 % фракции 0–2 мм, в том числе частицы менее 0,09 мм в количестве 20–30 %.

Опытами установили (рисунок 2), что добавки шамотной крошки с размером частиц менее 0,1 мм, полученной дроблением лома ОФФ на лабораторной щековой дробилке, формируют стабильные геометрические (диаметр, толщину) и физические (прочность, плотность, пористость) характеристики торкрет-слоя.

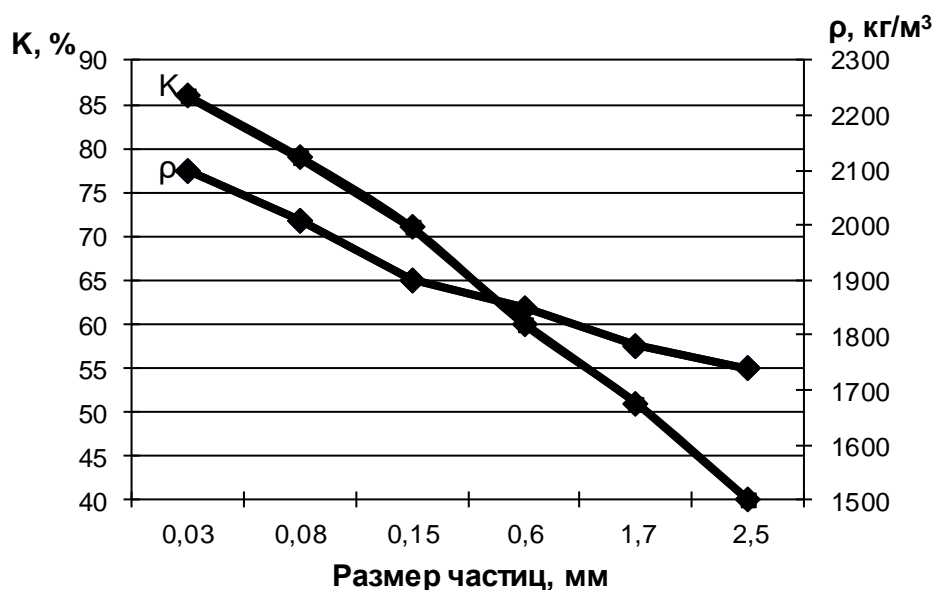


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента напыления торкрет-массы и плотности торкрет-слоя от размера частиц шамотной крошки, содержащейся в огнеупорной смеси

Все добавки шамотной крошки этой фракции в любом соотношении компонентов существенно увеличивают коэффициент напыления массы – К, % на поверхность изделия до 86 %. Повышением влажности напыляемой массы W, %, до 10 % можно повысить К до 90 %. Показатели прочности об-

разцов не изменяются и практически остаются на прежнем уровне. В процессе механического дробления лома ООФ образуются частицы с обновленной и модифицированной поверхностью, у которых сохранились первородные структурные свойства и практически не изменился химический и минеральный состав. Они легко взаимодействуют с вязущим материалом, например с жидким стеклом, проявляя высокие клеящие адгезионные свойства. В основе упрочнения торкрет-слоя лежат силы физико-химического взаимодействия, коагуляционного агрегирования, механического зацепления и слабые невалентные силы типа Ван-дер-Ваальса. Технология торкретирования позволяет регулировать в широких пределах прочностные и структурные свойства напыленного слоя и огнезащитного покрытия. Прочность механического сцепления после затвердевания массы может превышать 15-20 МПа. Степень напыления материала по уровню отскока массы зависит от дисперсного состава массы и достигает значения 90 %. Кажущаяся плотность торкрет-слоя может регулироваться и изменяться от 2,3 до 3,5 г/см³. Открытая пористость напыленного покрытия не превышает 7,2–9,8 %, но при необходимости ее можно повысить. Шлакоустойчивость огнеупорного торкрет-слоя зависит в первую очередь от химического состава массы и, во вторую, от уровня открытой пористости покрытия. Если химические составы массы и расплавленного металлургического шлака имеют близкие значения, то можно прогнозировать повышенную шлакоустойчивость напыленного покрытия на границе раздела фаз и поверхности ОФ. Особо высокую шлакоустойчивость имеют углеродсодержащие огнеупоры, обладающие пониженной пористостью и слабой адгезией к шлаковому расплаву. К теплозащитной футеровке теплоэнергетических устройств типа парогенераторов технологические требования менее жесткие, поэтому применение торкрет технологий здесь наиболее оправдано [6–8].

На лабораторной базе кафедры теплоэнергетики и экологии СибГИУ (г. Новокузнецк) разработаны технологии использования тонкоизмельченного лома различных типов огнеупоров в футеровках печей в качестве дисперсного наполнителя для востребованных марок неформованных огнеупорных материалов. Технологии рециклинга огнеупорных порошков и смесей на основе ООФ можно использовать для получения разнообразных сыпучих продуктов: мертелей, заполнителей, уплотнительных смесей, теплоизоляционных засыпок, торкрет смесей, подварочных масс, абразивных порошков и изделий и огнезащитных покрытий в металлургической, машиностроительной и строительной промышленности.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – 334 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В.М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.

3. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В.М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.

4. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В.М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2019. – 386 с.

5. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.

6. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин [и др.]. – Москва: ИД «Бастет», 2010. – 624 с.

7. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.

8. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 15–20.

УДК 665.6

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНИКИ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Толстикова Ю.Ф., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проанализирована общая схема переработки отработанного минерального масла и получения готовой продукции на его основе для разных отраслей промышленности. Представлены результаты исследования процесса отстаивания ОММ в лабораторных условиях.

Ключевые слова: отработанное минеральное масло, технологии переработки, продукты переработки, процесс отстаивания.

Отработанные минеральные масла (ОММ) представляют собой ценную техногенную сырьевую базу для получения вторичных нефтепродуктов в нефтехимии и восстановленных горючесмазочных материалов, используемых на транспорте [1, 2]. В последнее время появились предложения об использовании ОММ в качестве эффективных технологических добавок в сырьевые материалы в различных промышленных технологиях [3–8]. Добавки на основе ОММ позволяют сформировать регламентированную структуру у сырьевых металлургических продуктов и выполнять функции жидких восстановителей в технике металлизации металлургического сырья. Его можно использовать в качестве топливных материалов и технологических добавок

целенаправленного действия в металлургии и теплоэнергетике. Самым востребованным способом утилизации ОММ является регенерация отработанных масел с целью максимального восстановления их первоначальных свойств и повторного использования. Важной задачей является производство новых востребованных видов нефтепродуктов, обладающих повышенной товарной ценностью, и решение экологических и ресурсосберегающих проблем в этой области техники.

Общая схема переработки ОММ с целью его полного восстановления и список основных технологических операций регенерации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Общая схема переработки ОММ и получения готовой продукции на его основе

№	Название технологической операции	Методы реализации технологической операции
1	Сбор и складирование ОММ	Загрузка ОММ в баки накопители и первичные отстойники
2	Первичная стадия очистки	Очистка ОММ физическими методами воздействия: отстаивание, фильтрация, сепарация
3	Полутонкая стадия очистки	Очистка ОММ физико-химическими методами воздействия: адсорбция, коагуляция, электромагнитные поля, термоциклирование, бародиффузионное воздействие, вакуумная дистилляция и каталитическое гидрирование, струйное и механическое распыление, контактная очистка отбеливающими глинами и адсорбентами, обработка пропаном и фенолом, насыщенными углеводородными растворителями и др.
4	Тонкая стадия очистки	Очистка ОММ химическими методами воздействия: кислотная, щелочная или комбинированная обработка
5	Производство вторичных продуктов на основе очищенного ММ	Горючесмазочные материалы, химпродукты, защитные покрытия, лаки, краски, технологические добавки в минеральное и энергетическое сырье
6	Предпродажная подготовка готовой продукции	Разливка, фасовка, упаковка, маркировка, складирование

Деление технологии очистки ОММ на три стадии в общем списке основных технологических операций является условным, поскольку в разных технологических схемах некоторые операции совмещены друг с другом, а в других способах некоторые операции, напротив, составляют дополнительную

стадию регенерации и технология очистки становится многоступенчатой.

Отстаивание ОММ является первым циклом регенерации и наиболее простым методом в технологии очистки, но имеет небольшую производительность из-за длительности процесса. Отделению подвергаются более массивные и относительно крупные механические или жидкостные включения, оседающие на дно отстойника под действием силы тяжести. В процессе оседания частицы испытывают выталкивающие силы и преодолевают сопротивление вязкой жидкости. Отстаивание начинается в процессе транспортировки и хранения, но основное осаждение взвеси происходит в аппаратах простой конструкции, называемых отстойниками. Повысить эффективность отстаивания можно подогревом ОММ до температуры 80–120 °С, термоциклированием (циклическим нагревом и охлаждением), перемешиванием, применением физических полей и некоторыми другими методами, активно разрабатываемыми в этой области техники. Технологические и производственные особенности этого метода делают его предпочтительным в качестве предварительного этапа очистки с целью снизить нагрузку на последующие аппараты тонкой очистки.

Фильтрация ОММ заключается в пропускании загрязненного масла через объем фильтрующего материала, пористая или сетчатая структура которого позволяет пропускать жидкое масло и задерживать на поверхности фильтра механические и жидкие включения более высокой плотности. Степень очистки ОММ зависит как от размеров отделяемых частиц, так и от величины пор или ячеек сетки. Для повышения степени очистки на этой стадии оправдано применение различных физических и энергетических полей. В качестве фильтрующего материала могут использоваться металлические или пластмассовые сетки, керамика, ткани, бумага, мембраны и более сложные композитные материалы, разрабатываемые производителями [7]. Аппарат для осуществления фильтрации ОММ называется фильтром.

Сепарацией или механическим отделением называют процесс центрифугирования масла, который близок к отстаиванию, однако вместо относительного слабого поля сил притяжения земли используется поле центробежных сил, значения которых могут быть на несколько порядков выше, что существенно интенсифицирует процесс разделения. Конструктивно аппарат более сложен и может быть цилиндрическим, коническим, цилиндроконическим и содержать шламосборник и тракт гидротранспорта. Габаритные размеры аппарата определяются расчетным путем, для чего необходимо знать расход ОММ, среднюю скорость сепарации, концентрацию взвеси и температуру процесса. Конструктивная схема предполагает наличие насоса и электропривода.

Физико-химические методы очистки ОММ существенно отличаются от механических способов и подразделяются на: адсорбцию, коагуляцию, термовакуумную и электромагнитную обработку, селективное растворение и другие методы физико-химического воздействия. Адсорбционная очистка масла заключается в его пропускании через слой адсорбента – высокопористого вещества, пронизанная структура которого позволяет задерживать в себе ряд растворенных примесей. Эффективность адсорбционной очистки сильно

зависит от соотношения размеров пор и свойств задерживаемых частиц. Высокая степень очистки ОММ этими методами сопровождается дороговизной производства адсорбирующих материалов, которые в ходе эксплуатации требуют периодической регенерации, а в самом неблагоприятном случае являются одноразовыми и также требуют утилизации. Природные адсорбенты обходятся дешевле, но их эффективность заметно уступает искусственным материалам. и они также требуют обслуживания. Аппараты для проведения адсорбции называются адсорберами.

Коагуляция в большей степени направлена на усиление эффективности ряда физико-химических методов, так как в его основе лежит принцип слипания и укрупнения (коагуляции) коллоидных частиц загрязнителей масла, трудно отделимых фильтрацией и отстаиванием, которые после укрупнения могут быть отделены вышеназванными физическими методами. Для осуществления коагуляции применяют коагулянты и используют ряд физических полей или воздействий (электрический ток, перемешивание, интенсивный нагрев или охлаждение и т.д.). Метод имеет высокую работоспособность, однако при наличии в масле присадок, что случается довольно часто, его применение неэффективно, так как в большинстве случаев вместе с загрязнителями в селективные растворители переходят и присадки, из-за чего масло теряет свои потребительские качества. В некоторых научных публикациях показано, что наибольший эффект очистки ОММ наблюдается при использовании в качестве основного коагулянта моноэтаноламина. В ряде перспективных работ, посвященных коагуляции взвесей, основное внимание уделяют поиску эффективных коагулянтов и определению их оптимального содержания в смеси с ОММ.

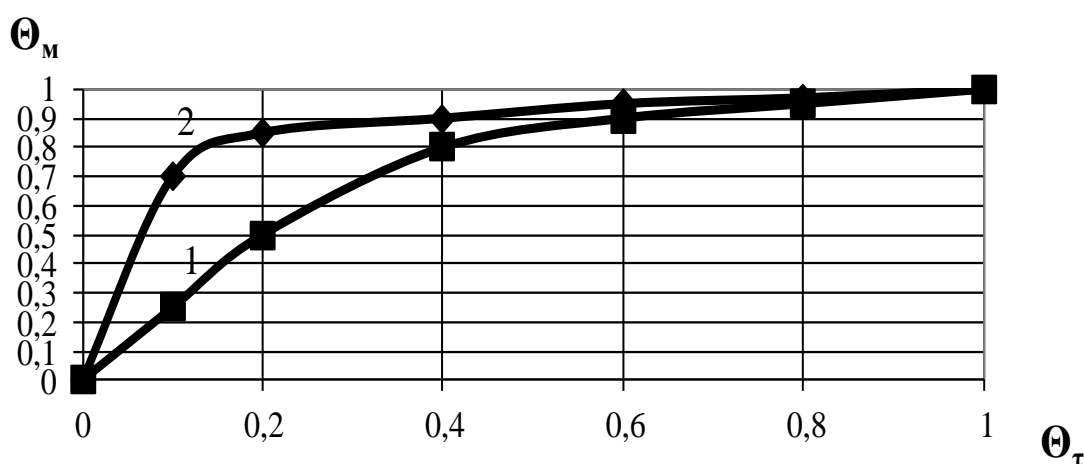
Бародиффузионной обработкой и термоциклированием из ОММ удаляется большая часть воды и растворенных газов. В основе метода лежит различие температур кипения воды и минерального масла. Разность температур дополнительно увеличивается приложением низкого давления к камере, в которой происходит испарение воды. При этом масло распыляют механическим способом, чтобы многократно увеличить площадь испарения, чем обеспечивается более полное и быстрое протекание процесса очистки масла. Необходимые для проведения процесса аппараты имеют относительно простую конструкцию и достаточно просты в эксплуатации, однако необходимо контролировать уровень их герметизации и исключать попадание атмосферного воздуха в производственный процесс. Описанные принципы термоциклирования позволяют прогнозировать успешное применение ОММ в металлургических технологиях, основанных на технике напыления [8, 9].

Химические методы очистки включают кислотную и щелочную обработку. При кислотной обработке ОММ в большинстве случаев применяется серная кислота. Эта кислота широко используется в технологии очистки, и ее применение на практике подтвердило свою эффективность. Кислотную обработку применяют для удаления асфальто-смолистых веществ, ненасыщенных углеводородов и других соединений, выпадающий в осадок при хи-

мическом взаимодействии с серной кислотой. Такой осадок, сравнительно легко отделяемый от масла, называют кислым гудроном. В качестве завершающей стадии очистки ОММ используют щелочную обработку для нейтрализации остатков кислого гудрона и непрореагировавшей кислоты. Щелочную обработку используют при сильной изношенности и загрязненности масла, когда требуется выделить и очистить масло от различных органических кислот и эфиров. При этом образуются химические соединения, легко растворяющиеся в воде, что предполагает эффективную последующую промывку. Щелочная обработка может выступать на завершающей стадии кислотной обработки, но также может выступать и в роли самостоятельного этапа очистки масла. Известны технические решения на основе изобретений, в которых в качестве химического реагента применяют водный раствор жидкого стекла и доказывается высокая эффективность его применения.

В работе приведены результаты исследований процесса отстаивания ОММ в лабораторных условиях (рисунок 1). При реализации процесса первичной очистки было использовано отработанное моторное масло дизельного ДВС с физическими характеристиками, приведенными ниже: температура вспышки в открытом тигле – 186 °С, вязкость кинематическая при 100 °С – 6,1 сСт, кислотное число – 2,49 мг КОН/г, щелочное число – 0,5 мг КОН/г, содержание свободной воды – 0,00430 %, содержание механических примесей – 2,51 %, плотность при 20 °С – 871,3 г/см³. Цвет нефтепродуктов темных – более 8,0 ед. ЦНТ, зольность масла с присадками – 0,5695 %. Основа масла – смесь изопарафиновых, нафтеновых, ароматических и нафтеноароматических углеводородов с молекулярной массой 300 – 600 кг/кмоль.

Результаты экспериментов представлены в безразмерном виде в виде зависимости относительной массы осадка Θ_m от безразмерного времени отстаивания Θ_t отработанного масла (рисунок 1).



Температура ОММ, °С: 1 – 25; 2 – 50

Рисунок 1 – Зависимость относительной массы осадка, полученного отстаиванием, от безразмерного времени отстаивания ОММ

Относительную массу осадка из ОММ Θ_M вычисляли по выражению:

$$\Theta_M = M / M_0,$$

где M – текущее значение массы осадка, кг;

M_0 – конечное значение массы осадка, кг.

Безразмерное время отстаивания ОММ Θ_τ вычисляли по формуле:

$$\Theta_\tau = \tau / \tau_0,$$

где τ – текущее значение времени отстаивания, час;

τ_0 – общее время отстаивания, час;

Результаты исследований показывают, что процесс отстаивания ОММ условно можно разделить на три стадии, отличающиеся разными скоростями осаждения взвеси. Первая стадия осаждения твердых частиц характеризуется максимальной скоростью нарастания массы осадка, при которой в осадок переходят наиболее крупные частицы и крупные суспензии. На второй стадии скорость процесса уменьшается из-за снижения концентрации твердой взвеси и ее крупности. Конечная стадия процесса условно ограничена 24 часами, хотя процесс продолжал развиваться, но с существенно меньшей скоростью. Установлено, что скорость осаждения взвеси можно существенно повысить (ориентировочно в 1,25–1,5 раза), увеличивая температуру ОММ до 50 °С. Эта закономерность реализована в промышленных технологиях, которые позволяют увеличить удельную производительность отстойников за счет снижения вязкости ОММ и повышения его температуры. Верхняя допустимая граница температуры масла составляет 140 °С и обусловлена температурой вспышки ОММ, составляющей 160 – 180 °С. На основе экспериментов можно подготовить рекомендации по совершенствованию первой стадии технологии очистки ОММ и конструкции отстойников.

Выводы. Проанализирована общая схема переработки ОММ и реализация технологических операций. Представлены результаты исследования процесса отстаивания ОММ в лабораторных условиях, позволяющие подготовить рекомендации по совершенствованию технологии очистки ОММ и конструкции отстойников.

Библиографический список

1. Евдокимов А.Ю. Комплексная схема переработки отработанных масел и смазок / А.Ю. Евдокимов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия – 1990. – № 1. – С. 28–31.
2. Школьников В. М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости / В. М. Школьников. – Москва : Химия, 1989. – С. 122–124.
3. 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.
4. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020;

Опубл. 28.06.2021. Бюл. №5 //Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.

5. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.

6. Павловец В. М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии. – Новокузнецк: СибГИУ, 2019. – 386 с.

7. Гриценко В. О. Применение микрофльтрации для регенерации отработанных моторных масел / В.О. Гриценко, Н.С. Орлов // Российский химико-технологический университет, ВИНТИ. Серия. Критические технологии. Мембраны. – 2002. – № 16. – 2002. – С.10–16.

8. Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2.– С. 83–87.

9. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.

УДК 665.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ВЯЗКОСТИ И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МАСС НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА

Толстикова Ю.Ф., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проанализированы существующие и перспективные методы переработки отработанного минерального масла в промышленности. Рассмотрен технологический процесс глубокой очистки отработанного минерального масла на основе физико-химических методов активации. Представлены результаты исследований по определению границ вязкости и затвердевания дисперсных масс на основе отработанного минерального масла.

Ключевые слова: отработанное минеральное масло, технологии переработки, глубокая очистка, вязкость и затвердевание брикетируемых дисперсных масс.

Отработанное минеральное масло (ОММ) является техногенным отходом, образующимся после длительной работы двигателей внутреннего сгорания на транспорте (автомобильном, железнодорожном, морском и др.), компрессорной, турбинной и гидравлической техники [1, 2]. Проблема переработки отработанного минерального масла обусловлена необходимостью ресурсосбережения в промышленности путем повторного использования ОММ в качестве сырья на транспорте и исключения загрязнения окружаю-

щей среды после его складирования и в процессе переработки.

Переработка ОММ в технологическом процессе начинается с удаления жидких загрязнителей и грубых твердых частиц, которые могут представлять опасность для окружающей среды или приводить к проблемам при накоплении осадка в отстойниках. Основной примесью в ОММ является вода, которая в небольших количествах растворяется в масле. Оставшаяся нерастворенная часть воды, отделившаяся от масла из-за разницы в их плотности, находится в свободном состоянии. Она может попадать в производственное оборудование из окружающей среды вследствие конденсации атмосферной влаги и утечек из системы охлаждения двигателя. Содержание воды в ОММ может составлять от нескольких процентов до 30 %.

Вторыми по массе являются твердые загрязнители минерального масла. Среди них преобладают неорганические механические примеси (грязь – пыль, песок, продукты износа – частицы металлов и их оксидов, стружка, шламы, лаки, нагары), которые накапливаются в ОММ в процессе эксплуатации транспорта. Они попадают в масло из окружающей среды из-за негерметичности оборудования, либо образуются внутри двигателей, машин и механизмов. Дисперсная сажа накапливается при несвоевременной замене масла или при неполном сжигании жидкого топлива. Топливо также является загрязнителем масла в результате утечек. Это происходит при длительной работе двигателя в холостом режиме, перегрузках двигателя, нарушении распыления топлива, нестехиометрическом соотношении воздуха и топлива.

Кроме перечисленных загрязнителей встречаются посторонние примеси, попадаемые в ОММ по другим причинам. К ним относятся растворители для мойки оборудования, охлаждающие, промывочные и тормозные жидкости, которые попадают в двигатель из системы охлаждения через повреждения, из-за кавитации или коррозии, разрушающих гильзы цилиндра. Посторонние примеси, попадающие в ОММ из-за низкой культуры складирования и хранения, – это минеральные соли, кислоты, шламы, ПАВ, частицы металлов и оксидов и др. Отходы, по цвету визуально похожие на масла, обычно классифицируемые как более опасные, чем ОММ. К ним относятся отходы лакокрасочной промышленности, продукты переработки угля и угольной смолы, шламы резервуаров с нефтепродуктами – в первую очередь, с мазутом.

Отработанные минеральные масла представляют собой сырьевую базу для получения вторичных нефтепродуктов в нефтехимии, на транспорте и в других отраслях техники [1–4]. Технологические схемы очистки, как правило, многоступенчатые, и включают первичную или предварительную очистку сырья и более глубокую доочистку дистиллятных масляных фракций. Основные из этих процессов: отстаивание, фильтрация, центрифугирование, перегонка в роторно-плёночном испарителе (РПИ), отгон горючего топлива и воды, коагуляционная и экстракционная (селективная) очистка, сернокислотная очистка, адсорбционная очистка, гидродоочистка, ультрафильтрация. Типичная схема глубокой очистки ОММ приведена на рисунке 1.

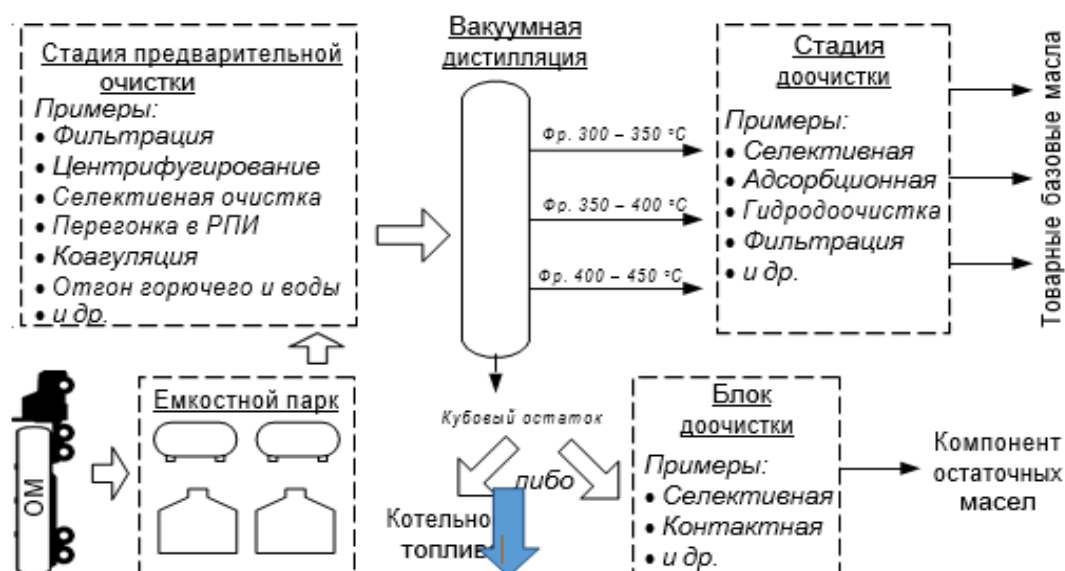


Рисунок 1 – Схема промышленной переработки ОММ

Для контроля ОММ при сборе и хранении в первую очередь применяют упрощённые методики анализа с помощью простых приборов. В последние годы ООО «ВНИИ НП» были разработаны государственные стандарты для испытания ОММ, утвержденные приказами Росстандарта. Перечень нормативных документов представлен ниже: ГОСТ 26378.3-2015 «Нефтепродукты отработанные. Метод определения условной вязкости», ГОСТ 33¹-2016 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчёт динамической вязкости», ГОСТ 26378.1-2015 «Нефтепродукты отработанные. Метод определения воды», ГОСТ 26378.2-2015 «Нефтепродукты отработанные. Метод определения механических примесей и загрязнений», ГОСТ 26378.4-2015 «Нефтепродукты отработанные. Метод определения температуры вспышки в открытом тигле», ГОСТ 33159-2014 «Масла смазочные отработанные. Определение содержания нерастворимых веществ», ГОСТ EN12766-1-2014 «Определение полихлорированных бифенилов (PCB) и родственных соединений», ГОСТ 2477³-2014 «Нефть и нефтепродукты. Определение содержания воды», ГОСТ 4333¹-2014 «Нефтепродукты. Определение температур вспышки и воспламенения в открытом тигле».

Переработка на нефтеперерабатывающем заводе заключается в том, что ОММ используется как добавка нефти в качестве сопутствующего сырья для производства бензина или чистого масла. В промышленном производстве разработано множество способов регенерации масла с получением смазок, наполнителей красок, покрытий, технологических и топливных брикетов и других востребованных продуктов (рисунок 2).

В последнее время появились предложения об использовании ОММ в качестве технологических добавок в промышленных технологиях. В СибГИУ ведутся подготовительные работы в этом направлении и экспериментально обосновано применение ОММ в качестве нетрадиционного жидкого

восстановителя и структурообразующего средства в производстве окискованного металлургического сырья [5–9]. Технология исследована в лабораторных условиях и показала высокую эффективность.



а – очищенное масло; б – смазки; в – краски; г – покрытия; д, е – брикеты

Рисунок 2 – Продукты переработки ОММ

В списке готовой продукции на основе ОММ условно можно выделить несколько групп товаров, для которых существуют определенные требования к границам вязкости и затвердевания масс, используемых для производства этих товаров. Эти требования обусловлены тем, что механическая смесь ОММ и дисперсного наполнителя в отсутствии упрочняющей связки представляет собой вязкую, нетвердеющую суспензию. Это характерно для первой группы товаров (в первую очередь, это нефтесмазки и собственно очищенное ОММ), для которых затвердевание не требуется вообще. Для затвердевания массы в другой группе товаров необходимо введение в ее состав упрочняющих связок, например, жидкого стекла, каменноугольного пека, сульфитдрожжевой бражки и др. К этой группе продуктов относятся технологические брикеты и прессовки различного потребительского назначения, у которых должна быть повышенная прочность, а в производстве - быстрая схватываемость (затвердевание) масс. У другой группы продуктов (лаки, краски, покрытия, теплозащитные смеси и др.) повышенная прочность не является определяющей, а схватываемость масс может быть ограничена некоторым регламентированным интервалом времени. Поэтому определение временных границ вязкости и затвердевания масс на основе ОММ представляет практический интерес в производстве востребованной продукции.

Лабораторные эксперименты проводили на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ. Результаты экспериментов по определению временных

границ вязкости и затвердевания масс на основе ОММ представлены в безразмерном виде в форме зависимости безразмерного времени затвердевания Θ_τ от массового соотношения жидкого стекла (ЖС) и ОММ Θ_M (рисунок 3). Массовое соотношение ЖС и ОММ вычисляли по выражению:

$$\Theta_M = M_{\text{ЖС}} / M_{\text{ОММ}},$$

где: $M_{\text{ЖС}}$ – масса жидкого стекла в смеси с железосодержащим концентратом и ОММ, кг;

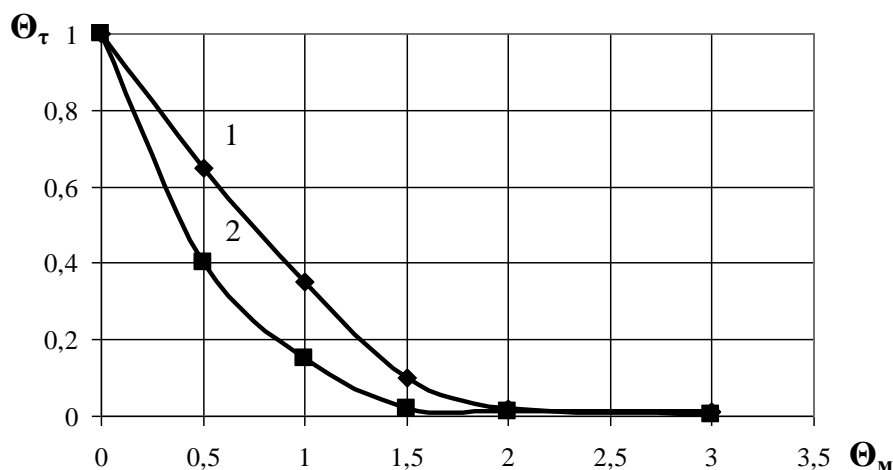
$M_{\text{ОММ}}$ – масса отработанного минерального масла в смеси с железосодержащим концентратом и ЖС, кг.

Безразмерное время затвердевания смеси Θ_τ вычисляли по формуле:

$$\Theta_\tau = \tau / \tau_0,$$

где: τ – длительность затвердевания массы, состоящей из железосодержащего концентрата, ОММ и ЖС, час;

τ_0 – предельная длительность затвердевания массы, час. В позиции 1 (рисунок 3) - $\tau_0 = 5$ час; в позиции 2 - $\tau_0 = 24$ час.



Содержание ОММ в дисперсной смеси с ЖС, %: 1 – 5; 2 – 10

Рисунок 3 – Зависимость безразмерного времени затвердевания от массового соотношения ЖС и ОММ

Результаты исследований показывают (рисунок 3), что процесс затвердевания смеси, включающей железосодержащий концентрат, ЖС и ОММ, условно можно разделить на три области, отличающиеся разными скоростями затвердевания массы и уровнем пластичности. Первая область затвердевания с минимальной скоростью затвердевания смеси находится в интервале Θ_M , равном 0 – 0,5. Вторая область затвердевания с промежуточной скоростью затвердевания находится в интервале Θ_M , равном 0,5–1,5. Третья (завершающая) область затвердевания с максимальной скоростью затвердевания находится в концентрационном интервале, при котором $\Theta_M = 1,5 – 3,0$. Основную роль в процессе затвердевания играет вязущий материал – жидкое стекло. Его главное назначение – связать твердожидкостную дисперсную

массу в прочный материал. В первой области затвердевания жидкого стекла относительно мало и свободное ОММ повышает вязкость массы. В этой области ЖС играет роль загустителя. Смесь густеет, не вызывая затвердения. Это область вязкого состояния, пригодная, например, для производства некоторых видов, не густеющих нефтесмазочных материалов. В промежуточной области значений Θ_m затвердевание масс идет с большей скоростью, при которой возможно производство, например, разного рода красок и покрытий, при котором длительность затвердевания не лимитируется. На заключительной стадии упрочнения масс, на которой $\Theta_m \geq 1,5$, ОММ полностью усваивается жидким стеклом с максимальной скоростью затвердевания. В этой области значений Θ_m возможно производство технологических брикетов и прессовок различного потребительского назначения.

Выводы. Результаты исследований показывают, что процесс затвердевания смеси, включающей железосодержащий концентрат, ЖС и ОММ, можно разделить на три области, отличающиеся разными скоростями затвердевания массы. Основную роль в процессе затвердевания играет жидкое стекло, выполняющее роль связки и загустителя. Различное соотношение ЖС и ОММ позволяет рекомендовать в указанных областях процесса затвердевания производство определенных видов продукции.

Библиографический список

1. Евдокимов А.Ю. Комплексная схема переработки отработанных масел и смазок / А.Ю. Евдокимов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия – 1990. – № 1. – С. 28–31.
2. Школьников В. М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости / В. М. Школьников. – Москва: Химия, 1989. – С. 122–124.
3. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло / В.М. Павловец, К.И. Домнин // Сборник трудов XXIII 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.
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. 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.
6. 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.
7. Патент № 2630789 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2016152375/02, Заявл. 28.12.2016; Оpubл. 13.09.2017. Бюл. №26 //Изобретения. Полезные модели. 2017. – №26

8. Павловец В.М. Исследование динамики прироста массы шихтовых агрегатов, используемых для производства железосодержащих брикетов / В.М. Павловец, К.И. Домнин // Сборник трудов X X III Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2022», Часть 2, 410 с., Новокузнецк, СибГИУ, 2022, с. 193–203.

9. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железосодержащих и структурообразующих материалов, подвергнутых избирательному смешиванию / В.М. Павловец, К.И. Домнин // Сборник трудов X X III Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2022», Часть 2, 410 с., Новокузнецк, СибГИУ, 2022, с. 203–211.

УДК 504.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОРОЖНОЙ ПЫЛИ г.ЧЕРЕПОВЦА

Хорошилов А.П., Пономарева И.В.

Череповецкий государственный университет, г.Череповец

Статья посвящается исследованию химического состава дорожной пыли в г. Череповце. Череповец является крупным индустриальным центром Северо-Запада. Проблемы загрязнения окружающей среды возникают не только из-за большой концентрации промышленных производств, но и из-за возрастающего количества автотранспорта и дорог. Для обоснования мероприятий в рамках федеральной программы «Чистый воздух» был сделан анализ химического состава дорожной пыли.

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, рейтинг городов-загрязнителей, заболеваемость населения, запыленность городского воздуха, причины образования дорожной пыли, химический состав пылей.

Череповец – промышленный центр Северо-Западного региона России. В нем расположено порядка 40 промышленных предприятий. Основными индустриальными гигантами являются ПАО Северсталь (полный цикл производства чугуна, стали, проката) и ОАО Апатит (производство неорганических кислот и комплексных удобрений).

Наличие такого сосредоточения промышленных предприятий обуславливает интенсивное загрязнение окружающей среды. Череповец неизменно входит в рейтинги самых загрязненных городов России. Он стал вторым городом-загрязнителем воздуха в России после Норильска, выбросив в атмосферу 270 тысяч тонн загрязняющих веществ в 2022 году. На третьем месте в рейтинге находится Новокузнецк - 263 тысяч тонн выбросов в 2022 году [1].

Стабильно высокая заболеваемость череповчан болезнями легких, аллергией, онкологическими заболеваниями сохраняется на протяжении мно-

гих лет. И, если химическое предприятие расположено на удаленном от Череповца расстоянии, т.к. оно было построено в 70-х годах, когда экологические требования уже учитывали размеры санитарно-защитной зоны, то металлургический комбинат находится непосредственно в селитебной зоне. 1000 м санитарно-защитной зоны (в которой находятся жилые кварталы с детскими садами, больницей и др. объектами городской инфраструктуры) не спасают жителей от вредных веществ и пыли, рассеивающихся от самых «грязных» производств металлургического передела – коксового, агломерационного и доменного. По данным статистики на каждого жителя г.Череповца приходится по 4 тонны пыли в год.

Однако не только промышленное производство вносит свой отрицательный вклад в загрязнение окружающей природной среды в Череповце.

В последнее десятилетие резко возросло количество автотранспорта в городе. В связи с этим транспортно-дорожный комплекс стал еще одним источником экологических проблем в городе – запыленность и загазованность в жилых кварталах, даже удаленных от промпредприятий, возросла.

Пылевые частицы на автомагистралях и на придорожных территориях образуются по 7 причинам: истирание дорожного покрытия, истирание автомобильных шин, выхлопные газы, износ деталей автомобиля, дорожные ремонтно-строительные работы, эрозия придорожных почв, а также посыпка зимой дорог соляно-песчаной смесью [2].

Весной, после схода снега, этот песок превращается в мелкодисперсную пыль, насыщенную тяжелыми металлами. В солнечные дни песок высыхает, поднимается в воздух и создает опасный уровень загрязнения в приземном слое воздуха.

В настоящее время в Череповце действует федеральная программа «Чистый воздух», в рамках которой реализуются мероприятия, направленные на улучшение атмосферного воздуха и снижение количества загрязняющих веществ в нем.

Одним из таких мероприятий могла бы стать замена соляно-песчаной смеси для посыпки дорог в зимнее время на гравийную смесь. У гравийных смесей отсутствует пылимость, ее можно собирать и повторно использовать следующей зимой.

Для обоснования данного решения Комитет окружающей среды мэрии г.Череповца обратился на кафедру химических технологий Череповецкого государственного университета с заданием определить химический состав дорожной пыли, взятой в 2-х мониторинговых точках.

Исследование химического состава отобранных проб мы проводили на рентгенофлуоресцентном спектрометре OPTIMIX полуколичественным методом. Мониторинговая точка №1 – зона Октябрьского моста (одно из самых загрязненных мест города), мониторинговая точка №2 – ул. Пионерская (селитебный район). Для сравнения мы взяли на анализ еще и соле-песчаную смесь, которой посыпают дороги зимой. Результаты химического анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты химического анализа образцов

Компонент	Соле-песчаная смесь	Мониторинговая точка №1	Мониторинговая точка №2
Si	15,29	26,38	29,67
Na	18,33	1,57	1,42
C	1,80	3,00	2,40
Cl	18,00	0,03	0,02
Ca	8,93	13,06	12,25
Al	2,76	5,26	4,36

Полученные результаты показывают, что основную долю пыли составляет кремний, соль из соле-песчаной смеси вымывается талыми водами. Наличие углерода говорит о его попадании при истирании шин. Кальций и алюминий попадают в дорожную пыль преимущественно из почвы.

Мы продолжим свое исследование, анализируя пробы дорожной пыли других мониторинговых точек. Вторым этапом нашего исследования станет анализ дорожной пыли, отобранной в августе-сентябре, когда весь песок после зимы будет убран. На основании данных исследований можно будет предложить дополнительные мероприятия для улучшения состояния окружающей среды в Череповце.

Библиографический список

1. Электронный ресурс: режим доступа: <https://www.gorodche.ru/society/4219-122-cherepovec-voshel-v-troyku-liderov-reytinga-gorodov-zagryazniteley/>
2. Timmers, V.R.J.H., Achten, P.A.J. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmos. Environ.* 134, 2016. pp. 10–17. URL: [doi.org/ 10.1016/j.atmosenv.2016.03.017](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017).

УДК 551.581.1

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КЛИМАТА

Федореев Д.А., Бабичева Н.Б.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк*

Разработка климатических моделей позволяет более точно смоделировать грядущие изменения климата и оценить влияние человека на климат. В статье описаны общие понятия климатических моделей, их важность и значимость, а так же описаны некоторые разрабатываемые в мире климатические модели.

Ключевые слова: теоретическая климатология, климатические модели, климатические зоны.

Введение

Климатические модели, также известные как модели общей циркуляции или МОЦ, используют математические уравнения для характеристики того, как энергия и материя взаимодействуют в различных частях океана, атмосферы, суши. Построение и запуск климатической модели — это сложный процесс выявления и количественной оценки процессов в системе Земли, представления их математическими уравнениями, установки переменных для представления начальных условий и последующих изменений воздействия на климат, а также многократного решения уравнений с использованием мощных суперкомпьютеров.

Климатические модели разделяют поверхность Земли на трехмерную сетку ячеек. Результаты процессов, смоделированных в каждой ячейке, передаются в соседние ячейки для моделирования обмена веществом и энергией во времени. Размер ячейки сетки определяет разрешение модели: чем меньше размер ячеек сетки, тем выше уровень детализации модели. Более подробные модели имеют больше ячеек сетки, поэтому им требуется больше вычислительной мощности.

Климатические модели также включают переменную времени, называемую временным шагом. Шаги по времени могут быть в минутах, часах, днях или годах. Как и в случае с размером ячейки сетки, чем меньше временной шаг, тем более подробными будут результаты. Однако это более высокое временное разрешение требует дополнительной вычислительной мощности.

После создания климатической модели ее можно протестировать с помощью ретроспективного анализа. Этот процесс запускает модель из настоящего времени в прошлое. Затем результаты моделирования сравниваются с наблюдаемыми климатическими и погодными условиями, чтобы увидеть, насколько хорошо они совпадают. Это тестирование позволяет ученым проверить точность моделей и, при необходимости, пересмотреть ее уравнения. Научные группы по всему миру проверяют и сравнивают результаты своих моделей с наблюдениями и результатами других моделей.

По всему миру разные группы ученых создали и запустили модели для прогнозирования будущих климатических условий при различных сценариях на следующее столетие. Чтобы группы могли честно сравнить свои результаты, они проводят один и тот же эксперимент. Поскольку каждая климатическая модель немного отличается, результаты показывают целый ряд прогнозов. Хотя годовые значения температуры и осадков, прогнозируемые в разных моделях, различаются, тенденция и величина изменений достаточно постоянны.

Важность климатических моделей

Глобальный климат является результатом сложных взаимодействий между атмосферой, криосферой (льдом), гидросферой (океаны), литосферой (землей) и биосферой (жизнью), подпитываемых неравномерным пространственным распределением приходящей солнечной радиации [1]. Из климатических реконструкций с использованием регистраторов, таких как ледяные керны, керны океанских и озерных отложений, годовые кольца деревьев,

кораллы, пещерные отложения и грунтовые воды, мы знаем, что климат Земли претерпел серьезные изменения за свою историю.

Модели глобального климата или модели общей циркуляции основаны на общих принципах гидродинамики и термодинамики. Они возникли в численном прогнозировании погоды и явным образом описывают динамику атмосферы и океана. Модели представляют собой лабораторию для численных экспериментов климатических изменений в прошлом, настоящем и будущем. Идентификация резонансов и порогов в системе позволяет оценить возможные будущие изменения климата.

Одним из направлений этих моделей является глобальная циркуляция океана. Палеоклиматические данные свидетельствуют о том, что некоторые прошлые климатические сдвиги, такие как ледниково-межледниковые циклы, были связаны с изменениями в формировании глубоководных районов Северной Атлантики. Эта циркуляция вызывает сильный перенос тепла на север, в результате чего северная часть Северной Атлантики примерно на 4°C теплее, чем соответствующие широты Тихого океана. Таким образом, изменения в циркуляции океана могут вызвать значительное крупномасштабное изменение климата.

Похолодание позднего дриаса в конце последнего ледникового периода является самым недавним и лучше всего задокументированным резким изменением климата в прошлом. Различные модельные исследования показывают, что талая вода отмирающих массивов континентального льда могла привести к прекращению образования глубоководных вод в Северной Атлантике, замедлению циркуляции и охлаждению климата северного полушария. Однако палеоклиматические записи показывают, что дегляциальные талые воды поступали в Атлантический океан во время теплого периода (беллинг), предшествующего позднему дриасу. Этот кажущийся парадокс был недавно разрешен сценарием, подтвержденным палеоокеанографическими данными и модельным моделированием, согласно которому вода, пересекающая Гренландско-Шотландский хребет, препятствует нарушению циркуляции океана. Этот механизм стабилизации помог сохранить мягкие климатические условия в Европе вовремя теплого периода Бёллинга, несмотря на массовый приток талой воды.

Понимание этих процессов имеет важное значение, поскольку повышенный уровень парниковых газов также может повлиять на снабжение пресной водой и распределение температуры в регионе Северной Атлантики. Большинство моделей предсказывают увеличение количества осадков в высоких широтах и снижение прочности глубоководной формации из-за повышенного содержания парниковых газов в атмосфере. Значительные различия в моделировании могут быть связаны с неопределенностями в параметризации процессов в подсеточном масштабе, таких как вертикальное перемешивание и представление облаков и разливов океана.

Разработка моделей в мире

Компьютерные модели, прогнозирующие климат будущего, широко ис-

пользуются для планирования адаптации, смягчения последствий и устойчивости. Более 50 таких моделей были оценены и сопоставлены в ходе 6 фазы проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP6), проводимого Всемирной программой исследований климата. Крайне важно, чтобы исследователи знали, как наилучшим образом использовать эти результаты для предоставления согласованной информации для науки о климате и политики.

Подмножество моделей новейшего поколения «слишком жарки» и прогнозируют потепление климата в ответ на выбросы углекислого газа, которые могут быть больше, чем ожидается. Некоторые предполагают, что удвоение концентрации CO₂ в атмосфере по сравнению с доиндустриальным уровнем приведет, например, к потеплению выше 5 °C. Такого не было в предыдущих поколениях более простых моделей.

Модели CMIP6 включают более сложную обработку льда, воды и облаков, чем предыдущие модели, в том числе в фазе 5 (CMIP5). Последние модели также включают более широкий спектр физических процессов, чем раньше. Ожидается, что по мере того, как модели станут реалистичнее, они начнут сходиться. В то же время отдельные улучшения могут повлиять на чувствительность моделей к определенным процессам потепления, что часто невозможно предсказать.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) признала эту проблему «горячей модели». Ученые, участвовавшие в основных разделах Шестого оценочного доклада (ДОб; опубликовано за последние несколько месяцев), согласовали новейшие климатические модели с ключевыми ограничениями наблюдений в отношении среднего глобального потепления, повышения уровня моря и содержания тепла в океане, а также других анализов. Они применили статистику для определения наиболее разумных прогнозов, согласующихся со многими линиями доказательств, которые они называют «оценочным потеплением».

Крупнейшим источником неопределенности глобальных температур через 50 или 100 лет является объем будущих выбросов парниковых газов, которые в значительной степени находятся под контролем человека. Однако, даже если бы мы точно знали, каким будет этот объем, мы все равно не знали бы точно, насколько теплой станет планета. Это связано с тем, что глобальное потепление, вызванное деятельностью человека, представляет собой огромный эксперимент, не имеющий прецедентов, и процессы обратной связи, такие как изменения облачного покрова, будут влиять на темпы и масштабы потепления.

Чтобы количественно оценить влияние этих эффектов, разработчики моделей климата определяют стандартизированные показатели. Одним из них является переходная реакция климата (TCR), или степень глобального потепления в год, когда концентрация CO₂ в атмосфере удвоилась после того, как неуклонно увеличивалась на 1% каждый год. Вторым показателем является равновесная чувствительность климата (ECS), возможная долгосрочная реакция температуры на концентрацию CO₂. Эти две метрики раз-

личны, но связаны между собой: ECS измеряет долгосрочную равновесную реакцию климата, тогда как TCR измеряет климат, который еще не успел полностью приспособиться. Модели с высоким TCR, как правило, имеют высокий ECS.

Заключение

Ученые и инженеры со всего мира пытаются создать реалистичную и достоверную модель климата. Создание достоверной модели поможет сохранить климат и окружающую среду всей планеты.

Так как влияние человека на климат стремительно растет, то и модель необходимо разрабатывать с учетом влияния человека на климат. Данная тематика требует дальнейшего изучения и построения модели с учетом воздействия человека и применением машинного обучения.

Библиографический список

1. Численное моделирование. — Текст : электронный // oceanographer : [сайт]. - URL: https://web.archive.org/web/20090818094819/http://www.oceanographers.ru/index.php?option=com_content&task=category&id=143&Itemid=261 (дата обращения: 8.04.2023).

2. Осипов А.Г. Разработка модели статистической оценки ущербов от воздействия климатических факторов в системах теплоснабжения / а. г. осипов. — текст : электронный // cyberleninka : [сайт]. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-statisticheskoy-otsenki-uscherbov-ot-vozdeystviya-klimaticheskih-faktorov-v-sistemah-teplosnabzheniya> (дата обращения: 10.04.2023).

3. Пархоменко, В. П. Глобальная модель климата с учётом углеродного цикла наземной растительности / В. П. Пархоменко. — Текст : электронный // CYBERLENINKA : [сайт]. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/globalnaya-model-klimata-s-uchyotom-uglerodnogo-tsikla-nazemnoy-rastitelnosti> (дата обращения: 10.04.2023).

УДК 504.7.06

ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВОЙ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Целлер Е.Н., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Сформулирована проблема использования растительных отходов сельскохозяйственного производства в качестве сырьевой и топливной основы промышленности. Показаны пути переработки растительных отходов и сформирован список готовой продукции на их основе. Проанализированы способы решения экологической проблемы путем переработки отходов сель-

скохозяйственного производства.

Ключевые слова: растительные отходы сельскохозяйственного производства, промышленное производство, продукция на основе растительных отходов, технология переработки, перспективы использования отходов.

Сельское хозяйство РФ характеризуется крупными масштабами производства. Объем сельскохозяйственного производства в 2019 г. составил 2515,2 млрд руб, значительную часть (53 %) продукции которого производят сельхозпредприятия и фермерские хозяйства. Россия занимает ведущее место в мире по валовому сбору зерновых культур (в 2022 г более 158 млн т), сахарной свеклы, подсолнечника, картофеля, овощей, пятое место по производству молока, шестое место - по производству скота и птицы на убой, седьмое место - по животному маслу. Посевные площади составляют 77805 тыс. га, в том числе под зерновыми - 47553 тыс. га, под техническими культурами - 8962 тыс. га. Производство скота и птицы на убой (в убойном весе) составило 6,7 млн т, молока - 32,6 млн т, яиц - 39,4 млрд штук. В животноводстве было израсходовано 99,2 млн т кормов, в том числе 42,7 млн т концентрированных. По мнению экспертов РФ наша страна является одной из ведущих сельскохозяйственных держав мира.

Аграрный сектор в экономике любой страны занимает особое и важное место и обладает рядом особенностей. Важнейшей из них является то, что организация производства связана с использованием пахотной земли и природной среды. При этом земля служит главным средством производства. Сельское хозяйство основано на использовании биологических факторов растений, что предопределяет несовпадение периода производства с рабочим периодом. Сельское хозяйство во многом зависит от климатических и погодных условий, отличается большой территориальной дифференциацией производства, особой транспортной инфраструктурой. В сельском хозяйстве в большей мере, чем в других отраслях, используется продукция собственного производства (семена, корма и др.). По существу, уровень развития сельского хозяйства во многом определяет уровень экономической и продовольственной безопасности страны. Трудно найти другую отрасль хозяйства, которая оказывала бы такое широкое и многообразное воздействие на экономику страны, социальные и политические отношения и состояние окружающей среды [1].

Перечень сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории страны велик. Условно он делится на следующие отрасли, производящие: зерно, технические культуры, картофель, бахчевые культуры и овощи, корма, плоды, ягоды и др. В сельском хозяйстве, как и в других отраслях производства, актуальны экологические проблемы, требующие решения. К ним относятся: загрязнение почвы, водного и воздушного бассейнов вредными выбросами и отходами, выведение из оборота сельхозугодий, занятых отходами, вторичное загрязнение окружающей среды хранилищами отходов и другие.

Сельскохозяйственные отходы можно разделить на две основные

группы - это растительные и животноводческие. К растительным можно отнести отходы, остающиеся при сборе урожая, хранении и переработке: солома, шелуха, жом, жмых, мезга, барда, остатки растительных масел, отходы очистки сточных вод производства масло-жировой продукции, осадки при пищевом производстве, продукты, утратившие потребительские свойства. К ним можно отнести растительно-древесные отходы, образующиеся при рекультивации пашни, фруктово-ягодных садов, раскопке огнепреградительных траншей и др.

Отходами называются остатки сырья, материалов или полуфабрикатов, образующиеся на всех стадиях технологического или сельскохозяйственного процесса, частично или полностью утратившие потребительскую ценность исходного сырья и материалов. К животноводческим отходам относятся отходы жизнедеятельности птиц, свиней, крупного рогатого скота, лошадей и других животных, остатки при производстве мясо-молочной продукции. В основном это навоз и стоки, осадки навозных стоков, помет, подстилочные материалы (солома, торф, опилки), остатки и продукты, утратившие потребительские свойства, молочной, рыбной и мясной промышленности. Наиболее опасными, в экологическом плане, являются отходы второго типа. При хранении на специальных площадках отходов жизнедеятельности животных, в ходе биохимических реакций, образуются вредные, дурнопахнущие газы, а также опасные вещества. Стоки, образованные на площадках хранения, попадая в грунтовые воды, в водоемы ухудшают экологическую обстановку, со всеми тяжелыми последствиями.

Отходы растительного происхождения, не подвергнутые организованному хранению и целенаправленной переработке, теряют свои свойства и формируют вредные последствия, аналогичные негативному воздействию, вызываемому отходами животного происхождения. Количество отходов растительного происхождения в сельском хозяйстве может превышать 50–70 % от массы исходного сырья, выращенного в полевых условиях. Они включают полевые отходы, остающиеся непосредственно в поле, остатки сырья, образующиеся после обмолота зерновых, отходы, формирующиеся при хранении, сушке, транспортировке и т.д. Как правило, это относительно чистые по масляным и органическим загрязнителям материалы, не требующие специальной очистки.

Отходы сельского хозяйства необходимо рассматривать как источник сырья, использование которого экономически и экологически целесообразно в различных отраслях техники. Сельскохозяйственные отходы представляют собой излишки, или побочные продукты при производстве сельскохозяйственной продукции, используемые в полной мере эффективно. Рециркуляция, повторная переработка и использование их в промышленном производстве открывают широкие возможности к расширению сырьевой базы промышленности. Внешний вид заготовительных видов зерна и отходов растительного происхождения представлен на рисунке 1.



а, б, в – зерновые культуры (пшеница, рожь, ячмень); г, д, е – растительные отходы (стебли кукурузы, очищенные кукурузные початки, пшеничная солома)

Рисунок 1 – Внешний вид заготовительных видов зерна и растительных отходов на их основе

Сельскохозяйственные отходы можно разделить на классы: отходы растениеводства, животноводства и перерабатывающих производств. Каждый класс отходов требует специфических технологий переработки и завершения технологических циклов. Например, эффективность переработки отходов животноводства зависит от их химического состава, физических свойств, вида животного, которые определяют качество готового и переработанного продукта. В этой области могут быть реализованы нетрадиционные технологии переработки указанных отходов.

Эта проблема актуальна для отходов растительного происхождения и обусловлена ежегодным увеличением валового сбора зерновых культур. В первую очередь это касается злаковых и зерновых культур, но в последнее время особое внимание уделяется производству крупяных культур проса и гречихи. Увеличения объемов производства кормовых культур намечено достичь за счет повышения валовых сборов кукурузы и зернобобовых культур, рапса и расширения посевов медоносных растений. Отходы делят на две группы: кормовые – зерно, крупы, побочные продукты, кормовые смеси, солома; не кормовые – отходы очистки зерна, кукурузные обертки, органическая пыль, вредные примеси. Основные области применяемых отходов сельскохозяйственного производства растительного происхождения показаны в таблице 1.

Общими технологическими операциями для всех отходов являются термические, физико – химические и механические методы переработки. Они могут быть циклическими и непрерывными, дополнительными и интегрированными в технологический процесс.

Таблица 1 – Продукты, получаемые из отходов сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности

№	Вид отходов	Продукция и ее функциональное назначение	Промышленное производство
1	Животноводческие	Биогаз, топливные брикеты и бриксы, удобрения, местное строительное сырье, добавки к химпродуктам	Теплоэнергетика, химия, строительство
2	Растительные	Биогаз, топливные брикеты и бриксы, растительное масло, удобрения, технологические добавки в металлургии, к огнеупорным и теплоизоляционным материалам, наполнители к химпродуктам, строительным материалам, бумаге и картону, местное строительное сырье, кормовые добавки, элементы ландшафта	Теплоэнергетика, химия, металлургия, строительство, сельское хозяйство
3	Производства продукции сельскохозяйственного назначения и пищевых продуктов	Кормовые и технологические добавки, вяжущие, удобрения, наполнители для лаков и красок, химпродуктов, топливные гранулы	Теплоэнергетика, химия, металлургия, строительство, сельское хозяйство

В последнее время предложено использовать отходы растительного происхождения в качестве порообразующих и технологических добавок в различные сырьевые составы [2-3]. В металлургии, например, их можно применять в качестве твердого восстановителя и структурообразующего материала [4-6]. В теплоэнергетике эти добавки играют роль замещающего или альтернативного топлива. Это направление активно развивается в ведущих сельскохозяйственных странах Южной и Северной Америки. Технология переработки отходов зависит от вида и назначения готовой продукции. Наиболее разнообразны механические и термические способы переработки отходов. Они могут быть основными и вспомогательными, предварительными и финишными. К их числу относят: складирование, первичную очистку, сушку, дробление, измельчение, рубку, грохочение, классификацию, фильтрование, отстаивание, дозирование, смешивание, прессование, гранулирование, складирование, вылеживание и ряд других. Некоторые технологии включают вымачивание и увлажнение, разнообразные транспортные операции. В реальном производстве работают системы КИП и А, видеоконтроля и наблюдения. Может широко применяться робототехника и системы цифровизации, являющиеся атрибутами современного производства.

Библиографический список

1. Волынский В.Н. Лесотехнический толковый словарь / В. Н. Волынский. – Москва: Лань, 2021. – 460 с.
2. Павловец В.М. Использование порообразующих добавок растительного происхождения в технологии производства железосодержащего окучкованного сырья / В.М. Павловец // Вестник СибГИУ. – 2019. – №3. – С.14–20.
3. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
5. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
6. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.

УДК 504.7.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Целлер Е.Н., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проанализированы основные технологические операции переработки растительных отходов сельскохозяйственного производства. Проведена оценка технических показателей топливных брикетов для слоевого горения в промышленной теплоэнергетике, сформированных на основе растительных отходов. Приведены результаты исследований прочности топливных брикетов, полученных с использованием растительных отходов.

Ключевые слова: растительные отходы сельскохозяйственного производства, топливные брикеты, технические показатели.

Одним из наиболее распространенных способов утилизации отходов сельского хозяйства и деревообрабатывающей промышленности является переработка отходов в топливные брикеты для теплоэнергетики, которые уже давно являются экономичным топливом во многих странах, не имеющих собственных запасов нефти, газа и угля. Для производства топливных брикетов могут быть использованы отходы хвойных и лиственных пород, сельскохозяйственного производства и животноводства. Брикеты могут использоваться в качестве топлива в любых видах печей, топок, котлов, а также в ками-

нах или грилях. Преимущества топливных брикетов: удобство хранения, технологичность, высокая теплота сгорания. Углеродсодержащие брикеты – это топливо длительного горения для печей любого типа, обеспечивающее равномерное горение с низким выделением золы и дыма. Длительность хранения топливных брикетов для топок и печей без снижения товарных свойств варьируется от 1 года до 5 лет. Главное достоинство брикетов – низкая стоимость и возможность использования для их получения разнообразных видов отходов и сопутствующего сырья [1].

Топливные брикеты – это прессованные изделия из высушенных остатков древесины, таких как опил, древесная мука, стружка, щепа, шлифовальная пыль, включая отходы растительного производства и животноводства. В основе технологии производства древесных топливных брикетов лежит процесс прессования измельченных отходов сельскохозяйственного производства (ОСП) под высоким давлением. Связующим является сульфит – дрожжевая бражка (СДБ) или каменноугольная смола (КУС). Структурная схема технологии брикетирования отходов представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема технологии брикетирования

Первичная обработка ОСП и древесностружчатых отходов включает отсортировку неметаллических включений и загрязнителей. Для предварительного измельчения используются молотковые мельницы. Такие мельницы позволяют загружать органические отходы с влажностью более 50 % и исключить налипание материала на внутренние части оборудования.

В массовом производстве для сушки сырья используются барабанные

сушилки, позволяющие получать полусухие отходы с конечной влажностью на выходе менее 8–12 %. Также можно использовать сушку при помощи циркуляции нагретого воздуха в аэродинамической трубе. В качестве теплогенератора используется твердотопливная печь, работающая на отходах в режиме противотока. Аэродинамическая сушилка работает при температуре осушающего воздуха 180–250 °С, что исключает опасность возгорания опила. Запускается сушилка в течение нескольких минут, процесс сушки легко управляем и контролируем. Сушка материала в аэродинамической установке обеспечивается интенсивным массо – воздухообменом, трением частиц друг о друга в плотном слое при движении с высокой скоростью. Скорость осушающего агента относительно частиц материала в аэродинамической сушилке составляет 25–28 м/с, что позволяет сушить древесные и сельскохозяйственные отходы, торф, опил и другие мелкофракционные материалы в компактной конструкции.

Вторичное дробление сухого материала обеспечивает уменьшение размеров до 4 мм и позволяет модифицировать структуру частиц. Для осуществления этих задач можно использовать дисковые мельницы. Главные параметры оборудования – производительность по подаваемому материалу и размеры дробимого материала.

На заключительной стадии производства происходит формообразование увлажненной массы и ее первичное уплотнение в результате прессования. Суть технологии производства топливных брикетов заключается в процессе прессования под большим давлением измельченной растительной биомассы, содержащей упрочняющие добавки. Для финишного упрочнения массы необходимо использование связующих веществ, вводимых в структуру брикетов. В качестве связующего целесообразно использовать материалы органического происхождения, в процессе горения которых образуется минимальное количество золы и вредных выбросов. Для производства топливных брикетов на основе древесных опилок наиболее целесообразно использовать сульфит – дрожжевую бражку (СДБ) или каменноугольную смолу (КУС). Наиболее рациональным связующим является СДБ, которая является отходом целлюлозно – бумажного производства, и обладает физическим сродством к древесным и растительным материалам и относится к сравнительно дешевым связующим. Сульфит – дрожжевую бражку получают из сульфитного щелока, образующегося при сульфитной варке целлюлозы. Из органических веществ, входящих в состав сульфитного щелока, с помощью биохимической переработки извлекают этиловый спирт, кормовые дрожжи, органические кислоты, многоатомные спирты и пр. Остающийся после такой переработки и последующего упаривания продукт представляет собой концентрат сульфитно-дрожжевой бражки. КУС является очень вязкой жидкостью, поэтому для ее использования в технологии брикетирования и облегчения смешивания компонентов необходимы органические растворители и повышенная температура процесса. После повторного измельчения и смешивания основной массы со связующим компонентом осуществляется бри-

кетирование сырьевой массы, в процессе которого на нее оказывается значительное давление. Усредненные технические показатели брикетов на основе древесных отходов приведены в таблице 1. Технические показатели брикетов на основе сельскохозяйственных отходов растительного происхождения приведены в таблице 2. В таблице 2 приведены усредненные данные для топливных брикетов в теплоэнергетике, полученных из зерновой и рапсовой соломы, льнокостры, мякины, кукурузных початков, взятые на основе научных публикаций и описаний изобретений [2-3]. Видно, что технические показатели брикетов на основе сельскохозяйственных отходов растительного происхождения близки показателям, полученным для брикетов на основе древесных отходов лесопереработки. Это позволяет рекомендовать общие принципы брикетирования дисперсной массы для этих видов сырья.

Таблица 1 – Технические показатели брикетов на основе древесных отходов

№	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Теплота сгорания	Ккал/кг	4500–5500
2	Зольность	%	0,5–5,0
3	Прочность на сжатие	МПа	3–5 (25)
4	Плотность	кг/м ³	950–1300
5	Крупность частиц	мм	0–8
6	Давление прессования	МПа	100–120
7	Влажность	%	12–16
8	Содержание серы	%	0,02–0,04
9	Тип связки		СДБ, КУС
10	Длительность хранения	год	1–5

Таблица 2 – Технические показатели брикетов на основе сельскохозяйственных отходов растительного происхождения

№	Показатель	Единица измерения	Значение показателя
1	Теплота сгорания	Ккал/кг	4300–500
2	Зольность	%	2,5–5,8
3	Прочность на сжатие	МПа	3–5 (10)
4	Плотность	кг/м ³	550–800
5	Крупность частиц	мм	0–5
6	Давление прессования	МПа	100–120
7	Влажность	%	8–10
8	Содержание серы	%	0,02–0,04
9	Тип связки	-	СДБ, КУС

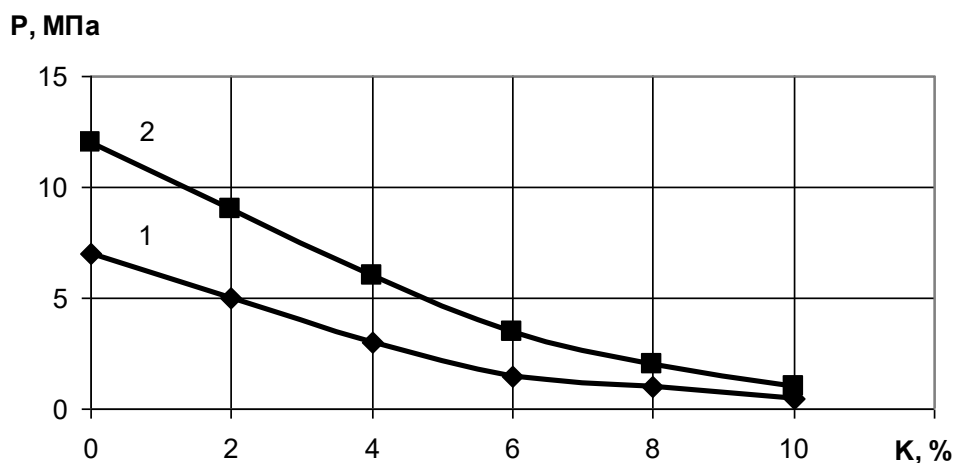
Можно добавить, что топливные брикеты загружать в топку нужно в 2–3 раза реже, чем уголь, и это существенно повышает их эффективность сжигания. После использования брикетов очистку топki нужно проводить в несколько раз реже. Практика показывает, что процесс удаления золы про-

исходит удобнее и легче. Если сравнивать топливные брикеты по составу и плотности, тогда данный показатель не уступает другим видам топлива и следовательно, при хранении брикетов им требуется существенно меньше площади складских помещений, чем простым дровам. Топливные брикеты цилиндрической формы удобнее всего транспортировать и хранить. Брикеты для топки всегда сухие, если сравнивать их с обычными дровами и всегда готовы к использованию. Исключается самовозгорание и взрыв при использовании, теплоотдача древесных брикетов в полтора раза выше, чем у дров. При горении они не вызывают аллергию и не выделяют запаха, что позволяет отнести брикеты к разряду экологически чистого вида топлива. Усредненный состав брикетируемой смеси для производства топливных брикетов представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Состав брикетируемой смеси

№	Компоненты	Содержание, %
1	ОСП (0-1 мм)	10–20
2	Связка (СДБ)	8–10
3	Угольная мелочь (0-0,2 мм)	70–80
4	Специальные добавки	1–5

Зависимость прочности топливных брикетов P , МПа, сформованных на основе ОСП, от массового содержания ОСП K , %, в брикетируемой смеси показана на рисунке 1.



Содержание упрочняющей связки (СДБ), %: 1–10; 2–15

Рисунок 1 – Зависимость прочности топливных брикетов на основе ОСП от массового содержания ОСП в брикетируемой смеси

Лабораторные эксперименты проводили на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ. Установили, что добавки ОСП в массу для производства топливных брикетов снижают прочность прессовок. Причиной является то, что древесные отходы обладают пружинящей структурой и после снятия

нагрузки частицы принимают первоначальную форму и разрыхляют структуру брикетов. Для устранения этого недостатка рекомендован ряд технологических решений, полученных в металлургическом производстве [4–8], на основе подбора фракционного состава, режима прессования, вида и массового содержания связки в формуемой смеси.

Библиографический список

1. Акимова Т.А. Экология / Т.А. Акимова, А.П. Кузьмин, В.В. Хаскин – Москва: Экономика, 2007. – 510 с.
2. Павловец В.М. Использование порообразующих добавок растительного происхождения в технологии производства железосодержащего окучкованного сырья / В.М. Павловец // Вестник СибГИУ. – 2019. – №3. – С.14–20
3. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
5. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
6. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
7. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло / В.М. Павловец, К.И. Домнин // 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. Павловец В.М. Исследование механизма упрочнения железорудных брикетов, содержащих продукты регенерации отработанного минерального масла / В.М. Павловец, К.И. Домнин // Сборник трудов X X III Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения», Выпуск 25, часть 2, 365 с, Новокузнецк, СибГИУ, 2021, с. 308–313.

РОЛЬ ДРОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Петрунин Ю.С., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проведена оценка дробильного оборудования в технологии переработки шлаков металлургического производства. Показана роль шлаковых отходов в структуре металло - и ресурсосбережения. Представлены результаты исследования процесса дробления шлаковых отходов металлургического производства.

Ключевые слова: шлаковые отходы, дробильное оборудование, строительные материалы, перспективы использования шлаковых отходов.

Шлаки доменного и сталеплавильного производства являются одними из самых объемных отходов металлургического производства. В частности, удельный выход сталеплавильного шлака составляет в среднем от 150 до 200 кг/т стали. Для доменного производства этот показатель еще выше, что соответствует ежегодному увеличению шлаковых отходов в масштабах всей планеты на 200 – 300 млн. тонн. Использование металлургических шлаковых отходов в строительстве, в производстве строительных и керамических материалов, в огнеупорной промышленности, в сельском хозяйстве и в других отраслях техники позволяет расширить сырьевую базу этих технологий и решить экологические проблемы в промышленности [1, 2]. Экологическая направленность технологии рециклинга и требования законодательства по охране окружающей среды обусловлены тем, что значительные объемы золы и шлака скопились в отвалах и накопителях, занимающих ценные земельные угодья. Транспортировка, складирование шлаков и содержание шлаковых отходов требуют повышенных материальных и финансовых затрат на их эксплуатацию. Шлакоотвалы загрязняют воздушный и водный бассейны и меняют химико-минеральный состав земной коры, почв и сельхозугодий. Пыление шлакоотвалов при неблагоприятных погодных условиях (повышенная влажность воздуха, туманы) и растекание при выпадении осадков формирует вторичное загрязнение окружающей среды, отрицательно влияет на здоровье людей и на продуктивность сельскохозяйственных угодий. Поэтому ликвидация или рекультивация шлакоотвалов благоприятно сказывается на экологической обстановке в промышленном регионе, а переработка металлургических шлаков позволяет получать востребованную продукцию.

Наибольшее количество в объеме переработки металлургических отходов занимают доменные шлаки. Они являются техногенным продуктом при выплавке металла в доменных печах. Чугун и шлак образуются в доменной печи в процессе плавления рудных и нерудных компонентов шихты:

окускованного сырья, руды, топлива и флюса (известняка или доломита). Шлак, выпускаемый через чугунную летку, увлекает за собой некоторое количество металла и при разливке требует специальных мер по отделению металлических включений. Жидкий шлак сливают в шлаковозные ковши и отвозят на участки переработки или на шлаковые отвалы, где также организована переработка материалов.

Переработанный шлак используются как добавки и наполнители при производстве широкого спектра строительных материалов: песка, цемента, бетонов, растворов, кирпича, тротуарной плитки и т. д. Они могут использоваться как полностью, так и в виде частичного заменителя основного сырьевого материала. Они увеличивают долговечность при укладке в земляное полотно автомобильных дорог, тротуаров и промплощадок. Реальные перспективы имеют технологии применения золошлаковых отходов в производстве портландцемента (как активные кремнеземистые добавки) в количестве 10–5 % и в производстве пуццолановых портландцементов марок 300–400 – до 30–40 % (золопортландцемент), обладающих повышенной активностью. В этих технологиях тонкодисперсные отходы проявляют функции вяжущих веществ, которые позволяют заменить или экономить дорогостоящие стандартные связующие, полученные на основе сложных физических процессов. В дорожном строительстве используют главным образом доменные продукты переработки шлаков, обладающие повышенной прочностью. Шлаковый щебень в смеси с битумами обладает хорошим сцеплением с дорожным полотном, в особенности в присутствии дегтя, а также с цементными растворами. Щебень, получаемый из шлаков, по показателям истираемости и потере в массе при испытании на дробимость подразделяется на несколько классов качества. Также для строительства применяют мартеновские, ферромарганцевые, электроплавильные, ваграночные и шлаки цветной металлургии. Большинство фосфоросодержащих шлаков, переработанных в шлаковую муку, используют в качестве удобрений в сельском хозяйстве.

Преимущества гранулированного шлака заключаются в том, что при выборе метода обработки шлака учитываются технические параметры и преимущества получаемого материала, представленные ниже: использование для производства цемента и бетона; усиливает состав и уплотнение бетонной смеси; уменьшает водопотребление бетонной смеси; замещает портландцемент, что при доступной цене за 1 кг, способствует повышению эффективности применения бетона; улучшает структуру и свойства бетонов; повышает морозостойкость бетона; применяет безотходную технологию и снижает загрязненность окружающей среды. Благодаря доступной стоимости гранулированный шлак широко используется в дорожном строительстве, для изготовления минеральной ваты, шлаковой пемзы, в сельском хозяйстве.

Отвальные доменные шлаки получают в результате слива шлакового расплава в отвал и последующей разработки отвала. Отвальный шлак представляет собой преимущественно разнофракционный кусковой материал с крупностью отдельных кусков до 100–120 мм. Куски большего размера со-

ставляют около 10–15 % от объема всего шлака. Отвалы разрабатывают с таким расчетом, чтобы дробленый щебень возможно больше был выдержан на открытом воздухе для дегазации его от газовых соединений.

Отвальные кислые доменные шлаки, переработанные (дробление, магнитная сепарация и сортировка) на щебень, применяются для сооружения щебеночных оснований и покрытий, для приготовления асфальтобетонной смеси, а также для устройства нижнего слоя цементобетонных покрытий. В последнее время шлаки успешно применяют для изготовления огнеупорных бетонов и теплоизоляционных материалов, используемых для собственных нужд металлургических предприятий, и производства широкого спектра коммерческой продукции [1–4]. Их можно использовать в качестве частичной замены основного сырья для получения строительных мертелей, торкрет смесей и подварочных масс. Перспективным является использование металлургических шлаков для каталитической очистки отходящих газов от вредностей и в качестве активных зернистых насадок для регенеративных горелочных устройств [5, 6]. Содержание в сталеплавильных шлаках до 8–12 % остаточного металлического железа и от 15 до 40 % его оксидов делает шлак ценным сырьем в первом металлургическом переделе с максимальным извлечением ценных компонентов. Содержание оксидов железа в шлаке сопоставимо с уровнем их содержания в бедных минеральном сырье. При этом выплавка железа из расплавленного шлака путем восстановления оксидов энергетически и экономически эффективнее, чем из твердых материалов в шахтных печах. По примерным оценкам, такая технология позволит в РФ дополнительно извлекать до 1,8 млн. тонн чистого металла без вредных примесей цветных металлов и неметаллических включений.

В настоящее время наиболее продуктивно отработаны технологические схемы производства щебня из отвальных шлаков, позволяющие производить стандартные сформованные материалы. Эти схемы обеспечивают непрерывный цикл технологических операций по переработке шлаковых материалов. Технологический процесс производства щебня по этому способу состоит в том, что жидкий шлак из ковшей сливают в шлаковые ямы или бассейны слоями по 0,2–0,3 м. После укладки четвертого-пятого слоев его орошают водой в количестве 0,5–0,8 м³/т шлака и организуют интенсивное водовоздушное охлаждение. После кристаллизации при температуре верхнего слоя не более 1200 °С и нижнего не менее 500 °С в течение 4–8 ч охлажденный шлак разрабатывают экскаватором, классифицируют на фракции и при необходимости подвергают дополнительному дроблению. Внедрение этого способа на Новолипецком и Таганрогском металлургических заводах позволило сократить расходы на содержание шлаковых отвалов в среднем на 0,6 руб/т и получить дополнительную прибыль около 1 руб/т.

Принципиальная схема переработки отвального доменного шлака показана на рисунке 1.

Расплавленный шлак, образующийся на выходе из доменной печи, может достигать температуры около 1500 °С, а в ряде случаев и выше, что

требует процедуры охлаждения материала. Для первичной обработки доменного шлака используют следующие методы: водоохлаждение сырья холодной водой; охлаждение расплава при помощи воздуха; водовоздушной смесью или другими газожидкостными смесями.

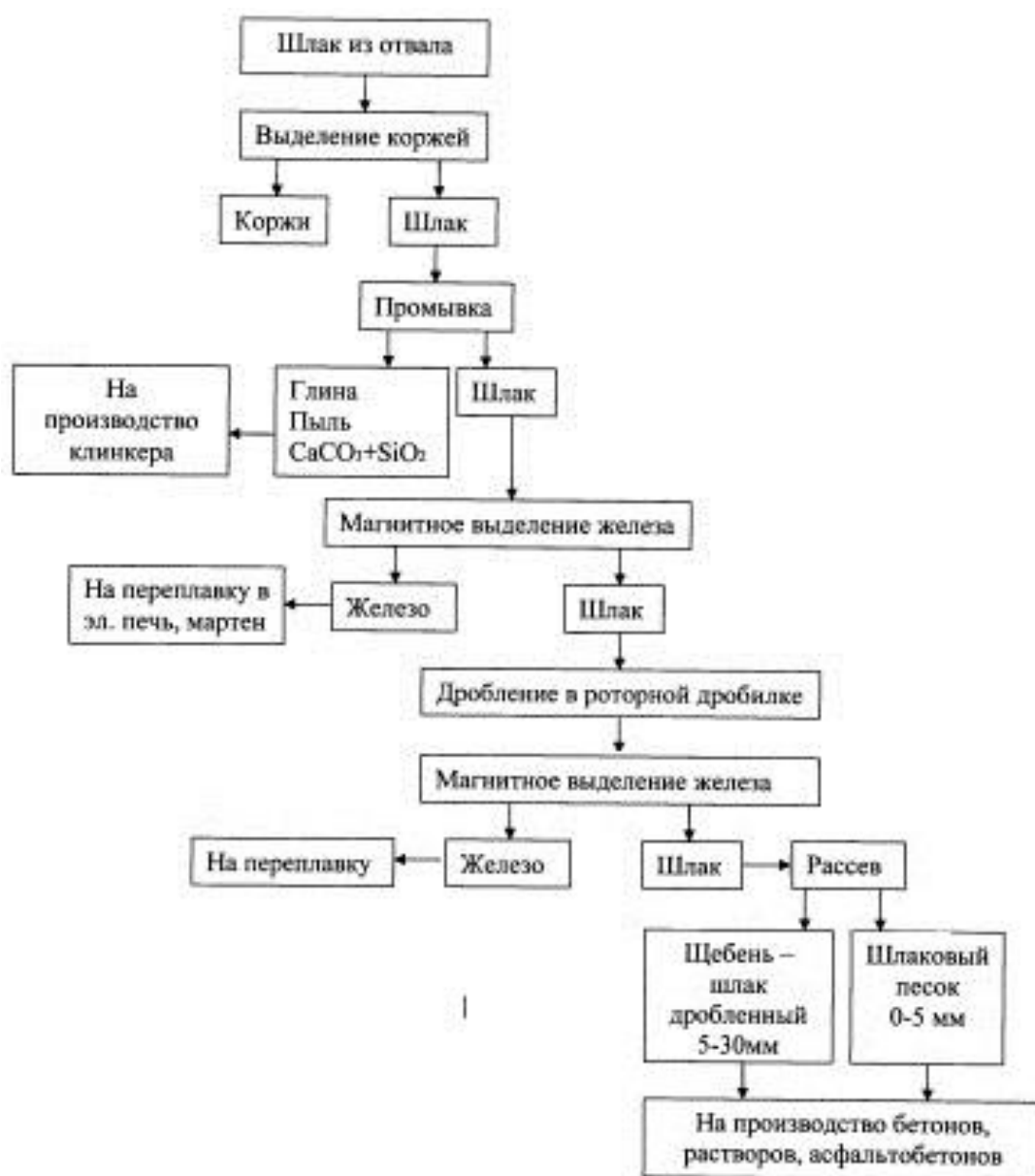


Рисунок 1 – Схема переработки отвального доменного шлака

Одними из основных и наиболее энергоемких технологических операций переработки шлаков являются дробление и измельчение. Разновидностей дробилок и мельниц, применяемых в промышленности достаточно много. К основным устройствам этого назначения относятся: щековые, конусные, валковые, молотковые, роторные дробилки, дезинтеграторы, дисмембраторы, электрогидравлические или электроимпульсные дробилки и другие устройства. Очень перспективными устройствами являются дробильные агрегаты, использующие несколько принципов дробления или применяющие мощные энергетические поля.

Принцип действия и кинематические схемы щековых дробилок с простым и комбинированным движением щеки приведен на рисунке 2.

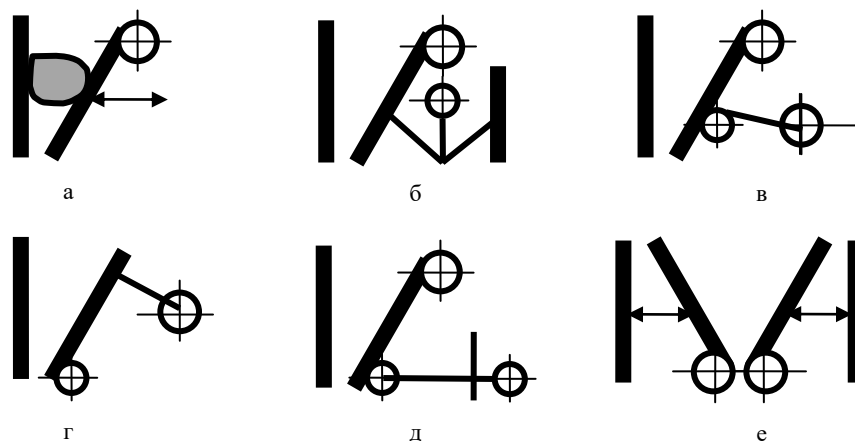


Рисунок 2 – Принцип действия (а) и кинематические схемы механических дробилок с простым (б, в) и сложным (г-е) движением щеки

После дробления измельченный материал разгружается через выпускное отверстие во время отхода подвижной щеки от неподвижной. Максимальная крупность кусков загружаемого материала не должна превышать 85 % ширины приемного отверстия. Крупность дробления кусков зависит от размеров разгрузочной щели и регулируемой специальным механизмом. Схемы двухвалковой и одновалковой зубчатой дробилок приведены на рисунке 3.

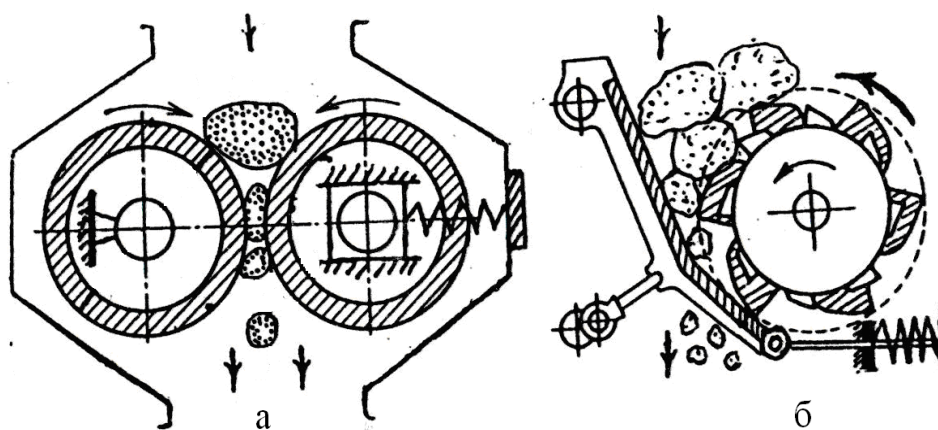


Рисунок 3 – Схемы двухвалковой (а) и одновалковой зубчатой (б) дробилок

Условно считается, что при дроблении средний размер частиц не должен превышать 3-5 мм, хотя при дроблении получают частицы с широким классом крупности. При измельчении и помоле образуются частицы крупностью менее 3-5 мм. Размер частиц зависит от конструкции помольного оборудования и размеров загружаемых материалов.

К основным промышленным процессам измельчения материалов относятся: измельчение в барабанных вращающихся и вибрационных мельницах, центробежных, струйных и взрывоструйных мельницах.

Барабанная мельница (рисунок 4) представляет собой преимущественно цилиндрический (иногда конический или цилиндроконический) барабан 1 с торцевыми крышками 2, 3 и пустотелыми цапфами 4, 5, выполняющими роль загрузочного и разгрузочного узлов, опирающихся на подшипники 6, 7.

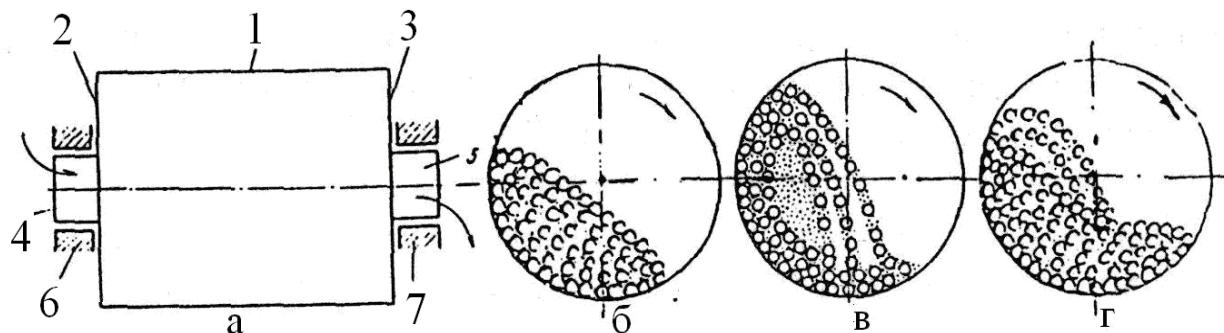


Рисунок 4 – Схема барабанной вращающейся мельницы (а) и траектория движения в ней мелющих тел при каскадном (б), водопадном (в) и смешанном (г) режимах измельчения

Такая конструкция позволяет сходный материал загружать через одну цапфу, а измельченный продукт разгружать через другую. Движение материала вдоль оси барабана происходит за счет перепада уровней загрузки и разгрузки, обусловленного наклоном оси устройства. При мокром измельчении материал транспортируется водой, а при сухом – воздушным потоком.

При вращении барабана измельчающая среда (стальные шары, стержни, куски руды или рудная галля) и измельчаемый материал из-за наличия поверхностных сил поднимаются на некоторую высоту и затем сползают, скатываются или падают вниз, в зависимости от частоты вращения барабана. Измельчение происходит за счет удара падающей измельчающей среды, раздавливания и абразивного износа частиц сыпаемого слоя материалов.

В промышленных условиях мельницы работают при частоте вращения барабана, равной 50–88 % от критической, в каскадном, водопадном или смешанных режимах. Каскадный (перекатный) режим (рисунок 4, б) наблюдается при небольшой частоте вращения барабана, составляющей 50–60 % критической и определяется поверхностными свойствами сырья. Мелющие тела, например шары, поднимаясь на некоторую высоту, скатываются «каскадом» или сползают вниз, измельчая материал главным образом раздавливанием и истиранием.

Водопадный режим (рисунок 4, в) осуществляется при частоте вращения барабана 75–88 % от критической, обеспечивающей переход всех мелющих тел с круговой на параболическую траекторию в водопадном режиме.

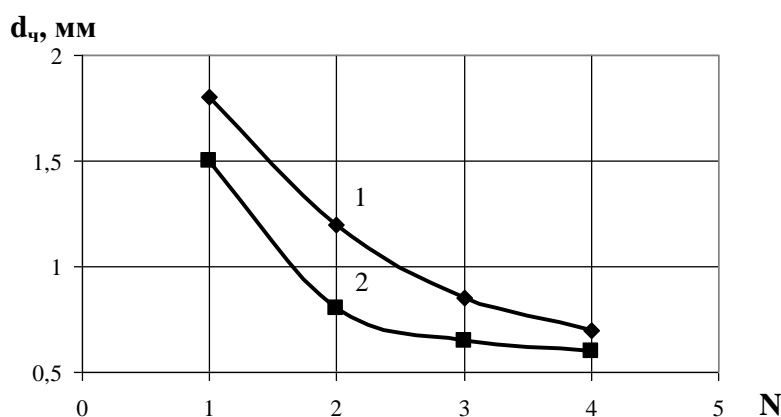
Измельчение материала при этом происходит за счет удара падающих тел и в меньшей степени за счет раздавливания и истирания.

Смешанный режим (рисунок 4, г) является промежуточным между каскадным и водопадным режимами измельчения и наблюдается при частоте вращения барабана, составляющей 60–75 % от критической.

В настоящей работе представлены результаты исследования процесса дробления металлургических шлаков на лабораторной щековой дробилке.

Целью работы было исследование влияния количества пропусков дробимого материала N на фракционный состав и средний размер частиц d_c , мм, получаемых в результате дробления металлургического шлака.

Эксперименты проводили на лабораторной щековой дробилке производительностью 0,5 т/ч. Геометрические размеры приемного отверстия лабораторной щековой дробилки составляли 75×100 мм. Ширина выходного отверстия дробилки h , мм, изменялась от 8 до 14 мм. Для анализа результатов опытов использовали показатель $K = d_k / h$, где d_k – средний размер кусков загружаемого материала (доменный шлак). Результаты экспериментов представлены на рисунке 5.



В позиции 1 – $K=3$; 2 – $K=5$.

Рисунок 5 – Влияние количества пропусков дробленого сырья через дробилку на средний размер частиц, получаемых в результате дробления

Установили, что размеры частиц, образующихся после дробления доменного шлака, зависят от количества пропусков материала через приемное отверстие дробилки и ширины разгрузочного отверстия. На форму и размер частиц также влияет механическая прочность дробимого материала. При повторных пропусках сырья через дробилку в работу включается режим самоизмельчения материала и средний размер частиц продолжает уменьшаться. На этот процесс существенно влияет концентрация частиц повышенной прочности в потоке материалов. Однако при $N=3$ наступает режим стабилизации размеров частиц. Для дальнейшего снижения размеров частиц и повышения степени дробления требуется уменьшение ширины выходного отверстия дробилки, либо отсев мелких фракций частиц от общей массы дроб-

ленного материала.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 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, 2023. – 328 с.
5. Павлович Л.Б. Катализаторы и каталитические процессы глубокого окисления на основе металлургических шлаков / Л.Б. Павлович, С.И. Павлович. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. – 268 с.
6. Павловец В. М. Устройства для промышленной теплогенерации / В. М. Павловец. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 218 с.

УДК 621.181

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ НА КОЛИЧЕСТВО ИЗВЛЕКАЕМЫХ МЕТАЛЛОВКЛЮЧЕНИЙ

Петрунин Ю.С., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Представлен список промышленной продукции на основе переработанного металлургического шлака. Дана характеристика производственных операций технологии переработки металлургических шлаков и ориентировочные энергетические затраты каждой технологической процедуры. Проведен анализ конструкций промышленных грохотов. Представлены результаты исследований по влиянию степени измельчения шлаков на количество извлеченных металлических включений.

Ключевые слова: металлургический шлак, технология переработки шлаков, степень измельчения шлаков, металлические включения

Технологии дробления, измельчения и грохочения широко используются в тяжелых отраслях техники [1–3], в том числе для переработки промышленных отходов и металлургических шлаков. Отвальные доменные шлаки, переработанные (дробление, измельчение и сортировка) по стандартной технологии, используются преимущественно в строительной промышленности. Наиболее простыми в товарном отношении продуктами являются:

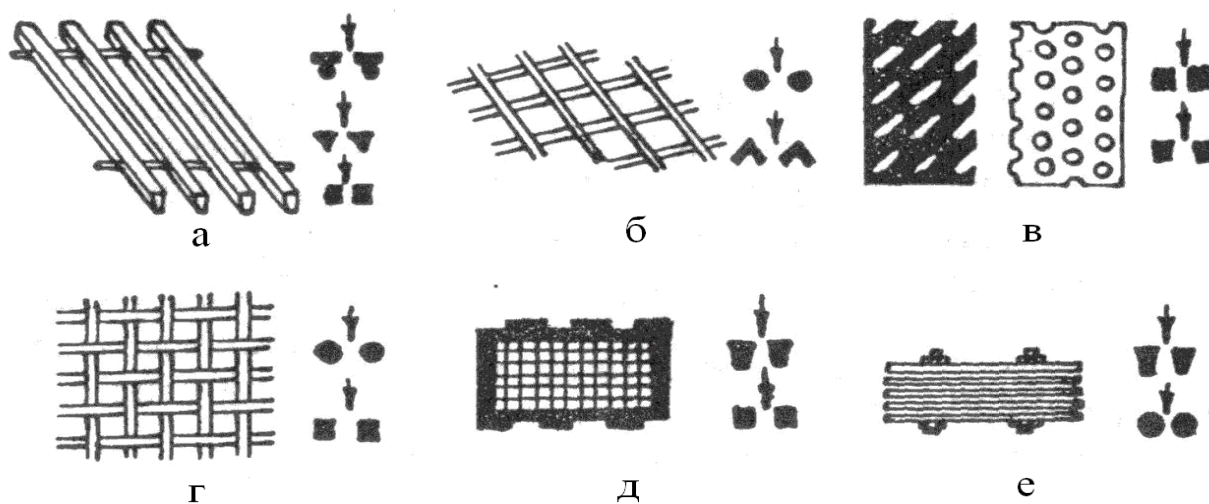
кусовый материал, щебень, гравий и песок. Более сложны в производстве шлаковая пемза, шлаковая вата, литые изделия, шлакоситаллы, граншлак, известковые и фосфорные удобрения, шлаковые наполнители для вторичных промпродуктов в различных отраслях техники и некоторые другие материалы и изделия. Дисперсные наполнители широко используются в торкреттехнологиях и системах напыления [3–5]. Предлагается использовать металлургические шлаки для каталитической очистки технологических газов от вредных и в качестве зернистых насадок для регенеративных горелочных устройств [6, 7]. Одним из наиболее ценных материалов, извлекаемых при переработке шлаков, являются металловключения, доля которых достигает 8–12 % [1, 2]. Использование металловключений в производстве первичного металла существенно снижает его себестоимость. Поэтому проблема извлечения металла из шлака является актуальной для многих металлургических предприятий замкнутого цикла. Отвальные доменные шлаки получают в результате слива шлакового расплава в накопители и последующей разработки отвала. Отвальный шлак после разработки представляет собой преимущественно кусковой материал с крупностью отдельных кусков до 100 – 120 мм. Куски большего размера составляют менее 15 % от объема всего шлака. Последовательность технологических операций при переработке металлургических шлаков и ориентировочные энергетические затраты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Последовательность технологических операций при переработке металлургических шлаков и ориентировочные энергетические затраты

№	Технологические операции	Энергетические затраты, %
1	Разливка жидкого шлака в траншею	-
2	Охлаждение массива шлака	10–15
3	Экскаваторная разработка массива	8–12
4	Отделение металлокоржей	5–15
5	Промывка кусковых материалов (при необходимости)	-
6	Первичная магнитная обработка	15–20
7	Дробление кускового материала	50–60
8	Вторичная магнитная обработка	10–15
9	Рассев дробленого материала	10–15
10	Сортировка и переработка дробленого материала	-

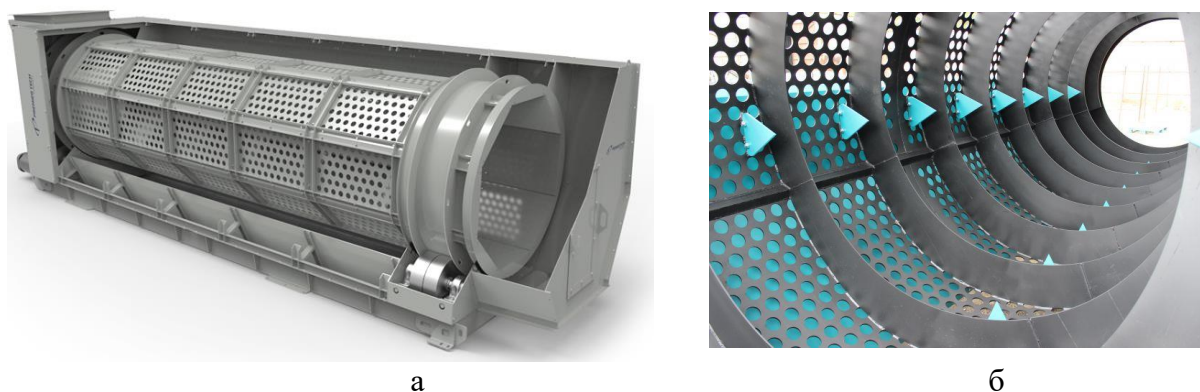
Заливка жидкого шлака в ходе плавки осуществляется в шлаковозные ковши. Разливка жидкого шлака в желоб или траншею характеризуется наиболее низкими энергозатратами в производстве дробленого материала. Она осуществляется на действующем оборудовании с помощью крановых

механизмов. Охлаждение шлакового массива требует подачи значительного количества воды или других охладителей и их механического распыливания. Сюда входит система отстойников и очистки загрязненной воды. В некоторых технологически развитых странах (Япония, страны ЕС и других) на этом производственном участке разработаны системы по утилизации теплоты расплавленного шлака. Эти системы созданы на основе теплообменников особой конструкции. Экскаваторная разработка охлажденного массива требует значительного количества энергии на дробление и разрушение охлажденного шлакового массива. Отделение металлокоржей связано с применением ручного электроинструмента и ручного труда. Доля металлокоржей превышает 50–60 % в общей массе металловключений и зависит от уровня металлургических технологий доменного процесса. Самым энергозатратным процессом является механическое дробление охлажденной кусковой массы с целью уменьшения размеров частиц и раскрытия зерен шлака для извлечения мелких металлических включений. Известно, что чем выше степень дробления шлаков, тем выше возможности магнитного извлечения железа из структуры охлажденного шлака [1–3]. Однако возможности извлечения заземленного шлаком металла ограничиваются высоким энергетическими затратами при дроблении и помоле шлака. Обязательной и достаточно энергоемкой процедурой является механическое грохочение (просеивание) дробленной массы. Внешний вид просеивающих поверхностей грохотов показан на рисунке 1. На рисунке 2 показан внешний вид промышленного барабанного грохота (сепаратора).



(а) металлические щелевидные или колосниковые решетки (живое сечение 40–70 %); (б) сварные металлические решета (живое сечение 50–70 %); (в) металлические штампованные сита и решета (живое сечение 35–40 %); (г) тканые сита из металлической проволоки, синтетического волокна (живое сечение 40–60 %); (д) литые резиновые или синтетические сита (живое сечение 40–70 %); (е) шпальтовые металлические сита (живое сечение 8–40 %)

Рисунок 1 – Просеивающие поверхности грохотов



а – внешний вид барабанного сепаратора; б – вид внутреннего пространства

Рисунок 2 – Внешний вид барабанного сепаратора

В настоящей работе представлены результаты исследования по влиянию степени измельчения металлургических шлаков на количество извлеченных металлических включений и определению оптимальной величины размеров частиц дробленого шлака.

Целью работы было исследование влияния степени измельчения шлаков на количество извлеченных металлических включений и определение оптимальной величины размеров частиц дробленого шлака.

Эксперименты проводили на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ. В работе использовали лабораторную щековую дробилку производительностью до 0,5 т/ч. Размеры приемного отверстия щековой дробилки были отрегулированы на уровне 75×100 мм. Для регулирования степени измельчения шлака ширину выходного отверстия дробилки h , мм, меняли от 5 до 15 мм. Магнитную сепарацию металловключений из шлака проводили с помощью постоянных магнитов. Результаты экспериментов представлены в форме зависимости безразмерной массы Θ_M металлических включений от размеров частиц дробленого шлака (рисунок 3).

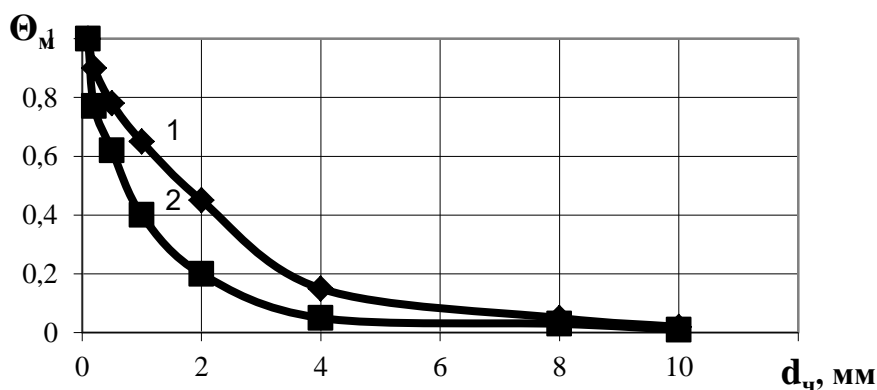
Безразмерную массу Θ_M металлических включений вычисляли по выражению:

$$\Theta_M = M_M / M_o,$$

где: M_M – масса металлических включений, соответствующая определенной степени измельчения шлака, кг;

M_o – максимальная масса металлических включений, извлеченных из дробленого шлака, кг.

Размеры частиц шлака после дробления на щековой дробилке и измельчения в дисковой мельнице определяли ситовым методом. Результаты экспериментов представлены на рисунке 3.



В позиции: 1 – доменный шлак; 2 – сталеплавильный шлак

Рисунок 3 – Влияние степени измельчения металлургических шлаков на безразмерную массу извлеченных металлических включений

Результаты экспериментов показывают существенное влияние степени измельчения металлургических шлаков на безразмерную массу извлеченных металлических включений. Процесс извлечения металлических включений обусловлен степенью раскрытия частиц кристаллизованного шлака. Защемление частиц металла формируется в процессе металлургической плавки и последующего перемешивания при выпуске шлака из печи. Как правило, защемленные металлические частицы имеют размер менее 0,5–1,5 мм. Поэтому, чтобы раскрыть эти частицы и обеспечить их магнитное извлечение из шлака, нужно зерна шлака раздробить до размеров менее 2–4 мм, сопоставимых с размерами металловключений. Если размеры частиц шлака будут более 4 мм, то магнитное извлечение металлических частиц указанных размеров будет затруднено. Оптимальный размер дробленого шлака необходимо корректировать по принципу минимизации энергетических затрат на процесс дробления, что является перспективной задачей исследований.

Библиографический список

1. Перов А.А Дробление, измельчение и обогащение полезных ископаемых/А.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко.– Москва: Недра, 1990.– 304 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. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы/ В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
5. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
6. Павлович Л.Б. Катализаторы и каталитические процессы глубокого

окисления на основе металлургических шлаков / Л.Б. Павлович, С.И. Павлович. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. – 268 с.

7. Павловец В. М. Устройства для промышленной теплогенерации / В. М. Павловец. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 218 с.

УДК 621.181

ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕШЛАМОВ И ПОЛУЧЕНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Аликперов Р.Ч., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проведена оценка технологий переработки угольных шламов и низкосортного топлива, образующихся при добыче и обогащении угля. Проанализирован ряд перспективных технологий с использованием углешламов для производства готовой продукции с высокими потребительскими свойствами.

Ключевые слова: угольные шламы, методы переработки, промышленное производство, потребительские свойства, водошламовое топливо, топливные брикеты.

При обогащении углей образуется угольный концентрат и обводненные шламы и тонкие илы (мелкодисперсный и высокозольный продукт), в твердой части которых, кроме органического вещества углей, содержится от 30 до 80 % (мас.) минеральной негорючей части [1-2]. Они также характеризуются высоким содержанием несвязанной воды (до 50 %), что накладывает отпечаток на их дальнейшую переработку. Угольные шламы по своему составу и свойствам являются неоднозначными дисперсными системами, состоящими из мелко- и крупнодисперсных частиц органической и минеральной составляющих угля, а также воды, находящейся в свободном или связнодисперсном состоянии. С позиций физико-химической механики дисперсных систем, такие шламы можно отнести к широко распространенному типу дисперсных систем коагуляционного строения. Для эффективного отделения органической части угольных шламов от минеральной составляющей предлагается использовать физико-химические поля, которые бы способствовали частичному или полному разрушению как коагуляционных, так и надмолекулярных связей в структуре дисперсной системы [2].

Переработка угольных шламов, известная из уровня техники, в настоящее время, имеет ограниченное использование. Традиционно на отечественных обогатительных фабриках угольный шлам, находящийся в шламовых водах, отделяют в пирамидальных отстойниках, в сгустительных воронках, слив которых используется как отстойная вода, возвращаемая в цикл обогащения. При этом сгущенный продукт обезвоживается на грохотах и осадительных центрифугах. Обезвоженный шлам добавляется к необога-

ценному отсеву и используется в виде некондиционного топлива, что является слабо эффективным использованием этого продукта.

Развитие техники обогащения и широкое применение угля и угольных концентратов в металлургии [2–7] и других отраслях промышленности привело к резкому увеличению шламообразования, в том числе из-за повышения зольности добываемых углей, содержания мелочи и пр. По этой причине использование механизированных отстойников оказывается уже недостаточным. Поэтому для организованного сбора шламов на обогатительных фабриках сооружаются земляные отстойники (шламонакопители), которые ухудшают экологическую обстановку в регионе. Шламонакопители занимают большие площади на территории угольных предприятий и часто за границами предприятий. Эти земли выводятся из хозяйственного оборота, при этом замораживается часть средств, вложенных в добычу и переработку угля. Угольные шламы являются сильным загрязнителем окружающей среды. В настоящее время в Кузбассе накоплено более 25 млн. т углешламов.

Актуальным направлением в этой области техники является разработка новых технологических решений, направленных на эффективную переработку угольных шламов с получением товарного продукта с улучшенными потребительскими свойствами, в том числе с применением нетрадиционных методов физико-химического воздействия.

В настоящей работе проведен анализ опытно-промышленных испытаний известных технологических схем получения водношламового топлива (ВШТ) и топливных брикетов [2].

Указанные топливные продукты являются альтернативным топливом для предприятий промышленной теплоэнергетики и некоторых промышленных технологий. Брикеты можно использовать в качестве местного топливного сырья, в том числе, для бытовых топок, работающих в слоевом режиме горения. Известно, что промышленные исследования сжигания ВУТ на Абагуровской аглофабрике ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» (г. Новокузнецк) показали высокую эффективность использования этого вида топлива в металлургии. Его применяли в качестве вспомогательного топлива для работы мазутных зажигательных горнов. Испытания показали, что факел на основе ВУТ имел стабильные характеристики при совместной работе мазутных форсунок и обеспечивал устойчивость зажигания коксика и формирования зоны горения в аглошихте. При этом было зафиксировано повышение прочности агломерата на 3–5 % за счет цементации спека золошлаковыми частицами, что дополнительно повышает технологическую ценность этого вида топлива.

На первом этапе работы по совершенствованию технологии переработки шламов разработчики предлагают мероприятия по улучшению технических характеристик исходных шламов [1-2]. В результате исследования была показана принципиальная возможность обогащения шламов путем применения УЗ-обработки. Технические параметры шламов, конечного продукта и удаленной части материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры шламов после применения УЗ обработки (цифры соответствуют исходному шламу, конечному продукту и удаленной части соответственно)

№	Обогатительная фабрика	Температура начала разложения, °С	Теплота сгорания, МДж/кг	Зольность, %
1	ЦОФ «Донецкая»	470/498	21,5/24,2/-	32/24/-
2	ЦОФ «Замчаловская»	510/532	20,7/25,1/-	37/24/-
3	ОФ «Обуховская»	498/514/490	20,5/21,5/19,5	39/36/42
4	ОФ «Спутник»	240/270/180	23,1/28,4/16,8	23/12/44

Видно, что УЗ-обработка позволяет снизить зольность углешламов, что в свою очередь повышает теплоту горения этого вида топлива. На основании выполненных экспериментов, авторы [2] пришли к выводу, что по технико-экономическим параметрам шламов, пригодными для использования в энергетике и коммунально-бытовом хозяйстве являются ВШТ с $A_d < 30\%$ и содержанием воды $< 45\%$. Таким образом, для приготовления ВШТ без предварительного обеззоливания могут быть использованы только малозольные и мало обводненные угольные шламы (рисунок 1).

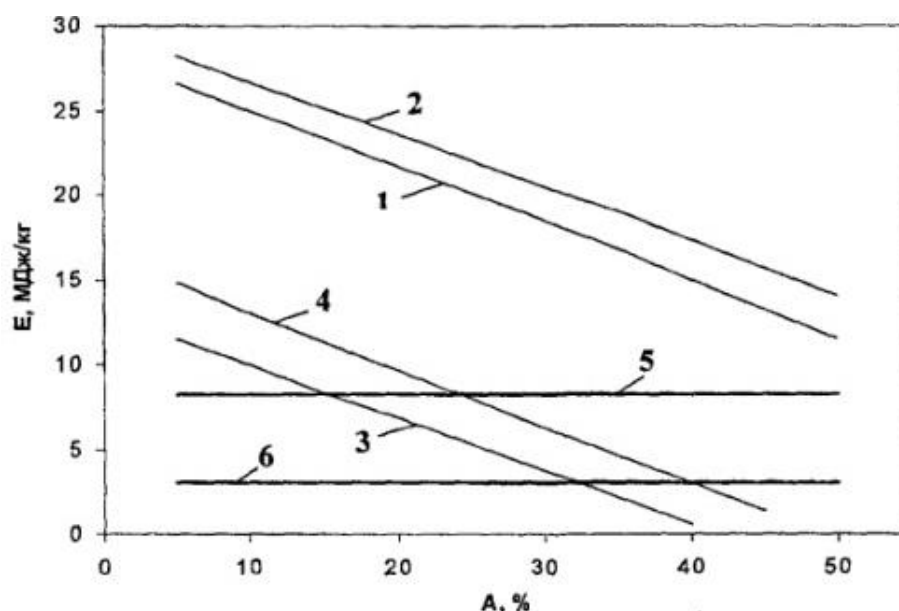
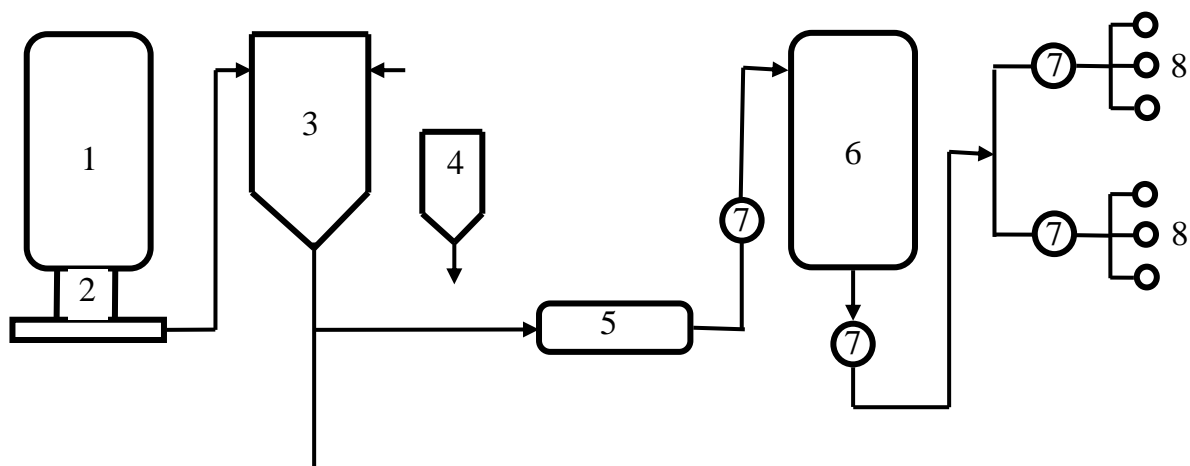


Рисунок 1 – Теплота сгорания топлива в зависимости от его зольности и содержания воды: 1 – $C = 95\%$; 2 – $C = 95\% + 5\%$ гудрона; 3 – $C = 55\%$, $q = 30$ МДж/кг; 4 – $C = 55\%$, $q = 40$ МДж/кг; 5 – пороговое значение рентабельной продуктивности угля для производства электроэнергии; 6 – пороговое значение рентабельной продуктивности угля для производства тепловой энергии

Из практики работы предприятий теплоэнергетики известно, что подготовленные таким образом шламы и угольная мелочь повышают культуру сжигания топлива, улучшают экологические характеристики отходящих газов и снижают себестоимость вырабатываемой тепловой энергии.

Наиболее проста в технологическом исполнении схема приготовления ВШТ без предварительного обогащения (рисунок 2).

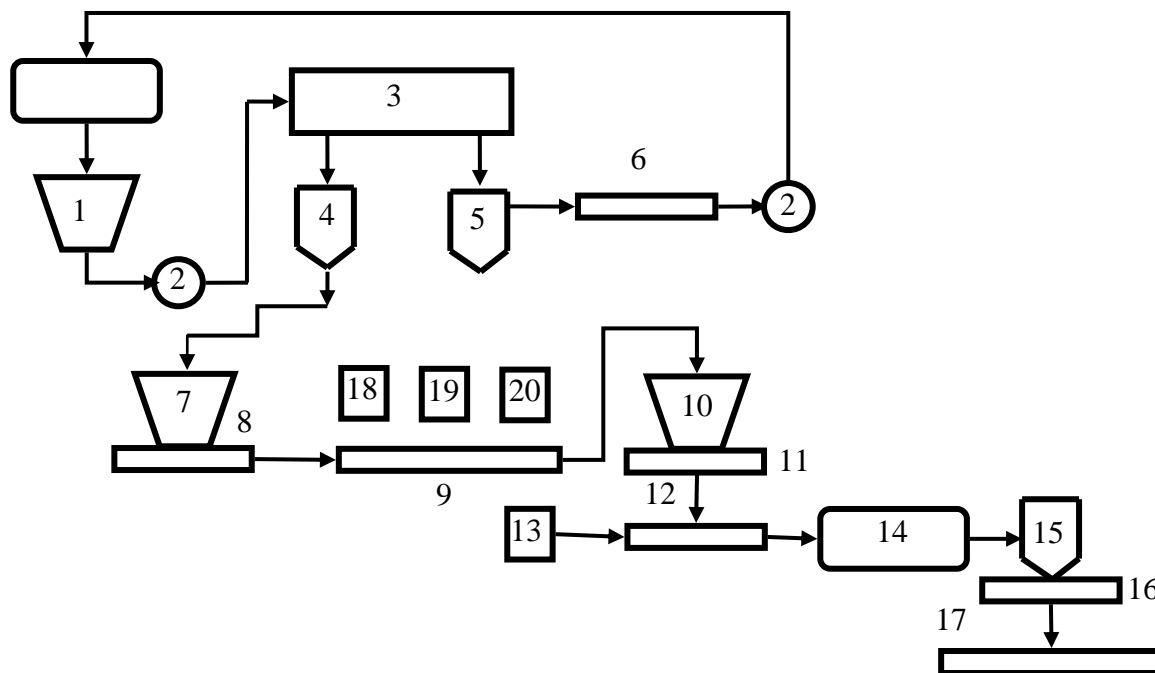


1 – вибробункер; 2 – вибропитатель; 3 – вибромельница;
4 – дозаторпитатель; 5 – гомогенизатор; 6 – накопительная емкость;
7 – насос; 8 – распылительные форсунки

Рисунок 2 – Технологическая схема приготовления ВШТ без предварительного обогащения

В этой схеме наиболее важным аппаратом является гомогенизатор, в котором смесь должна быть стабилизирована механическим воздействием или применением химических стабилизаторов.

Технологическая схема приготовления топливных брикетов в режиме предварительного обогащения шламов является более сложной (рисунок 3). На первом этапе производства реализуется двухступенчатое обогащение шламовой суспензии. В эту схему включено обезвоживание, механическое центрифугирование, осветление и активация концентрата. Производство топливных брикетов организовано на вальцовых прессах, являющихся наиболее удобным оборудованием в поточном производстве. Технология предполагает упрочняющую низкотемпературную термообработку сырых брикетов. В производстве брикетов очень важен выбор связующего материала. Для топливных материалов это должен быть материал органического происхождения, образующий минимальное количество золы после сжигания. Это наиболее часто применяемые добавки: СДБ, КУС, гудрон и некоторые другие углеводородные компоненты. В некоторых известных технологиях в состав шламовых брикетов предлагается вводить отходы деревообрабатывающего производства, отсеvy угольной мелочи энергетического угля.



1 – бункер суспензии шлама; 2 – насосы; 3 – аппарат обезвоживания шлама с обогащением первой ступени; 4 – фильтрующая центрифуга ($W = 9-15 \%$); 5 – осветлитель воды; 6 – приемник осветленной воды; 7 – бункер концентрата с вибрационным активатором; 8 – вибрационный питатель; 9 – мельница-активатор; 10 – расходный бункер; 11 – шнек; 12 – вальцовый пресс; 13 – элеватор; 14 – камера выдержки и закалки брикетов; 15 – бункер готовой продукции; 16 – вибрационный питатель; 17 – реверсивный конвейер; 18 – расходная емкость; 19 – смеситель; 20 – емкость для связующего

Рисунок 3 – Технологическая схема брикетирования шлама из суспензии шлама

Введение других отходов органического происхождения существенно повышает потребительские свойства топливных брикетов. В схему цепи аппаратов должен быть включен гомогенизатор, в котором брикетируемая смесь также должна быть стабилизирована.

В работе [2] экспериментально доказано, что с увеличением количества углеводородной добавки от 5 до 9–12 %, возрастает водоотделение и улучшаются технические показатели брикетов. Брикетирование полученного таким образом гидрофобизата можно проводить при 70–90 °С с получением брикетов требуемой прочности, в то время как традиционно, этот процесс проводится при 250–500 °С. Термическая обработка способствует повышению механической прочности брикетов примерно на 10–15 % (таблица 2). Зольность шламов и теплотехнические показатели брикетов существенно зависят от фракционного состава дисперсной фазы и режима измельчения. Коэффициент полидисперсности слабо зависит от продолжительности измельчения и содержания воды, но удельная поверхность частиц шлама линейно растет со временем измельчения. Понижение вязкости высококонцентрированных дисперсных систем достигается введением разжижающих добавок.

Таблица 2 – Влияние механообработки (энергонапряженность 150 кВт/м³) на влажность гидрофобизата и физико-механические свойства брикетов из шлама ЦОФ «Донецкая» с добавкой гудрона

№	Количество добавки, %	Влажность гидрофобизата, %	Теплота сгорания брикетов, МДЖ/кг	Прочность на сжатие, МПа	Влагоемкость в течение суток, %
1	5	9,7	27,5	2,13	3,6
2	9	8,5	28,6	2,30	2,0
3	12	7,0	29,2	2,32	1,9
4	15	7,0	29,7	2,34	1,8

С позиции физико-химической механики дисперсных систем установлено, что при виброизмельчении шламов (Т:Ж=1:1–1:3) минеральная часть концентрируется во фракции – 63 мкм. В конечном продукте наблюдается ее снижение в 1,5–2 раза по сравнению с исходным шламом.

Показано, что при обработке водных суспензий угольных шламов (Т:Ж=1:5–1:8) ультразвуковым воздействием (20 кГц, 0,5–1,0 Вт/см²), минеральная часть на основе глинистых компонентов удаляется в виде фильтрата с содержанием до 80 % этого наполнителя. Применение физико-химического многочастотного воздействия (частота 1–2500 Гц, ускорение 800–1000 G и амплитуда колебания 0,1–10 мм) на водные суспензии шламов на сетках 40–70 мкм позволяет выделить до 90 % твердой минеральной составляющей.

Библиографический список

1. Агроскин А.А. Химия и технология угля / А. А. Агроскин. – Москва: Недра, 1989. – 240 с.
2. Серегин А.И., Горлов Е.Г. Разработка технологических схем переработки угольных шламов в товарную продукцию // Горный информационно-аналитический бюллетень. – МГГУ. – 2008. – №5. – С 241 – 244.
3. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
5. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
6. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
7. Патент № 2782895 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2022086961/02, Заявл. 31.03.2022; Опубл. 07.11.2022. Бюл. №31 //Изобретения. Полезные модели. 2022. – №31.

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕШЛАМОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Аликперов Р.Ч., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проведена оценка технологий комплексной переработки низкосортного топлива и углешламов обогатительных предприятий Кемеровской области. Показана роль отходов обогащения угля в структуре энерго- и ресурсосбережения. Представлены технологические схемы переработки углешламов и получения на их основе востребованной промышленной продукции.

Ключевые слова: отходы обогащения угля, промышленное производство, схемы переработки, перспективы углепереработки.

Уголь и промпродукты на его основе являются сырьевой и энергетической базой для получения разнообразных химических и топливных продуктов в теплоэнергетике, химической и огнеупорной промышленности, металлургии и в других отраслях техники [1–4]. В Кемеровской области добывается более половины всего угля РФ и проводятся масштабные организационно-технические мероприятия по комплексной переработке топлива и отходов, образующихся при его добыче, обогащении и сжигании. В настоящее время в администрации КО разработана и реализуется Стратегия развития кластера «Комплексная переработка угля и техногенный отходов» на 2022 – 2030 годы, реализуемая ГАУ КО «Малый бизнес». Эта перспективная программа содержит три основных направления: добыча и переработка газа (метана) из угольных пластов с получением сжиженного природного газа (СПГ) и компримированного природного газа (КПП); глубокая переработка угля и отходов его обогащения с получением обогащенного угля (углеконцентрат), кокса, пылеугольного топлива, водоугольного топлива, гуминовой кислоты и углеродных сорбентов; переработка золошлаковых и прочих техногенных отходов с получением полиэтиленовых и полипропиленовых гранул, резинотехнических изделий, стройматериалов и сопутствующих продуктов переработки техногенных отходов. Созданный кластер является структурной частью крупнейшего в РФ территориально-производственного комплекса в угольной промышленности и объединяет ведущие предприятия угледобычи, углеобогащения и предприятия, использующие уголь в качестве источника тепловой энергии и для реализации промышленных технологий (теплоэнергетика, ЖКХ, металлургия, углехимия). В научно-образовательный блок кластера входят ведущие научные и научно-образовательные учреждения КО, включая ФГБОУ ВО СибГИУ. Кроме этого, правительством КО создан НОЦ «Кузбасс», одним из направлений деятельности которого является

комплексная переработка низкосортных углей и отходов углеобогащения. Задачи комплексной переработки низкосортного угля включают: разработку технологий производства товарных сжиженных газов из низкокалорийных газов; использование отходов углеобогащения для попутной выработки электрической и тепловой энергии в непосредственной близости от угольного предприятия; разработку и создание сорбентов из энергетических углей; разработку технологии получения нового вида сырья для производства углеродных волокон и композиционных материалов в присутствии химических растворителей; разработку технологии получения концентратов оксидов редкоземельных металлов и рассеянных элементов из углеотходов и золошлаков предприятий ТЭК Кузбасса; разработку технологии выделения гуминовых и битумных веществ с целью получения экологически чистых удобрений, противопыльных препаратов и связующих для брикетирования; разработку и создание теплофикационных установок и теплогенераторов для сжигания низкосортных углей, углеродсодержащих отходов и шахтного метана.

Согласно разработанной Стратегии в Кемеровской области в ближайшие 5 лет предполагается построить 14 различных угольных предприятий. На данный момент строятся: разрез «Кузнецкий Южный» в Мысках; разрез «Чернокалтанский» (АО «СУПК») в Новокузнецком районе; угольная шахта «7 Ноября-Новая» в Беловском районе; обогатительная фабрика «Шахта № 12» в Киселёвске. В ближайшие 3–5 лет на территории Кузбасса должны быть построены дополнительно 10 угольных предприятий. Большинство из них – обогатительные фабрики (ОФ). В Прокопьевском и в Новокузнецком районах, по заданию Министерства угольной промышленности КО, построят шахту «Глубокая-Южная», ЦОФ «Энричевская», ОФ «Галдинская» и ОФ «Котинская». В Беловском районе появится ОФ «Каскад-3», а в Беловском городском округе – ОФ «Бачатская-Энергетическая – 2». Крупную обогатительную фабрику, «Убинскую», откроют в Гурьевском муниципальном округе. А в Новокузнецком районе в ближайшие 3–5 лет запустят три обогатительные фабрики: «Корчакольскую», «Тайлепскую» и «Галдинскую-Энергетическую». Закономерно, что основное внимание в развитии угольной отрасли Кузбасса уделяется глубокой переработке и обогащению угля, – говорится в официальных документах Министерства угольной промышленности Кузбасса. Предполагается, что возле Междуреченска появится новый разрез. Перспективный участок земли недалеко от Междуреченска Сибнедра выставили на торги для освоения угольного месторождения. Общая площадь территории – 10,99 км² (почти 1100 га). Победитель аукциона – АО «Разрез Распадский» – получил право добывать качественный уголь на этом участке в течение 20 лет. По информации Сибнедр, здесь залегают больше 145 тысяч тонн угля марок «КО», «КС», «Т», «А».

Принципиальная схема получения угольного концентрата для металлургических технологий в классической схеме обогащения угля представлена на рисунке 1.

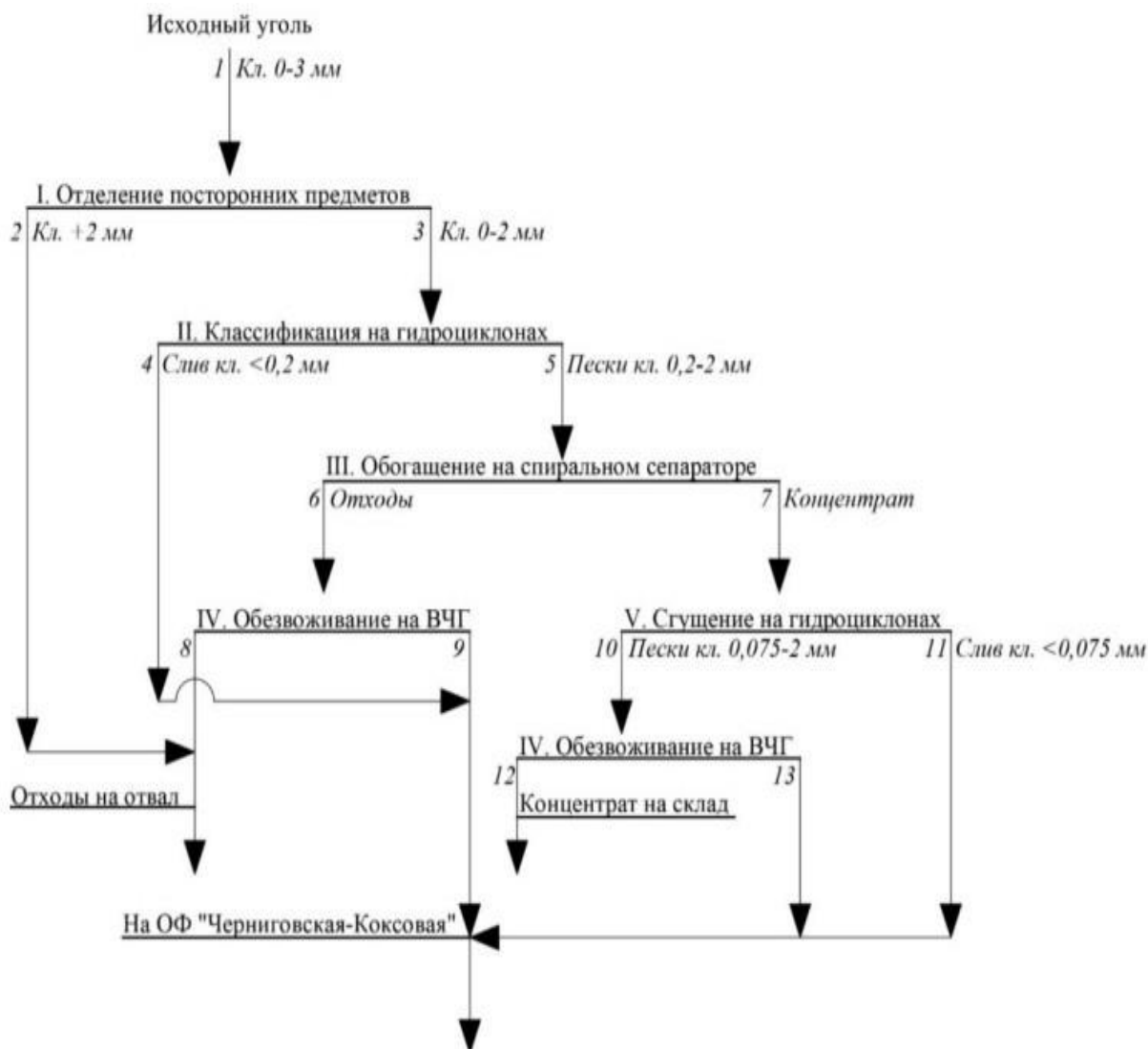


Рисунок 1 – Технологическая схема получения угольного концентрата

Основной задачей обогащения угля является повышение содержания горючих элементов топлива в концентрате и улучшение его потребительских свойств, включая улучшение логистики. Повышенный комплекс свойств необходим для последующей химической или термохимической переработки. Побочным продуктом обогащения угля являются угольные шламы, которые в большей части содержат золошлаковые отходы и, в меньшей части, некоторую долю востребованных горючих компонентов (таблица 1). Процедуру обогащения можно организовать и для угольных шламов, извлекая из них полезные элементы. На первоначальном этапе переработки угольных шламов организуется отделение угольной составляющей от жидкой фазы путем сгущения в поле центробежных сил. На последующем этапе переработки включается в работу механические способы классификации и обезвоживания за счет высокочастотных колебаний грохота и центробежного разделения материалов. В процессе обогащения, как углей, так и угольных шламов, активно участвует твердожидкостная среда.

Таблица 1 – Технический состав угольных шламов

Наименование показателя	Шлам угля марки:	
	К	Г
Влага аналитическая, %	1,44	1,35
Зольность, %	34,5	38,0
Высшая рабочая теплота горения, кДж/кг	35500	34250
Выход летучих, %	27,85	40,85

В результате переработки получают два полупродукта – сгущенный угольный шлам, представляющий собой суспензию с содержанием твердой фазы до 60–75 % и технической воды, требующей очистки. Отделенный угольный шлам перерабатывается в зависимости от дальнейшего применения (ВУТ, сырье для коксования, полукоксования, угольные наполнители для химпродуктов, твердые энергетические топлива, брикеты и т.д.). Внешний вид топливных брикетов со сложной структурой имеет разнообразную форму и показан на рисунке 2.



а



б



в

Топливные брикеты: а – брускового типа (евродрова);
б – цилиндрического; в – с отверстием

Рисунок 2 – Внешний вид топливных брикетов

Наиболее ценной частью углешламов являются органические составляющие, которые способны формировать теплогенерацию в котлоагрегатах слоевого горения. Особенно востребованы угольные шламы в форме прочных угольных брикетов, способных усилить газопроницаемость слоя при горении базового энергетического топлива, находящегося в тонкодисперсном состоянии. Угольные брикеты можно получать в виде окускованных материалов разнообразной формы: орехо – и подушкообразной формы, цилиндров, брэксов и др. Они могут быть однородными или содержать порообразующие включения и крупные проницаемые каналы для окислителя. Для производства топливных брикетов методом прессования в качестве пластификаторов можно использовать измельченные древесные опилки и древесную муку с размером частиц до 0,1 мм. В качестве связующего целесообразно использовать материалы органического происхождения, в процессе горения которых

образуется минимальное количество золы и вредных выбросов. Для этой технологии можно использовать сульфит-дрожжевую бражку (СДБ), каменноугольную смолу (КУС), нефтебитумы и гудроны [1, 4–7]. Наиболее рациональным связующим является СДБ, которая является отходом целлюлозно-бумажного производства и относится к сравнительно дешевым материалам. КУС является достаточно вязким материалом, поэтому для ее использования в технологии брикетирования и облегчения смешивания компонентов необходимы органические растворители или подогрев. В состав топливных брикетов, кроме связующего, может быть введена угольная мелочь, образующаяся после механической подготовки топлива, и различные органические отходы производства в форме мелкодисперсного сыпучего материала, повышающего теплотехническую ценность брикетов. Использование органической основы углешламов можно рекомендовать в качестве нетрадиционного восстановителя в металлургических технологиях [8–9].

Особую ценность топливные брикеты представляют для производственных котельных малой тепловой мощностью, обслуживающих угольные предприятия и небольшие компании. Они особенно эффективны при замене угольной мелочи на топливные брикеты. Процесс слоевого горения топливных брикетов характеризуется высокой газопроницаемостью слоя брикетов и стабильностью горения с минимальным физическим и химическим недожогом топлива.

К угольной отрасли в сфере техносферной безопасности также можно отнести переработку золошлаковых отходов (ЗШО) ТЭЦ, образующихся после масштабного сжигания угля на ТЭЦ и промпродуктов на основе углешламов. Это также отмечено в Стратегии «Комплексная переработка угля и техногенных отходов». Переработка ЗШО позволяет расширить сырьевую базу многих промышленных производств и решить экологические проблемы в промышленной теплоэнергетике [1-2]. По своим минеральным свойствам золошлаковые отходы – ценное сырье для использования в металлургии, машиностроении, строительстве, химии с дополнительным получением коммерческой прибыли. Золошлаковые отходы могут использоваться как добавки и наполнители при производстве широкого спектра строительных материалов: песка, цемента, бетонов, растворов, обмазок, смесей, кирпича, тротуарной плитки, керамических дренажных труб и различных формованных изделий разнообразного технологического и строительного назначения. Имеются положительные примеры сооружения типовых жилых и производственных зданий из ячеистых бетонов на основе ЗШО. Их применяют при производстве пористых утеплителей и заполнителей (безобжиговый гравий, азерит, зольный гравий, уплотнительных мастик и др.). В огнеупорной промышленности ЗШО применяют в качестве наполнителей для огнеупорных бетонов, вяжущих добавок, обмазок, утеплителей, теплоизоляторов и других материалов. Практика показывает, что в настоящее время в сфере производства существует значительное количество доступных технологических

устройств и оборудования для производства востребованной продукции на основе отходов. При этом нет технических или юридических ограничений на использование подобного рода технологий и оборудования, что позволяет прогнозировать успешную коммерческую реализации любой технологии переработки ЗШО в промышленности.

Библиографический список

1. Агроскин А.А. Химия и технология угля / А. А. Агроскин. – Москва: Недра, 1989. – 240 с.
2. Теплогенерирующие установки / Г.Н. Делягин [и др.]. – Москва: ИД «Бастет», 2010. – 624 с.
3. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 284 с.
5. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
6. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
7. Павловец В.М. Особенности упрочнения рудоугольных окатышей струями сжатого воздуха / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 8. – С. 22 – 25
8. Павловец В.М. Исследование процесса брикетирования железорудных материалов, содержащих в качестве нетрадиционного восстановителя отработанное минеральное масло / В.М. Павловец, К.И. Домнин // 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.
9. Патент № 2750432 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ получения окатышей / В.М. Павловец – № 2020133386/02, Заявл. 09.10.2020; Опубл. 28.06.2021. Бюл. №5 // Изобретения. Полезные модели. 2021. – №19.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ОБЪЕМНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ ШИХТЫ И ПОРИСТОСТЬЮ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Платова Г.А., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проанализирована роль объемных изменений напыленного слоя шихты в формировании пористости и структуры железорудных окатышей. Показаны возможности повышения реакционной способности окускованного металлургического продукта за счет формирования открытой пористости. Сформулированы условия оптимизации поровой структуры и предложены методы получения железорудных окатышей с улучшенными металлургическими свойствами.

Ключевые слова: структурные изменения, реакционная способность, окускованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, пористость, структурная корреляция.

Многочисленная практика технологий напыления в различных отраслях техники показывает, что напыленные материалы формируют особый структурный рисунок на поверхности обрабатываемых изделий [1-2]. В металлургической технологии принудительного зародышеобразования, основанной на технике напыления, уплотненные шихтовые материалы имеют сложные объемные изменения на поверхности зародышевых центров [3-4]. В качестве силового и формообразующего средства в этой технологии используется воздушно-шихтовая струя (ВШС) на основе холодного или нагретого до 100–150 °С компрессорного воздуха, которая позволяет сформировать влажный напыленный слой (НС) шихты на гарнисаже, металле, резине или шихтовой поверхности. Ближайшей аналогией этого процесса является торкретирование теплозащитных футеровок металлургических печей, положенное в основу разработанной технологии [5]. Объемные изменения на поверхности напыления представлены структурными углублениями и шихтовыми наплывами, формирующими специфический волнообразный рельеф поверхности. Они появляются в результате деформации и течения влажной шихты на поверхности НС, вследствие чего формируется волнообразный или столбчатый рельеф поверхности с чередованием углублений и шихтовых наплывов (рисунок 1, а).

Эти структурные изменения имеют различные геометрические размеры, форму, расположение, извилистость и могут быть одной из внешних характеристик процесса, позволяющей идентифицировать процесс порообразования в глубине зародыша с поверхностными изменениями [6]. Структурные углубления НС представляют собой концентрические слабоизвилистые

каналы, располагающиеся по круговой траектории вокруг оси круглого с коническим профилем НС (при угле атаки струи β , равном 90^0). Эти каналы, как правило, замкнутые друг на друга, но русло некоторых из них имеет переменную глубину. На фотографиях поверхности шлифа или при увеличении они отображаются темными линиями шириной от 0,1 до 2,5 мм. Ширина шихтовых напылов или столбов имеет более существенную величину: от 1 до 5 мм. Структурные углубления представляют собой специфическую первичную пористость в поверхностном слое НС. Форма шихтовых напылов имеет покатую поверхность со стороны атаки ВШС и крутой наклон с обратной (теневой) стороны.



Рисунок 1 – Макроструктура напыленного слоя шихты до – а и после – б заливки расплавленным парафином

Было установлено, что характер объемных изменений зависит от давления воздушношихтовой струи, влажности материала, крупности частиц и некоторых других технологических факторов [6]. Многочисленными экспериментальными исследованиями установили, что подобные структурные изменения и специфический характер силового воздействия на шихту являются первопричиной для формирования проницаемой для газов открытой пористости материалов, которая не залечивается даже после высокотемпературного обжига. В свою очередь проницаемые поры существенно увеличивают реакционную способность окискованного металлургического сырья в ходе металлургической плавки. Объемные изменения на поверхности зародышей формируют поровые каналы, которые при формообразовании заполняются влажной шихтой и являются основой для формирования общей и открытой пористости. Объемные изменения позволяют установить структурную идентичность и корреляцию между макрорельефом НС и поровой структурой зародышевой массы, а затем и окатышей. Поскольку массовая доля зародышей в структуре окатышей может достигать 90 %, то свойства окатышей в целом определяются свойствами зародышевой массы. Поэтому характер и геометрические размеры объемных изменений также могут представлять научный интерес, поскольку вероятно существует корреляционная зависимость между объемными изменениями на поверхности напыления и пористостью зародышей, сформированных техникой напыления. Практический интерес может быть и у производителей, которые могут получить

дополнительный фактор для управления процессами структуро- и формообразования в производстве железорудных окатышей.

Целью работы было установление структурной корреляции между видимыми объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью и обоснование механизма формирования структуры и пористости зародышевой массы.

Для решения поставленной задачи вычисляли фактор структурной корреляции Φ между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты Θ_v , доли ед, и пористостью зародышей, Π , доли ед., по выражению:

$$\Phi = \Theta_v / \Pi, \quad (1)$$

Относительный объем структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты Θ_v вычисляли по выражению:

$$\Theta_v = \sum V_{cy} / V_o, \quad (2)$$

где $\sum V_{cy}$ – суммарный объем структурных углублений на поверхности НС, м³;

V_o – объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором располагаются структурные углубления, м³.

Суммарный объем структурных углублений на поверхности НС, $\sum V_{cy}$, м³, вычисляли по выражению:

$$\sum V_{cy} = V_{cy} \times N = 0,25 \times \pi \times K \times h_o \times b_o \times d_{nc} \times N \quad (3)$$

где V_{cy} – объем структурного углубления в среднем сечении радиуса (0,5 R_{nc}) кругового напыленного слоя шихты, м³;

N – среднее количество структурных углублений, определяемое по количеству концентрических теневых каналов в НС [1, 2];

K – коэффициент, учитывающий сложность рельефа структурных углублений на поверхности НС;

h_o, b_o – среднее значение высоты и ширины структурных углублений, м [1, 2];

d_{nc} – среднее значение диаметра напыленного слоя шихты, м [1, 2].

Объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором располагаются структурные углубления, V_o , м³, в первом приближении приняли равным объему цилиндра диаметром d_{nc} и высотой h_o . Его рассчитывали по формуле:

$$V_o = 0,25 \times \pi \times (d_{nc})^2 \times h_o. \quad (4)$$

После подстановки выражений 3 и 4 в формулу 2 выражение для Θ_v примет вид:

$$\Theta_v = K \times N \times b_o / d_{nc}, \quad (5)$$

Параметры N, b_o, d_{nc} были определены ранее и опубликованы в источ-

никах [1–4]. Величина коэффициента K была вычислена по экспериментальным данным, используя оригинальную авторскую методику. Для этого напыленный слой шихты вместе с напыляемой основой (металлическая пластина) сушили ($t=105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=20$ мин) и обжигали в нагревательной печи при температуре $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ для придания ему прочности. После охлаждения НС в его среднем сечении ($0,5 R_{\text{НС}}$) на поверхности находили кольцевое концентрическое углубление (рисунок 1, а), которое заполняли расплавленным парафином. Парафин растекался по углублению, затвердевал, формируя контрастное русло на поверхности НС (рисунок 1, б). После затвердевания парафина, его извлекали из структурного углубления и определяли объем $V_{\text{п}}$, м^3 . Коэффициент K вычисляли по выражению:

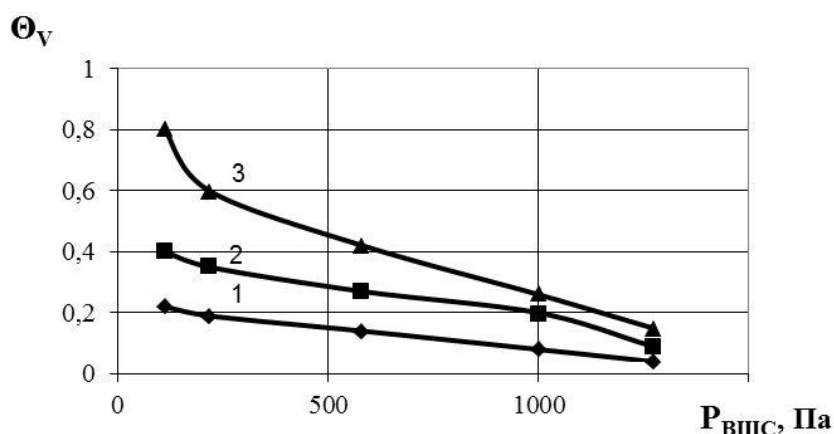
$$K = V_{\text{п}} / (0,25 \times \pi \times h_0 \times b_0 \times d_{\text{НС}}).$$

После экспериментов и вычислений установили, что величина K зависит от $R_{\text{ВШС}}$ и влажности напыляемого материала (таблица 1). В расчетах использовали среднее значение K .

Таблица 1 – Значение коэффициента K

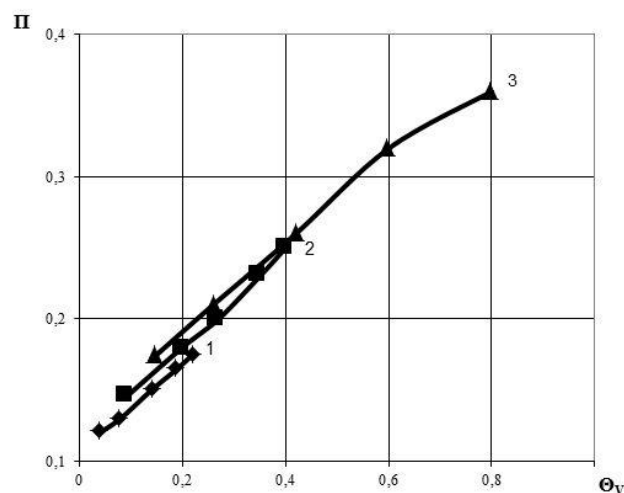
№	Давление ВШС, Па	Значение коэффициента K при влажности напыляемой шихты, %:		
		5,0	7,5	10,0
1	100–400	1,0–1,1	1,1–1,2	1,1–1,3
2	400–700	1,1–1,2	1,2–1,3	1,3–1,4
3	700–1000	1,2–1,3	1,3–1,4	1,4–1,6
3	1000–1400	1,3–1,4	1,4–1,5	1,5–1,8

Визуализация процесса заполнения поверхностных углублений расплавленным парафином позволяет уточнить рельеф поверхности НС, измерить величину структурных напылов и углублений и определить направление течения массы по руслу углублений на поверхности НС, что позволяет детализировать механизм формирования пористости зародышевой массы. Результаты экспериментов приведены на рисунках 2–4.



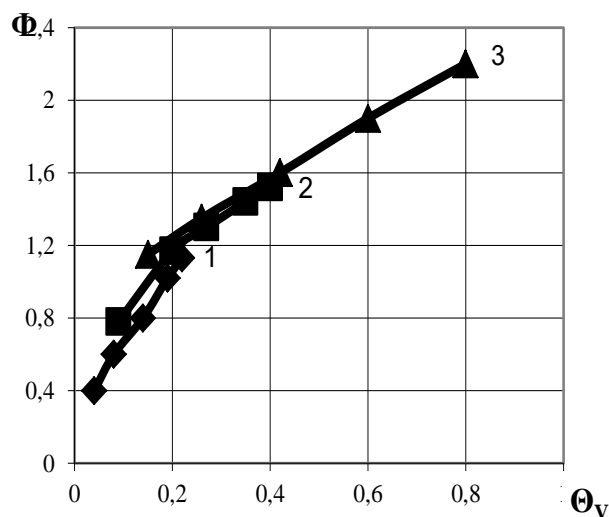
Влажность шихты, %: 1–5,0; 2–7,5; 3–10,0

Рисунок 2 – Зависимость параметра Θ_v от давления ВШС



Влажность шихты, %: 1–5,0; 2–7,5; 3–10,0

Рисунок 3 – Зависимость пористости НС от параметра Θ_v



Влажность шихты, %: 1–5,0; 2–7,5; 3–10,0

Рисунок 4 – Зависимость фактора структурной корреляции Φ от параметра Θ_v

Зависимость параметра Θ_v (рисунок 2) от давления ВШС показывает, что с ростом $P_{ВШС}$ объем структурных углублений на поверхности НС уменьшается, особенно резко в интервале давлений $P_{ВШС}$, равном 100-600 Па. Эта тенденция относится и к шихтам с низкой влажностью ($W=5,0$ и $7,5$ %). Напротив, рост относительного объема поверхностных углублений НС практически линейно приводит к росту пористости напыленного слоя шихты и зародышевой массы, сформированной на его основе, для всех значений влажности (рисунок 3). Озвученные результаты в некоторой степени дублируют результаты, полученные ранее [1–4], и в общем виде характеризуют количественные параметры корреляции между Θ_v и Π . В результате вычислений установили, что фактор структурной корреляции Φ изменяется от 0,4 до 2,2 (рисунки 4, 5), что привело к необходимости весь массив полученных результатов разделить на две области. В первой области полученных

данных величина Φ соответствует условию $\Phi \geq 1$. Эта область результатов соответствует относительно низким давлениям ВШС и более высокой влажности шихты ($P_{\text{вшс}} \leq 580$ Па для $W=5\%$ и $P_{\text{вшс}} \leq 1100$ Па для $W=7,5\%$). К этой области относится и весь интервал давлений ВШС для шихт с влажностью $W=10\%$. Это значит, что области указанных значений $P_{\text{вшс}}$ и W на поверхности НС относительный объем структурных углублений ($\Theta_v = 0,14-0,81$) существенно превышает пористость ($\Pi = 0,12-0,36$) зародышевой массы ($\Theta_v \geq \Pi$) и величина пористости закономерно уменьшается от поверхности к центру НС. Это объясняется тем, что в непрерывном производстве объемные полости при напылении заполняются материалом, и происходит уменьшение их свободного объема. Пористость внутри структурных углублений формируется в результате действия многочисленных факторов: перекрытия углубления шихтой, надвига наплывов, пластического течения массы, растворения-осаждения, разломов-расслоений и других факторов [1–4]. Поэтому величина пористости после напыления становится значительно меньше Θ_v . В этой области значений Φ , Θ_v и Π , представленных на рисунках 3 и 4), можно считать, что величина Π коррелирует с Θ_v , по зависимости, близкой к линейной. Во второй области значений Φ , Θ_v и Π величина $\Theta_v \leq \Pi$, что соответствует условию $\Phi \leq 1$. Это в основном область более высокого давления ВШС и пониженной влажности шихты ($P_{\text{вшс}} \geq 580$ Па для $W=5\%$ и $P_{\text{вшс}} \geq 1100$ Па для $W=7,5\%$). В этой области нет ожидаемой корреляции между Θ_v и Π . Это значит, что на поверхности НС объем структурных углублений меньше пористости зародышевой массы ($\Theta_v \leq \Pi$) и величина пористости растет от поверхности к центру НС. Это объясняется особенностями аэродинамической картины на поверхности НС, искажающей условия корреляции [1–4]. Особенностью аэродинамики напыления является то, что в этой области давлений ВШС превалирует статическое давление струи, препятствующее формированию структурных изменений на поверхности НС, за которые ответственно динамическое давление ВШС. Вероятно, по этой причине появляются сдвиговые усилия, ответственные за формирование пористости в глубинной структуре зародышей. При этом механизм формирования пористости НС близок к механизму формирования структуры по условиям механического прессования [7, 8]. Механизм формирования структуры и пористости в режиме напыления шихты существенно отличается от формирования структуры окатышей, получаемой в стандартной технологии в режиме переката. Однако для обсуждаемой проблемы можно найти некоторые аналогии из практики производства окатышей. Качественная взаимосвязь между объемными изменениями на поверхности окатышей и их пористостью подтверждается практикой производства окатышей. В частности, если влажность комкуемой шихты на окомкователе превышает ее оптимальное значение ($W \geq 9-10\%$), то режим переката нарушается и окатыши получаются бесформенными и грязеподобными с объемными структурными изменениями на их поверхности, формирующими повышенную пористость и не позволяющими гранулам активно уплотняться [1, 2]. Для этого случая в

первом приближении можно считать, что между поверхностными изменениями и пористостью окатышей существует качественная корреляция, требующая корректировки технологического режима. Безусловно, этот факт требует экспериментального доказательства, поскольку на структуру окатышей влияет режим увлажнения [9, 10], что является ближайшей задачей исследования. При оптимальном значении влажности железорудной шихты при окомковании в режиме переката сырые окатыши имеют минимальные структурные изменения на своей поверхности, но пористость годных окатышей для этого режима технологии достаточно высокая (20–28 %). То есть, структурные изменения на поверхности окатышей минимальные, но пористость в структуре гранул достаточно высока, что близко выводам, сделанным для второй области значений Φ , которая не соответствует принципам прямой корреляции между Θ_v и Π . Ввиду сложности и многофакторности этих процессов, протекающих в динамическом состоянии и в закрытой системе, все описанные механизмы структурообразования имеют вероятностный характер.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 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. Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей / В.М. Павловец, А.В. Герасимук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Том 62. – № 2. – С. 87–95.
4. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.
5. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы в металлургии / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
6. Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 83–87.
7. Павловец В.М. Исправление дефектов на поверхности окатышей напылением влажной железорудной шихты на слой комкуемых материалов / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 3–6.
8. Павловец В.М. Капиллярная пропитка образцов, полученных напылением влажной железорудной шихты на гарнисаж окомкователя / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 8. – С. 11–14.

9. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.

10. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 15–20.

УДК 669.162.12:622

ОСОБЕННОСТИ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ОКАТЫШЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Платова Г.А., Павловец В.М.

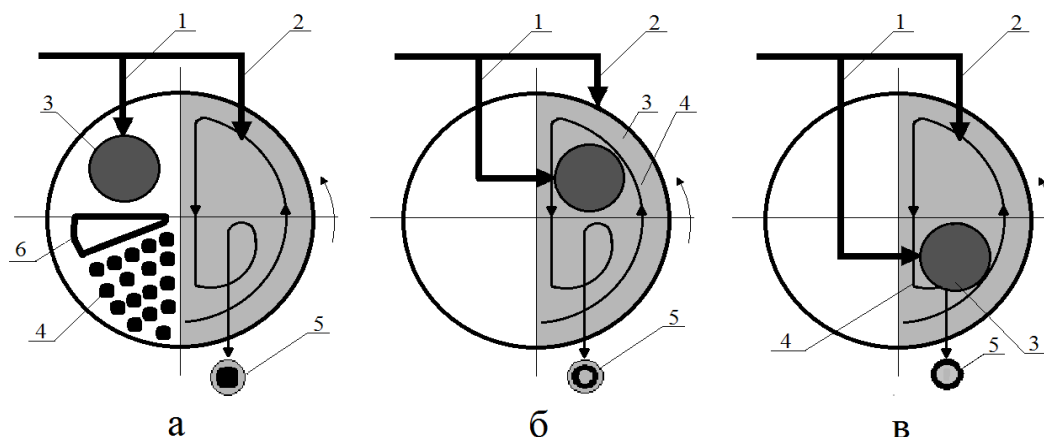
*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Проанализирована проблема развития техники и технологии окомкования шихты в производстве железорудных окатышей, обеспечивающей повышение реакционной способности окускованного металлургического продукта на всех этапах производственного маршрута. Рассмотрены особенности поровой структуры железорудных окатышей, полученных по технологии принудительного зародышеобразования.

Ключевые слова: техника и технология окомкования, металлургические свойства, окускованное сырье, структура железорудных окатышей, принудительное зародышеобразование.

Техника напыления влажной железорудной шихты позволяет существенно расширить функциональные и вспомогательные возможности окомковательного оборудования, в котором регулирование процесса переката возможно с помощью ограниченных параметров технологии: скорости вращения рабочего органа и угла наклона тарели окомкователя к горизонту [1, 2]. Техника напыления имеет значительно большее количество управляющих воздействий: теплотехнические и технологические параметры струи, их количество, наличие вспомогательных экранов и технологических ограждений, зона напыления, вид напыляемой поверхности (шихтовый гарнисаж, слой сыпучих и сформованных материалов, эластичные поверхности и многие другие основы для формирования плотного слоя шихты [1, 2]. Техника и технология напыления менее чувствительны к гранулометрическому составу, влажности напыляемых материалов и поверхностным свойствам частиц. Струйные аппараты на основе напыления достаточно легко формируют труднокомкуемые и гидрофобные материалы. Они способны легко снять ограничения в применении техногенного вторичного сырья различного технологического происхождения. Возможности технологии усиливаются в совокупности с известными физическими полями, применяемыми в технике брике-

тирования, агломерации и прессования. В качестве примера на рисунке 1 показаны основные, экспериментально отработанные, технологические схемы получения железорудных окатышей с регламентированной структурой.



1, 2 – самостоятельные потоки загружаемой шихты; 3 – напыленный слой (позиция а), область напыления (позиции б, в) в слое комкуемых материалов; 4 – зародыши; 5 – годные окатыши; 6 – делитель НС

Рисунок 1 – Схемы получения окатышей на основе теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж тарельчатого окомкователя – а и комкуемые материалы – б, в

С помощью воздушно-шихтовой струи (ВШС) можно сформировать влажный напыленный слой (НС) шихты практически на любой твердой поверхности (шихта, металл, резина, слой зародышей или окатышей и др.) [8]. На разных этапах производства в технологический цикл получения сырых окатышей на основе техники напыления (Н) включены операции окомкования шихты (О) и доокомкования (Д) зародышей (З). Опытным путем на лабораторных установках отработаны многочисленные комбинированные технологии, которые успешно исследованы в полупромышленных условиях и показали высокую практическую эффективность [3]. Некоторые достигнутые технические показатели указанных технологий и получаемых окатышей в сравнении с традиционной технологией (ЗО) приведены в таблице 1 [3, 5]. Стандартная технология ЗО основана на капельном увлажнении водой железорудной шихты для зародышеобразования и режиме переката, при котором формируются формующие и структурообразующие нагрузки на движущийся зародыш. Технологическая схема теплосилового напыления шихты легко реализуется на действующем производстве, для чего существуют свободные производственные площади, пространства и технические возможности для ее реализации. На основе технологии ЗНД разработаны технические решения, позволяющие управлять зародышеобразованием и формированием окатышей и их физическими свойствами. Струйные технологии характеризуются экологичностью и используют сравнительно недорогой компрессорный воздух, широко распространенный на любом крупном промышленном объекте.

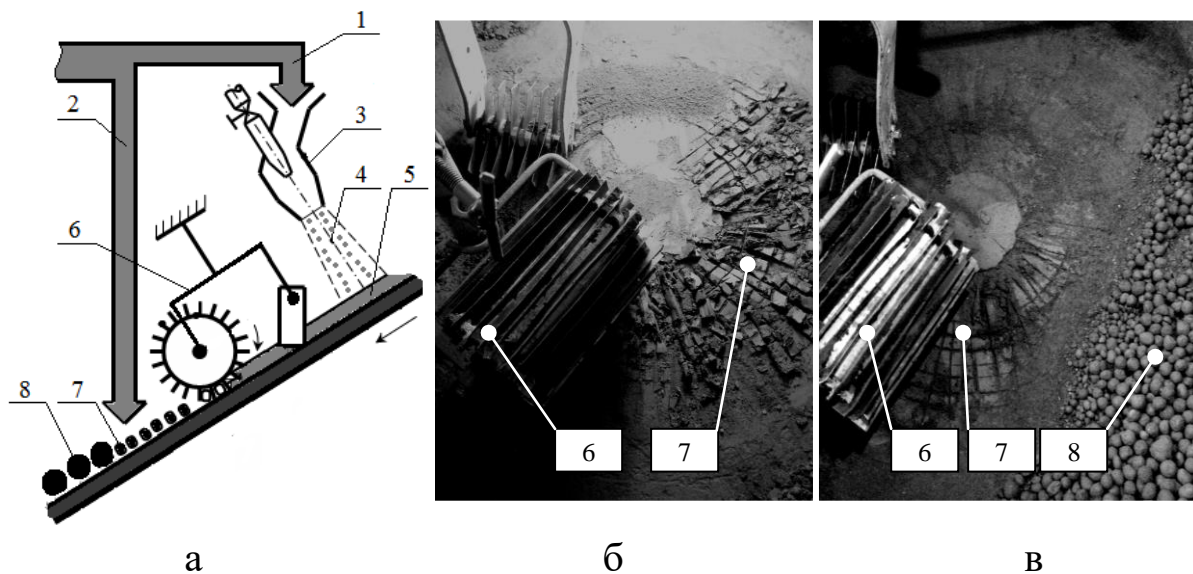
Таблица 1 – Технические показатели технологий получения окатышей

Технические показатели	Технологии получения окатышей			
	ЗО	ЗНД	ЗОНД	ЗОН
Площадь напыления, % от площади тарели	-	30-40	20-30	15-25
Площадь, занятая 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 зародышеобразования, кг/(м ² ·с)	-	(4-8)·10 ⁻³	(5-10)·10 ⁻³	(5-10)·10 ⁻³
Температура трещинообразования, °С	550-580	600-740	580-650	580-620
Пористость, %	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

Нет ограничений для использования перегретого водяного пара и любых других сжатых газов в этой технологии. Анализ технологической работы этих технических решений дает возможность сформулировать общие принципы зародышеобразования и структурообразования комкуемой железосодержащей массы для перспективной технологии.

Одна из наиболее эффективных и отработанных - технология принудительного зародышеобразования ЗНД (ЗНД – зародышеобразование напылением и доокомкование зародышей) позволяет существенно изменить процессы зародышеобразования и окомкования железорудной шихты и обладает широким набором инструментария для воздействия на структурные свойства

окатышей и функциональные возможности окомкователя [1–4]. На первом этапе получения сырых окатышей в холостой зоне тарельчатого окомкователя проводят формирование плотного напыленного слоя (НС) шихты высоконапорной воздушно-шихтовой струей (ВШС) [5–8] (рисунок 2).



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 2 – 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

Для получения зародышевой массы в холостой зоне окомкователя плотный НС механически делят на прочные зародыши, имеющие форму, близкую по форме сферокубу или сферопараллелепипеду. На заключительном этапе формообразования в рабочей зоне окомкователя, занятой комкуемыми материалами, происходит активный массообмен и у зародышей сминаются углы, грани и формируется округлая форма. Одновременно с этим происходит доокомкование зародышей в смеси с увлажненной шихтой в режиме переката и формируется оболочка окатышей с прочной структурой. При этом центральная часть двухслойных окатышей имеет пониженную влажность и в ней формируется более высокая пористость с повышенной долей открытых пор [1-4]. Дифференциальное распределение пористости по сечению окатышей формирует благоприятное поле температур и структуру термических напряжений по сечению окатышей [9, 10]. При этом прочность зародышевой массы можно регулировать в широких пределах, меняя давление сжатого воздуха в широких пределах. Такое структурное построение окатышей позволяет снизить диффузионные ограничения при финишной

термообработке и повысить реакционную способность окучкованного сырья. Двухступенчатая схема получения окатышей широко запатентована в РФ. Некоторые патенты представлены в списке литературы [11–13]. Патентообладателем является ФГБОУ ВО СибГИУ (г. Новокузнецк).

Целью настоящей работы явилось изучение механизма порообразования зародышевой массы, полученной теплосиловым методом напыления.

В качестве базового устройства, на котором реализованы многочисленные технические схемы получения окатышей, использовали лабораторный полупромышленный тарельчатый окомкователь (диам. 0,62 м, угол наклона тарели $\gamma = 45^\circ$, число оборотов $n = 12$ об/мин, влажность гарнисажа 8,2–8,8 %), снабженный струйным аппаратом (СА) (диаметр $d_{СА} = 0,02$ м, длина $L_{СА} = 0,30$ м, расход шихты $G_{ш} = 0,03 - 0,04$ кг/с, влажность шихты 7,2–9,5 %, давление $P_b = 0,2$ МПа, расход сжатого воздуха $V_b = 0,6$ м³/мин) и устройствами различной конструкции для деления НС на сфероподобные зародыши [3, 4]. Для реализации многоструйных технических схем использовали три СА диам. 0,02 м при том же расходе шихты и первоначальных исходных условиях. Окомкователь работал на влажной шихте, состоящей из железорудного концентрата Тейского месторождения ($d_c = 0,068$ мм) и 1 % бентонита в качестве связующего. Шихта массой 5 кг напылялась в течение 60 с на ШГ толщиной 30 мм ($\rho_{шг} = 2230$ кг/м³) в холостой зоне тарели при $\Theta_L = 25$ ($\Theta_L = L/d_{СА}$, $L = 0,5$ м). Для доокомкования зародышей и формирования кондиционных окатышей в рабочую зону агрегата 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 полученных окатышей рассеивали на лабораторных ситах. Методика отбора проб и экспериментов подробно изложена в источниках [3, 4]. В опытах определяли плотность и пористость образцов в зависимости от безразмерного текущего радиуса δ ($\delta = r_i/r$, где r_i – текущее значение радиуса НС; r – радиус НС, м; i – порядковый номер зоны) и параметра $L/d_{са}$. Зона I ($\delta_1 = 0-0,2$) находилась в центре НС (на оси струи) в круге радиусом r_1 . Зона II ($\delta_2 = 0,2-0,6$) занимает кольцевое пространство вокруг зоны I, ограниченное радиусом r_1 (внутренний) и r_2 (наружный). Периферийная зона III ограничена кольцом радиусами r_2 и r ($\delta_3 = 0,6-1,0$). Пористость (открытую $P_{отк}$, закрытую P_z и общую P_o , %) определяли по стандартной методике (ГОСТ 25732-88 Методика определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости), дублируя многократно результаты экспериментов.

Во второй серии опытов по вышеприведенной методике получали сферокубические зародыши размерами (высота ребра) 5, 10, 12 мм и средней плотностью 2910 кг/м³, полученные делением НС в центральной зоне окомкователя. Напыленный слой формировали на гарнисаже тарели в координате $X(R)=0,5$. НС. Массу зародышей определяли для последующего вычисления их массовой доли в объеме окатышей с известной массой. Считали, что пер-

воначальная масса зародышей в процессе доокомкования не уменьшается. В заключении опытов зародыши доокомковывали в режиме переката до окатышей размером 16 мм. Полученные окатыши обжигали при температуре 1200 °С в течение 10 минут. В работе исследовали влияние массового соотношения зародыша в окатыше ($D=m_{зр}/m_{ок}$) на плотность и пористость окатышей после высокотемпературного обжига. Учитывая этот показатель, плотность окатышей $\rho_{ок}$, кг/м³, рассчитывали по выражению:

$$\rho_{ок} = \rho_{зр} \cdot (m_{зр}/m_{ок}) + (1 - m_{зр}/m_{ок}) \cdot \rho_{об} = \rho_{зр} \cdot D + (1 - D) \cdot \rho_{об},$$

где $\rho_{зр}$, $\rho_{об}$ – плотность зародыша и оболочки окатыша, кг/м³.

На основе полученных экспериментов рассчитывали структурный фактор зародышей $\Theta_{п}$ по формуле:

$$\Theta_{п} = \Pi_{отк} / \Pi_{общ},$$

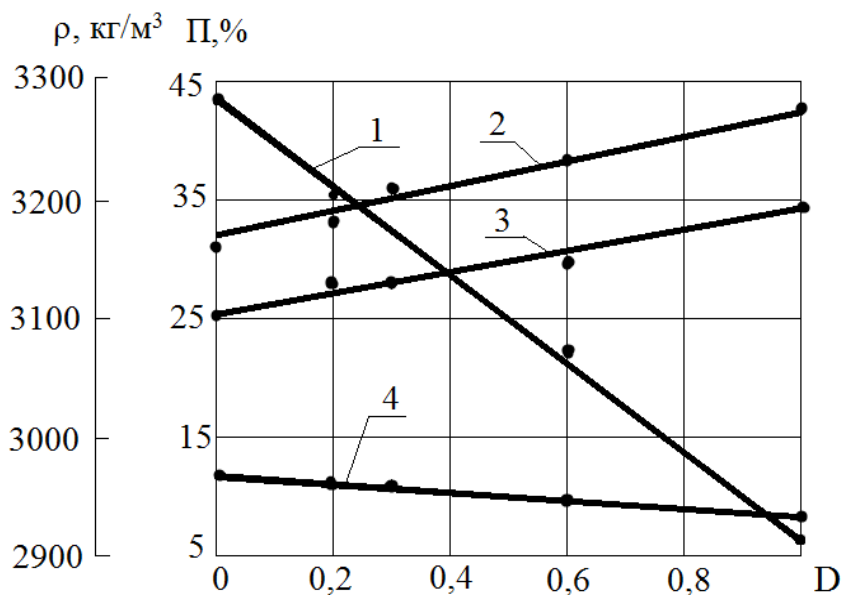
где $\Pi_{отк}$, $\Pi_{общ}$ – открытая и общая пористость зародышевой массы, %.

Результаты опытов по определению основных структурных параметров окатышей представлены в таблице 2 и на рисунках 3 и 4.

Таблица 2 – Пористость образцов, вырезанных из НС, после их обжига

X(R)	Зона НС (δ)	$\rho_{каж}$, кг/м ³	Π_o , %	$\Pi_{отк}$, %	Π_z , %
0	0-0,2	3240/2916/2630	34,4/40,1/46,7	24,3/30,4/38,6	10,1/9,7/8,1
	0,2-0,6	3110/2810/2585	37,0/43,1/47,7	26,9/33,6/40,5	10,0/9,5/7,2
	0,6-1,0	2960/2705/2512	40,0/45,2/49,1	30,6/36,2/42,6	9,4/9,0/6,5
0,5	0-0,2	3148/2820/2558	36,2/42,9/48,2	26,0/34,1/40,9	10,2/8,8/7,3
	0,2-0,6	3006/2715/2510	39,1/45,0/49,1	29,9/37,4/42,1	9,2/7,6/7,0
	0,6-1,0	2854/2612/2460	42,2/47,1/50,2	33,1/38,7/43,8	9,1/8,4/6,4
0,9	0-0,2	3105/2770/2522	37,1/43,9/48,9	27,5/36,1/41,8	9,6/7,8/7,1
	0,2-0,6	2954/2665/2480	40,2/46,0/49,8	31,2/38,4/42,8	9,0/7,6/7,0
	0,6-1,0	2802/2586/2426	43,2/47,6/50,9	34,7/41,1/44,7	8,5/6,5/6,2

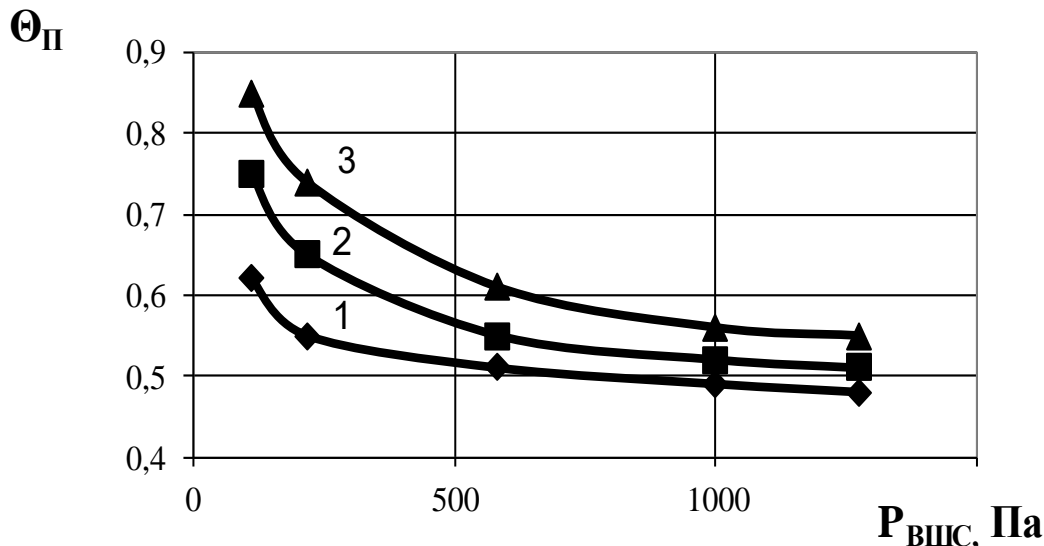
Примечание: $\Pi_o = (1 - \rho_{каж}/\rho_{ист})100$ %, где $\rho_{ист} = 4936$ кг/м³. Температура обжига 1200 °С, время обжига 10 мин. В дроби: $L/d_{ca} = 5; 10; 15$. X(R) –текущая радиальная координата тарели окомкователя;



1 – кажущаяся плотность окатышей, кг/м³;
 2, 3, 4 – общая, открытая и закрытая пористость, %

Рисунок 3 – Зависимость кажущейся плотности и пористости обожженных окатышей от массовой доли зародышей в окатышах. Соотношение $D=1$ соответствует структуре зародыша, а $D=0$ соответствует структуре окатыша.

$W_{III} = 7,5 \%$; $\delta_1 = 0-0,2$; $P_{вшс} = 590$ Па



Влажность шихты, %: 1–5,0; 2–7,5; 3–10,0

Рисунок 4 – Зависимость параметра Θ_{II} в зоне I ($\delta_1 = 0-0,2$) от давления ВШС

Результаты экспериментов показывают (таблица 1 и рисунки 3, 4), что общая и открытая пористость НС возрастают пропорционально увеличению L/d_{ca} , падению среднего давления ВШС ($P_{вшс}$) и росту координаты δ в направлении от оси НС к его периферии. Установлено, что в центральной

зоне НС плотность и пористость существенно выше, чем на периферии НС, что объясняется параболическим профилем поля скоростей ВШС и, соответственно, аналогичным распределением полного давления ВШС по координате δ . Установили, что в процессе доокомкования зародышей и формирования оболочки окатыша плотность окатыша растет (рисунок 3). Это обусловлено тем, что пластичный и пористый зародыш в процессе доокомкования способен уплотняться, а оболочка окатыша традиционно имеет более высокую плотность, меньшую пористость и меньшие возможности для уплотнения. Оптимальное значение D определяется многими факторами и зависит от плотности, прочности, влажности зародыша, от нормативных характеристик окатышей, транспортного маршрута и некоторых других факторов. Если сформированный зародыш плотный и прочный, то его доля может превышать 50 %. Если зародыш менее плотный и прочный, то его доля должна быть менее 50 % [1, 2].

Зависимость параметра Θ_{II} в зоне I ($\delta_1 = 0-0,2$) от давления ВШС (рисунок 4) характеризует его уменьшение с ростом $P_{вшс}$. Это значит, что общее количество открытых пор и их удельное количество в массе НС с ростом $P_{вшс}$ снижается примерно в 1,5–2,5 раза. Это обусловлено, тем, что при высоких значениях $P_{вшс}$ (особенно при $P_{вшс}$ более 1000 Па) меняется механизм формирования и формирование пористости переходит от сдвигового динамического характера к статическому приложению давления ВШС. При течении воздуха на поверхности НС возникают силы трения, которые приводят к сдвигу сырой массы в радиальном направлении НС и позволяют воздействовать на структуру НС и формировать открытую пористость. При высоких давлениях ВШС и влажности шихты влага выжимается на поверхность НС, формируя тонкий слой подвижной влагошихтовой пульпы, которая заполняет концентрические поры и разглаживает поверхность НС. В этих условиях возможности формирования открытой пористости снижаются. В этом интервале давлений размер пор НС и зародышей существенно уменьшается, а вид пористости от пронизываемого канального переходит к закрытому очаговому. При более низких значениях $P_{вшс}$ (менее 1000 Па) отмеченные возможности структурообразования менее вероятны. Поэтому в этой области давлений можно получить зародыши с большей долей открытых пор, но с меньшей прочностью.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 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. Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей / В.М.

Павловец, А.В. Герасимук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2018. – Том 62. – № 2. – С. 87–95.

4. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.

5. Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 83–87.

6. Павловец В.М. Исправление дефектов на поверхности окатышей напылением влажной железорудной шихты на слой комкуемых материалов / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 6. – С. 3–6.

7. Павловец В.М. Капиллярная пропитка образцов, полученных напылением влажной железорудной шихты на гарнисаж окомкователя / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 8. – С. 11–14.

8. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.

9. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 15–20.

10. Павловец В.М. Сравнительная оценка термических напряжений в объеме железорудных окатышей, полученных с дифференцированным распределением пористости / В.М. Павловец, А.С. Герасимук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 8. – С. 536–542.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕССОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ

Паутов З.В., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Рассмотрены типичные технологии переработки шлаков металлургического производства. Показано место металлургических шлаков в структуре металло - и ресурсосбережения. Представлены результаты исследования влияния основных технологических параметров прессования на прочностные показатели прессовок, полученных из металлургических шлаков.

Ключевые слова: шлаковые отходы, промышленное производство, строительные материалы, параметры прессования, прочностные показатели прессовок.

Металлургические шлаки играют существенную роль при проведении металлургических плавов в различных металлургических переделах. После выпуска шлаков из печи они представляют собой ценный техногенный материал, используемый в различных отраслях промышленности. Металлургические шлаки занимают ведущее место среди твердых отходов металлургического предприятия. Их непосредственное использование в дорожном строительстве, в производстве строительных материалов, в огнеупорной промышленности, в сельском хозяйстве и в других отраслях техники позволяет расширить минеральную базу многих технологий и решить экологические проблемы в промышленности [1, 2]. Экологическая составляющая технологии рециклинга и требования законодательства по охране окружающей среды направлены на непосредственную переработку шлаков и отвалов, занимающих ценные земельные угодья вблизи предприятия. Шлакоотвалы загрязняют воздушный и водный бассейны, меняют химико-минеральный состав почв и сельхозугодий, наносят вред биоразнообразию. Пыление шлакоотвалов при неблагоприятных погодных условиях (сильный ветер, снегопады, повышенная влажность воздуха, туманы) формирует вторичное загрязнение водного и воздушного бассейнов, отрицательно влияет на здоровье людей и на продуктивность животноводства и сельскохозяйственных угодий. Поэтому ликвидация шлакоотвалов и переработка металлургических шлаков приведет к улучшению экологической обстановки в промышленном регионе.

Классификация металлургических шлаков по производственному признаку представлена на рисунке 1. В зависимости от металлургического процесса, при котором получают шлаки, они различаются по химическому составу, температуре и вязкости на выпуске, газонасыщенности и другим свойствам.

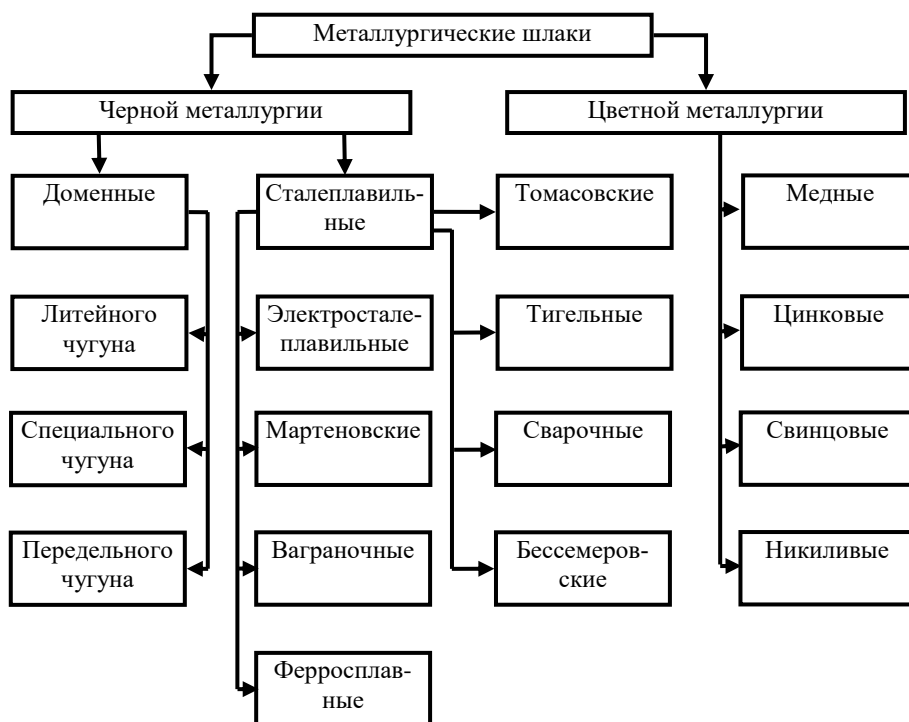
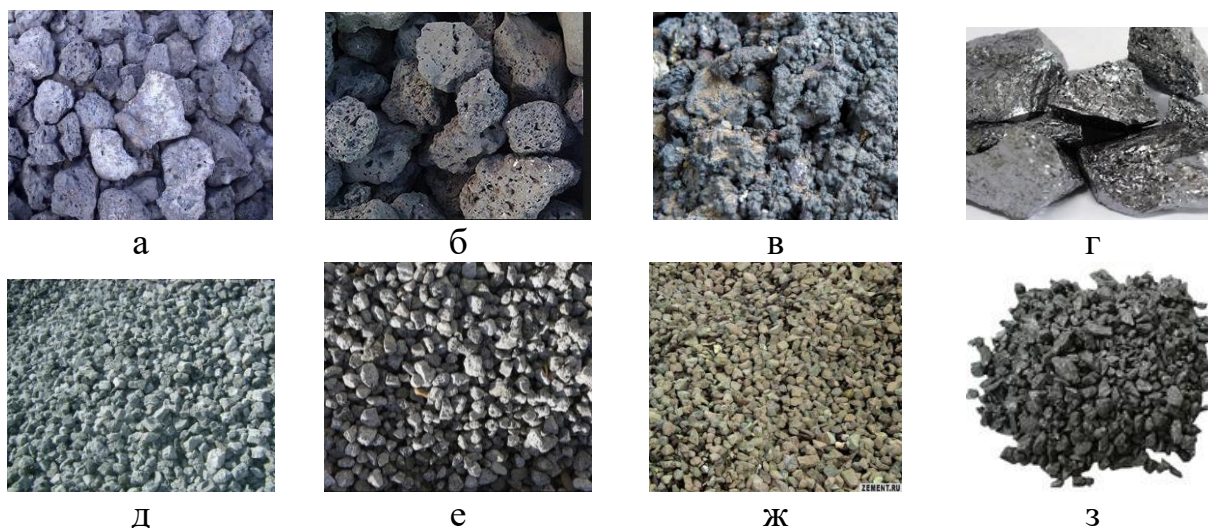


Рисунок 1 – Классификация металлургических шлаков

В зависимости от химического состава, скорости охлаждения, вида металлургической технологии физические характеристики, прочностные свойства, структура и цвет шлаков существенно отличаются (рисунок 2).



Макроструктура шлаков: а – г – исходных; д – з гранулированных; а, д – доменных; б, е – конвертерных, ж, е – ферросплавных, г, з – электросталеплавильных

Рисунок 2 – Макроструктура шлаков и гранулированных продуктов

Наибольшее количество в объеме переработки занимают доменные шлаки. Они являются сопутствующим продуктом при выплавке первичного металла в доменных печах. Чугун и шлак образуются в доменной печи в процессе пировосстановительной обработки компонентов шихты: окуско-

ванного сырья, руды, топлива и флюса (известняка или доломита). Шлак в процессе плавки выпускают из доменной печи периодически. Шлак, имеющий меньшую плотность по сравнению с чугуном, выпускают через верхнюю шлаковую летку в объеме 50–75 % от всего количества шлака. Затем через чугунную летку, расположенную ниже шлаковой летки, сливают чугун. В ходе слива чугуна его место занимает шлак, находившийся ниже шлаковой летки. Этот шлак выпускают через чугунную летку после слива металла. Шлак, выпускаемый через чугунную летку (нижний шлак), увлекает за собой чугун. Поэтому в процессе слива и переработки требуется специальные мероприятия по отделению металла. Шлак, выпускаемый из доменной печи, сливают в шлаковозные ковши и отвозят на участки переработки, находящиеся вблизи доменного цеха, или на шлаковые отвалы.

Отвальные доменные шлаки называют по виду переработки, основанной на сливе шлакового расплава в отвал и последующей разработки отвала. Отвальный шлак представляет собой преимущественно куски с крупностью отдельных кусков от 10–20 до 100–120 мм. Куски максимального размера составляют 10–15 % от объема всего шлака. Отвалы разрабатывают с таким расчетом, чтобы раздробленный шлак возможно больше был выдержан на открытом воздухе для освобождения его от вредных соединений.

Отвальные кислые доменные шлаки, переработанные (дробление и сортировка) на щебень и гравий, применяются для устройства щебеночных оснований и покрытий, для приготовления асфальтобетонной смеси, а также для устройства опорного слоя цементобетонных покрытий.

В настоящее время разработаны технологические схемы производства щебня из отвальных шлаков, позволяющие производить разнообразные строительные материалы. Эти типичные схемы обеспечивают непрерывный цикл операций по измельчению и сортировке шлаковых материалов.

Технологический процесс производства щебня по этому способу состоит в том, что расплавленный шлак из ковшей сливают в шлаковые ямы или траншеи слоями 0,2–0,3 м. После укладки четвертого-пятого слоев его интенсивно поливают водой в количестве 0,5–0,8 м³/т шлака и организуют ускоренное охлаждение. После кристаллизации при температуре верхнего слоя не более 1200 °С и нижнего не менее 500 °С в течение 4–8 ч остывший шлак дробят ковшом экскаватора, классифицируют на фракции и при необходимости подвергают дополнительному дроблению. Внедрение этого способа на Новолипецком, Таганрогском, Западно-Сибирском и некоторых других металлургических заводах РФ позволило сократить расходы на содержание шлаковых отвалов в среднем на 0,6 руб/т и получить дополнительную прибыль около 1 руб/т.

Шлаковый щебень обладает хорошим сцеплением с битумами, жидкими технологическими наполнителями и цементными растворами. Щебень, получаемый из шлаков, по показателям износостойкости, истираемости и потере в массе при испытании на дробимость подразделяется на несколько классов. Механически переработанные шлаковые отходы используются как добав-

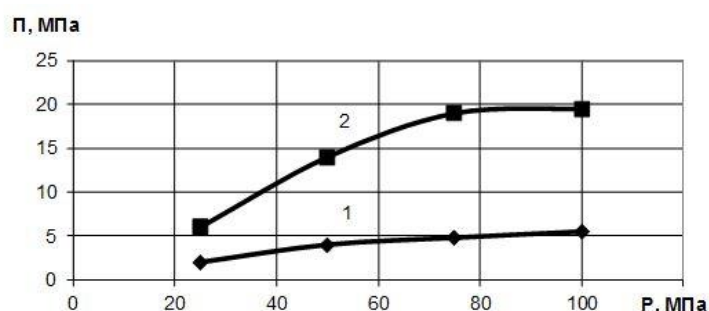
ки, наполнители и сгустители при производстве строительных материалов: песка, цемента, бетонов, растворов, кирпича, кровельной черепицы, тротуарной плитки, стеклоблоков и т.д. Они могут полностью замещать исходное сырье, и использоваться в виде частичного заменителя основного сырьевого материала. Они хорошо зарекомендовали себя при укладке в земляное русло автомобильных дорог, тротуаров, технологических площадок, оснований и откосов железных дорог. В дорожном строительстве используют продукты механической переработки любых металлургических шлаков. Так для строительства применяют мартеновские, ферромарганцевые, конвертерные, электроплавильные, ваграночные и шлаки цветной металлургии. Большинство шлаков на основе фосфорных соединений, измельченных до состояния шлаковой муки, используют в качестве удобрений в сельском хозяйстве. Широко применяются шлаковые отходы в производстве портландцемента (как активные кремнеземистые добавки) в количестве 10–15 % и в производстве пуццолановых портландцементов марок 300–400 – до 30–40 % (золотпортландцемент). В этих технологиях тонкодисперсные отходы проявляют функции вяжущих веществ, которые позволяют экономить дорогостоящие стандартные связующие, полученные на основе затратных термических процессов.

Значительный объем металлургических шлаков используют в металлургических технологиях в качестве замещающего сырья [1 – 4]. В последнее время шлаки успешно применяют для производства огнеупорных и теплоизоляционных материалов, как в собственном производстве, так и продают специализированным предприятиям [2]. Предлагается использовать металлургические шлаки для каталитической очистки технологических газов от газовых выбросов и в качестве теплоаккумулирующих зернистых насадок для регенеративных горелочных устройств [5, 6]. Содержание в сталеплавильных шлаках 8–12 % остаточного металлического железа и от 15 до 40 % его оксидов делает шлак ценным сырьем для его переработки. Содержание оксидов железа в шлаке очень часто сопоставимо с уровнем их содержания в бедных природных рудах. Выплавка вторичного железа из расплавленного шлака путем восстановления оксидов энергетически эффективнее, чем металлизация в шахтных печах. Такая технология позволит в РФ дополнительно извлекать из сталеплавильных шлаков до 1,8 млн. тонн чистого железа без вредных примесей и неметаллических включений,

Целью настоящей работы было исследование влияния основных технологических параметров прессования на показатели прессовок, полученных из металлургического шлака.

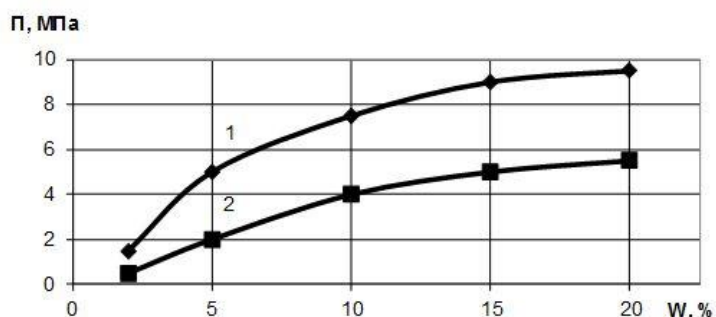
Эксперименты выполняли на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ. На первом этапе работы проводили дробление и измельчение доменного шлака АО «ЕВРАЗ ЗСМК». После этого выполняли рассев шлака и готовили два вида частиц: фракции 0,063–0,1 мм (среднее значение $d_q=0,083$ мм), фракции 0,1–0,2 мм (среднее значение $d_q=0,15$ мм). В качестве связки использовали цемент марки М 200, широко применяемый в строительной промышленности для производства формованных строительных изделий

(блоки, кирпичи, тротуарная плитка, стеклоблоки, бетонные изделия и др.). В качестве жидкого затворителя и пластификатора массы использовали воду. Прессование массы выполняли на лабораторном гидравлическом прессе, снабженным манометром. Лабораторный пресс позволял варьировать давление прессования от 30 до 100 МПа. Такие величины давления прессования используются в промышленности для получения строительных и огнеупорных изделий, окускованного железосодержащего сырья [1–4] и брикетированного энергетического топлива. После прессования проводили естественную сушку образцов в течение 24 часов. Подобная методика испытаний и использование модельных образцов для анализа прочностных свойств достаточно распространена в строительной промышленности и при производстве окускованного железосодержащего сырья [7, 8]. Результаты, полученные на малоразмерных спрессованных образцах, можно перенести на производственный процесс, используя принципы и критерии физического моделирования. Достоверность указанных технологий и полученных результатов дополнительно достигается увеличением статистических опытных данных и сравнением научных результатов, полученных в смежных промышленных технологиях. Результаты экспериментов представлены на рисунках 3 и 4.



Прессовки: 1 – сырые; 2 – высушенные ($d_q=0,150$ мм, связка цемент – 10 % , влажность – 10 %)

Рисунок 3 – Влияние давления прессования на прочность прессовок, сформованных из шлаковых частиц



Размеры частиц шлакового наполнителя, d_q , мм: 1 – 0,083; 2 – 0,150 (связка цемент – 10 % , $P = 50$ МПа)

Рисунок 4 – Влияние влажности прессуемой массы на прочность образцов, полученных из шлаковых частиц

Результаты опытов показывают, что давление прессования массы можно ограничить величиной 75 МПа для получения строительных изделий. Для формирования огнеупорных и теплоизоляционных блоков давление можно повысить до 100 МПа. Уменьшить давление прессования можно двухступенчатым режимом прессования, на первом этапе которого можно применять теплосиловое напыление влажного материала [9–11]. Эта технология, отработанная при производстве окускованного металлургического сырья, позволяет достичь необходимой прочности прессовок и регламентированной структуры с меньшими энергетическими затратами. Влажность формуемой массы подбирается экспериментально и зависит от размеров частиц шлакового наполнителя, содержания упрочняющей связки и давления прессования. Можно утверждать, что масса на основе более мелких частиц ($d_q=0,083$ мм) требует большего количества увлажнителя и упрочняющей связки (примерно на 8–15 %). Это обусловлено увеличением удельной поверхности шлаковых частиц и количеством контактов между компонентами смеси [1–4]. В качестве увлажнителя при формировании используется техническая вода и ее химические растворы. После затвердевания массы на основе цемента прочность прессовок увеличивается более чем в два раза. Рост прочности также определяется содержанием упрочняющей связки, размерами частиц шлакового наполнителя и длительностью естественной сушки. Максимальный набор прочности, например, строительных изделий или металлургических брикетов можно обеспечить вылеживанием в течение нескольких суток.

Библиографический список

1. Перов А.А Дробление, измельчение и обогащение полезных ископаемых / А.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – Москва: Недра, 1990. – 304 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. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 с.
4. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
5. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.
6. Павловец В. М. Устройства для промышленной теплогенерации. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 218 с.
7. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.
8. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. –2010. – № 6. – С. 15–20.

9. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.

10. Павловец В.М. Сравнительная оценка термических напряжений в объеме железорудных окатышей, полученных с дифференцированным распределением пористости / В.М. Павловец, А.С. Герасимук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 8. – С. 536–542.

11. Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 83–87.

УДК 621.181

ПРЕДПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Паутов З.В., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

Представлена последовательность подготовительных работ при проведении предпроектного анализа технологии переработки технологических шлаков металлургического производства. Проанализированы нормативные документы для производства строительных материалов на основе металлургических шлаков. Проведен обзор патентных источников по проблеме переработки металлургических шлаков.

Ключевые слова: предпроектный анализ, шлаки сталеплавильного производства, технологии переработки, патентная проработка.

Металлургические шлаки являются наиболее массовыми отходами современного металлургического производства [1–4]. Как правило, разработка конкретной технологии переработки металлургических отходов начинается с определения соответствующего вида продукции, которую предполагается получать из шлака, и назначения регламентированных свойств у этой продукции. Основные виды продукции, получаемой из металлургических шлаков, представлены в таблице 1. Регламентированные показатели, как правило, отражаются в нормативных или стандартизированных документах, регулирующих производство этой продукции (таблица 2). Это ГОСТ, СНИП, технические условия, руководящие документы, производственные инструкции и другие источники. К общепринятым регламентированным свойствам формованных изделий можно отнести прочность, плотность, пористость, правильность формы и размеров, теплофизические характеристики и ряд других эксплуатационных нормативов. Для сыпучих материалов регламентируют насыпную плотность, размер кусков, их форму, некоторые динамиче-

ческие и статические характеристики. Достаточно часто производственники - технологи запрашивают у производителей повышенный комплекс свойств у определенного вида продукции. Они определяются конкретными условиями производства и особенностями применения такого вида продукции на практике. К таким свойствам можно отнести, например, повышенную твердость, износостойкость, коррозионную и термическую стойкость, низкую осыпаемость, водопоглощение, пористость и другие.

Таблица 1 – Основные виды продукции из металлургических шлаков

№	Промышленное производство	Наименование продукции
1	Строительное	Шлак, щебень, песок, цемент, пемза, клинкеры, шлакоситаллы. бетон, литые изделия, наполнитель для строительных изделий и блоков, сооружение дамб, кровельная черепица, дисперсный краситель строительных изделий
2	Дорожное	Дорожное полотно, сооружение водосливов и откосов, асфальтобетон, тротуарная плитка, дисперсный краситель дорожного полотна, дизайнерские и ландшафтные материалы и композиции
3	Огнеупорное и производство тепловой изоляции	Наполнитель огнеупорных и керамических изделий, бетонов, засыпок, теплоизолирующих и торкретирующих смесей, мертелей, подварочных масс, теплоизоляционные блоки, рулоны, ваты, засыпки, композиты, формовочные смеси
4	Химическое	Катализаторы, адсорбенты, реактивы, лакокраски, мастики, защитные и антикоррозионные покрытия, вяжущие материалы и клеи
5	Машиностроительное	Абразивные и пескоструйные материалы (круги, бумага, песок, измельчители массы)
6	Сельскохозяйственное	Удобрения, подсобные и вспомогательные материалы

В таком случае требуется проведение патентной проработки и выполнение научных исследований, позволяющих получить технологические параметры для производства указанного вида продукции. Патентная проработка также выполняется по стандартной методике и позволяет определить уровень разработки на современном этапе производства.

В области техносферной безопасности результаты патентной проработки направлены на решение проблем экологического порядка. Патентная проработка является необходимой процедурой для проектирования новой или совершенствования существующей технологии. Она позволяет применить перспективные технические решения на практике, оптимизировать технологический процесс, механизировать производство строительных и промышленных изделий, подобрать оптимальный фракционный состав смеси.

Таблица 2 – ГОСТ и их краткое описание в области переработки металлургических шлаков

№	Название	Номер	Область применения	Дата введения
1	Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов	ГОСТ 5578-94	Настоящий стандарт распространяется на щебень и песок из доменных и ферросплавных (силикомарганца) шлаков черной металлургии и никелевых и медеплавильных шлаков цветной металлургии, применяемые в качестве заполнителей для тяжелых, мелкозернистых, жаростойких бетонов и для засыпок. Стандарт не распространяется на щебень и песок для дорожного строительства и на гранулированные шлаки для производства цемента	01.01.1996
2	Смеси бетонные	ГОСТ 7473-2010	Настоящий стандарт распространяется на бетонные смеси и бетоны, изготавливаемые из остатков шлаковых отходов, применяемые в строительстве всех видов	01.01.2012
3	Песок для строительных работ	ГОСТ 8736-93	Настоящий стандарт распространяется на песок, применяемый в качестве заполнителя для бетонов монолитных, сборных бетонных и железобетонных конструкций, а также материала для соответствующих видов строительных работ, и устанавливает методы испытаний	01.07.1989
4	Бетоны	ГОСТ 18105-2010	Настоящий стандарт распространяется на бетонные смеси и бетоны, изготавливаемые на минеральных вяжущих и минеральных заполнителях с использованием отходов производства, применяемые в строительстве всех видов	31.08.1996
5	Гравий	<u>ГОСТ 8269.0-97</u>	Настоящий стандарт распространяется на щебень и гравий из плотных горных пород (в том числе попутно добываемых вскрышных и вмещающих пород и некондиционных отходов горных и других предприятий) и отходов промышленного производства	01.07.1998

Продолжение таблицы 2

№	Название	Номер	Область применения	Дата введения
6	Цемент	ГОСТ 4.214-80	Настоящий стандарт распространяется на цементы и устанавливает номенклатуру показателей их качества для применения при: разработке стандартов, технических условий и других нормативных документов; выборе оптимального варианта производства нового вида цемента; аттестации цемента, прогнозировании и планировании его качества; составлении отчетности и информации о качестве; разработке систем управления качеством цемента	30.06.1980

Упрощенный отчет о патентной проработке в области переработки металлургических шлаков приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Патентная проработка в области переработки металлургических шлаков

№	Название патента	Автор и номер патента	Сущность изобретения и его краткое описание
1	Способ производства шлаковой пемзы	Школьник Я.Ш., Патент № RU 2023693 C1	Способ включает поризацию шлакового расплава водой и вибрацию расплава, осуществляемого с частотой 650 - 850 к/мин. Дробление поризованной массы проводят при $T_{\text{ликв}} = (50-150)^{\circ}\text{C}$ с энергией удара 150 - 300 кДж. Соотношении (мас.%): пыль-унос известково-обжигательных печей 7-25, добавка - зола ТЭЦ или смесь золы ТЭЦ 15-90 мас.% и металлургического шлака.
2	Способ изготовления изделий из шлака	Петров И.И., Патент № RU 2423564 C1	Способ изготовления изделий из шлака, включающий получение жидкого шлака, заполнение шлаком рабочих полостей форм, выдержку шлака в формах для охлаждения и последующее удаление охлажденных изделий из форм, отличающийся тем, что дозу нагретого шлака вначале заливают в специально введенную камеру выжимания, а затем вытесняют из нее шлак в рабочие полости формы при помощи механического давления

Продолжение таблицы 3

№	Название патента	Автор и номер патента	Сущность изобретения и его краткое описание
3	Способ приготовления цемента из доменного шлака	УкрНИИ силикатной промышленности, № 18246 А1	Способ приготовления цемента из доменного шлака отличается тем, что, кроме растворимого стекла, в состав смеси добавляют в равном количестве натровый сульфат
4	Строительная плитка	Митякин В. Ф. ПМ № RU 32105U1	Полезная модель относится к области строительства, а именно к конструкции строительной плитки, предназначенной для использования в качестве тротуарной или облицовочной плитки с применением экологически чистых материалов на основе переработки золошлаковых отходов с добавлением шлаковых примесей
5	Асфальтобетон	Тюрюханов К.Ю. Патент № RU 2697468 С1	Асфальтобетон, содержащий щебень, песок, шлаковые отходы ТЭЦ, минеральный порошок и битум, отличающийся тем, что он дополнительно содержит отход промышленности - отработанную формовочную смесь, используемую для получения литьевых форм при производстве стальных деталей
6	Пенобетон	Удачкин И.Б. Патент № RU 2245866 С1	Введение в пенобетонную смесь металлургического шлака позволяет повысить агрегативную устойчивость смеси в период схватывания цементного теста

Используя широкую гамму промышленных отходов, можно снизить стоимость выпускаемой продукции. Патентная проработка может быть основой для лицензирования и коммерческого использования разрабатываемой технологии. Она может быть основой для разработки собственных изобретений и дальнейших научных изысканий в этой области техники.

По критерию дальнейшего использования в производстве сталеплавильные шлаки условно можно разбить на несколько подгрупп:

– шлаки, образующиеся в начальный период плавки (этот период часто называют окислительным). Эти шлаки содержат большое количество оксидов железа (иногда до 40 % от общего количества шлака). Железо в шлаке, может быть, в виде оксидов FeO и Fe₂O₃ и в виде запутавшихся корольков железа. Обычно они скачиваются из агрегата после завершения начального периода плавки и могут храниться и перерабатываться отдельно;

– шлаки, сформировавшиеся в конце плавки (конечные шлаки). Обычно эти шлаки содержат несколько меньшее количество железа и имеют более высокое значение основности (CaO/SiO₂ = 2,5–3,5). При выплавке низко-

углеродистой стали содержание оксидов железа и в этих шлаках может быть достаточно высоким (15 – 20 %). Однако корольков железа в них значительно меньше. В дуговых печах при проведении восстановительного периода под белым или карбидным шлаком содержание оксидов железа снижается до <1 %, а содержание СаО возрастает до 55–60 %. Конечные шлаки можно оставлять в агрегате для использования в следующей плавке или после выпуска вновь загружать в печь;

– шлаки, попадающие в сталеразливочный ковш с выпускаемой сталью. Эти шлаки в жидком состоянии содержат незначительное количество железа. На практике часто определенное количество металла, оставшегося на днище и стенках ковша после окончания разливки стали, попадает вместе со шлаком в чаши (это так называемые скрапины). Получаемый в результате конгломерат конечного шлака и скрапин металла подвергаются тщательной переработке для максимального извлечения железа.

В отдельных случаях переработка шлака сталеплавильного производства еще более эффективна, например:

– в тех случаях, когда шлаки содержат достаточно высокие концентрации оксидов железа и марганца. Они используются в качестве флюсов для ваграночного и аглодоменного производства;

– в случаях, когда шлаки содержат достаточно много фосфора, они с успехом заменяют суперфосфат и широко используются в сельском хозяйстве. Шлаки, содержащие много фосфора, настолько ценны, что сама технология передела высокофосфористых чугунов построена таким образом, чтобы одновременно получить и чистую по фосфору сталь, и возможно более богатый фосфором шлаки.

– при использовании высокоосновных шлаков в сельском хозяйстве для известкования почвы.

– при переделе чугуна с повышенным содержанием марганца образуются высокомарганцевые шлаки; они могут быть использованы как добавки, повышающие содержание марганца в стали.

Высокоосновные конечные шлаки используются повторно. Так, например, конечные шлаки конвертерного производства содержат: %: СаО 50-60, SiO₂ 13-15, FeO 10-26, и MgO 4-10. Они содержат также определенное количество извести, не успевшей за время плавки ошлаковаться. При вторичном использовании (переработке) такого шлака расход извести снижается, улучшается шлакообразование, повышается степень дефосфорации металла. Высокоосновные маложелезистые конечные шлаки электроплавки используются для внепечной обработки стали (во время ее выпуска) с целью десульфурации.

Следует отметить расширение использования конвертерных шлаков при выплавке чугуна и в производстве агломерата. Применение шлака сопровождается заменой им в шихте части агломерата, сырого известняка и марганцевой руды. При этом удешевляется агломерационная шихта, увеличивается производительность машин и повышается прочность агломерата.

Существенную экономию ресурсов получают при использовании отработанных шлаков в электросталеплавильном производстве – это практика работы в спецрежиме, в результате которого возрастает производительность, ускоряется шлакообразование, достигается экономия флюса, снижается расход электроэнергии. В конвертерном производстве при наличии конечного шлака в агрегате улучшается тепловой баланс, ускоряется шлакообразование, экономится флюс, снижаются потери железа со шлаком. Благодаря «раздувке» шлака на поверхности футеровки после выпуска плавки возрастает стойкость футеровки, снижается расход огнеупоров.

Макроструктура шлаковых отходов показана на рисунке 1.



а – шлак пористый; б – шлак стекловидный; в – шлаковый песок;
 г – шлак гранулированный; д – зола - уноса; е – древесная зола;
 ж – зола сланцевая гранулированная; з – золошлаковая смесь

Рисунок 1 – Макроструктура шлаковых отходов

Внешний вид некоторых видов продукция из металлургического шлака показан на рисунке 2.



а



б



в



г

а – литье из шлака; б – шлаковая пемза; в – шлаковая вата; г – шлакоситалл

Рисунок 2 – Внешний вид некоторых видов продукция из металлургических шлаков

Большинство технологий переработки металлургических шлаков, как правило, заканчиваются формованием многокомпонентной сырой массы на основе металлургических шлаков. Особенностью прессуемой массы является высокое физическое сродство частиц шлака к различным керамическим и органическим материалам, вводимым в состав смеси. Их можно использовать в экологически ориентированных технологиях современного производства [5–7]. Сложный состав смеси применяют для упрочнения изделий, повышения пластичности массы, структурообразования, организованного тепловыделения и других целей. В качестве сырья для получения порообразующих добавок может использоваться угольная пыль, углеродсодержащие шламы, древесные и растительные частицы, замасленные отходы, обрезки ветоши, текстиля и макулатура. Качество прессовок, как правило, зависит от физических характеристик сырья, содержания влаги и режима прессования. В зависимости от вида наполнителя и режима прессования пористость прессовок может меняться от 5 до 60 %. Прочность может превышать 20–40 МПа, что особенно важно для производства огнеупорных и теплоизоляционных изделий.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 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. Павловец В. М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии. – Новокузнецк: СибГИУ, 2019. – 386 с.
6. Патент № 2630789 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ очистки газов от пыли / В.М. Павловец – № 2016152375. Заявл. 28.12.2016; Оpubл. 13.09.2017. Бюл. №26 //Изобретения. Полезные модели. 2019. – № 24.
7. Патент № 2567310 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ очистки газов от пыли / В.М. Павловец – № 2014122216. Заявл. 30.05.2014; Оpubл. 10.11.2015. Бюл. №31 //Изобретения. Полезные модели. 2015. – № 31.

УДК 666.76

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ТОРКРЕТИРОВАНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ФУТЕРОВОК И СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ

Новикова К.И., Павловец В.М.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: kafedra-tee@yandex.ru*

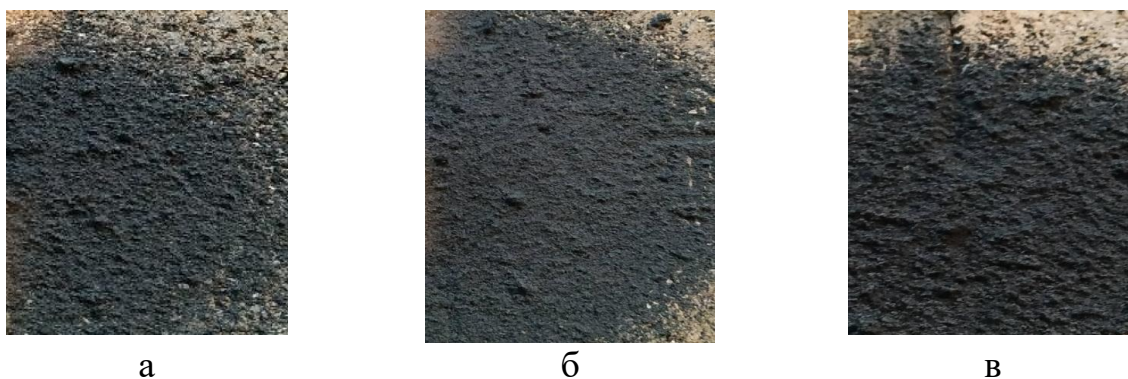
Проведена оценка технологических возможностей процесса торкретирования огнеупорных футеровок и строительных ограждений. Показана роль многоструйных систем напыления керамических масс в структуре энерго- и ресурсосбережения. Представлены результаты исследования процесса получения торкрет покрытий на основе золошлаковых отходов ТЭЦ.

Ключевые слова: процесс торкретирования, огнеупорные футеровки, строительные ограждения, напыленный слой, торкрет покрытие. золошлаковые отходы ТЭЦ.

Торкретирование огнеупорных футеровок является одним из перспективных технологических процессов в металлургии, позволяющим существенно интенсифицировать технологию формирования новых и ремонта изношенных огнеупорных футеровок [1, 2]. Этот процесс широко используется в строительном производстве для нанесения формовочных, гидро- и тепло-

защитных смесей на строительные ограждения. В основе процесса лежит использование энергии струи сжатого воздуха или технологического газа для создания усилий, необходимых для формообразования и упрочнения влажной сыпучей массы на ограждающей поверхности. В качестве ограждающих поверхностей в металлургии используются огнеупорные футеровки печей и без опалубочные ограждения в строительных технологиях. В других системах напыления порошковых частиц в качестве ограждающих поверхностей используются металлические подложки, напыляемые детали, шихтовые гарнисажи и другие технологические поверхности [3, 4]. Техника напыления имеет ряд производственных преимуществ. Среди них: высокий уровень механизации, высокая производительность, широкие технологические и функциональные возможности, экологичность процесса, возможность включения технологии торкретирования в процессы энерго – и ресурсосбережения и некоторые другие.

Одним из существенных недостатков процесса напыления является неравномерность физических свойств по сечению напыленного слоя сыпучих материалов. При односопловом напылении в центре кругового напыленного слоя плотность и прочность массы примерно на 10–20 % выше, чем на периферии. В качестве примера на рисунке 1 показана макроструктура торкрет слоя на основе ЗШО ТЭЦ на поверхности огнеупорного изделия.



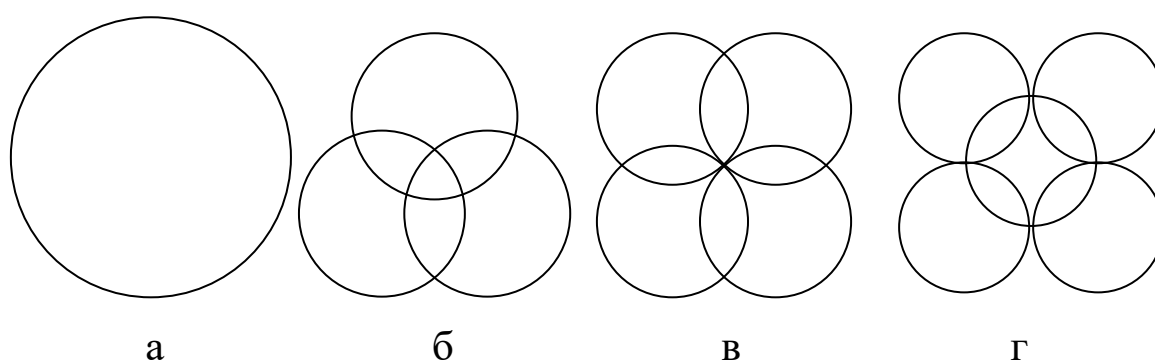
а – стандартная торкрет масса; б – торкрет масса и ЗШО фракции 0,063 – 0,1 мм;
в – торкрет масса и ЗШО фракции 0,1– 0,2 мм

Рисунок 1 – Макроструктура торкрет слоя на поверхности изделия

Неравномерность свойств напыленного слоя массы обусловлена параболическим распределением профиля скоростей и давлений сложной трехфазной газодисперсной струи, в которой на периферийной зоне потока скорость массы ниже из-за тормозящего действия окружающего воздуха. Воздействовать на профиль многофазной струи и сделать его с равномерным распределением скоростей достаточно сложно [1–3]. На практике эту проблему решают последовательным напылением массы тонкими и плоскими слоями, увеличением числа проходов, дифференциальным распределением влажности, грансостава и другими сложными мероприятиями [5, 6].

Одним из возможных решений указанной проблемы в этой области

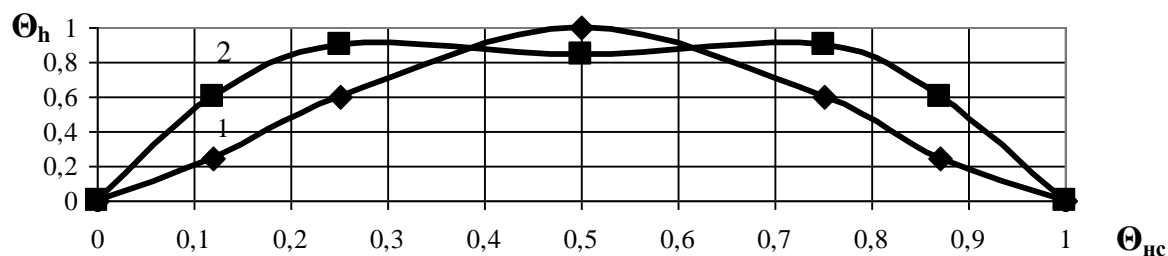
техники является применение многоструйного напыления, при котором система напыления содержит несколько (3–5) газовых сопел, которые в процессе напыления частично перекрывают периферийные зоны напыленного слоя материалов и тем самым частично нивелируют низкие свойства периферии (рисунок 2). Близкие режимы напыления были разработаны в металлургическом производстве при формировании окускованного железорудного сырья [5, 6] и показали высокую эффективность. Технологическая схема, безусловно, более сложна и требует разработки особых технологических инструкций, позволяющих отработать методику перекрытия периферийных зон напыленных слоев с помощью управляющих параметров установки. К ним можно отнести межсопловое расстояние, расстояние до напыляемой основы, объемное и массовое соотношение газ-материал и некоторые другие.



а, б, в, г – одно, трех, четырех и пятиструйное напыление

Рисунок 2 – Границы напыленного слоя материалов при многоструйных режимах напыления

К достоинствам торкретирования при подобной схеме напыления можно отнести визуализацию процесса напыления, при которой возможна оперативная коррекция режима формообразования и регулирование необходимых геометрических параметров торкрет слоя. Профиль безразмерной высоты напыленного слоя Θ_h влажной смеси в зависимости от безразмерного диаметра напыленного слоя Θ_{nc} для разных режимов торкретирования показан на рисунке 3.



1, 2 – одно и многоструйное напыление

Рисунок 3 – Профиль безразмерной высоты напыленного слоя Θ_h влажной смеси в зависимости от безразмерного диаметра напыленного слоя Θ_{nc}

Результаты напыления влажных дисперсных материалов в металлургическом производстве при формировании окускованного металлургического сырья показали принципиальную возможность осуществления многоструйной схемы напыления [7, 8]. На основе опубликованных источников установили, что в ходе реализации этой схемы неравномерность свойств по сечению напыленного слоя металлургической шихты уменьшилась до 5–10 %. Коэффициент напыления увеличился до 85–90 %. Одновременно с этим идет аэродинамическая подсушка напыленного слоя материалов. Подобная схема существенно расширяет функциональные резервы торкретирования и обладает дополнительными управляющими параметрами, к которым можно отнести регулирование скорости истечения в соплах установки, режим увлажнения и некоторые другие параметры.

Библиографический список

1. Павловец В.М. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / В.М. Павловец. – Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 268 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, 2023. – 328 с.
5. Патент № 2630789 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ очистки газов от пыли / В.М. Павловец – № 2016152375. Заявл. 28.12.2016; Опубл. 13.09.2017. Бюл. №26 //Изобретения. Полезные модели. 2019. – № 24.
6. Патент № 2567310 Российская Федерация, МКИ⁸ С22В 1/24. Способ очистки газов от пыли / В.М. Павловец – № 2014122216. Заявл. 30.05.2014; Опубл. 10.11.2015. Бюл. №31 //Изобретения. Полезные модели. 2015. – № 31.
7. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 10. – С. 15–22.
8. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – № 10. – С. 857–863.

СОДЕРЖАНИЕ

I ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ	2
КОНСТАНТЫ ПЛАВЛЕНИЯ БРОМИДА ЭРБИЯ (Ш) <i>Чумачкова Е.Г., Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф.</i>	3
ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ДОБАВОК СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Зорин И.А., Осинцев К.А., Лапишов М.А., Коновалов С.В.</i>	7
БИОМАССА СЕМЕЙСТВ ЖЕСТКОКРЫЛЫХ ПРИРОДНОГО ПАРКА «ДОНСКОЙ» ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Близгарева С.А., Брехов О.Г.</i>	11
МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Р _В МАРКИ С2, РАЗРУШЕННОГО ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ <i>Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В.</i>	19
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА СТРОЕНИЕ ОЦК-КРИСТАЛЛА ЖЕЛЕЗА <i>Гостевская А.Н., Маркидонов А.В.</i>	22
ХАРАКТЕР БЛИЖНЕГО УПОРЯДОЧЕНИЯ ШУНГИТОВОГО УГЛЕРОДА <i>Киселев В.В., Логинова С.В.</i>	26
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ FeCoCrNiMn И FeCoCrNiAl <i>Коновалов С.В., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Черепанова Г.И., Громов В.Е., Панченко И.А.</i>	29
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА <i>Кузнецова В.А., Панова В.С., Коваленко В.В.</i>	32
УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СПЛАВА АК5М2 ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНКИ Ti <i>Шляров В.В., Серебрякова А.А., Шлярова Ю.А., Загуляев Д.В.</i>	38
ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕДИ МАРКИ М1 В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК <i>Шляров В.В., Серебрякова А.А., Дробышев В.К., Загуляев Д.В.</i>	42
УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА МАРКИ VT1-0 В МАГНИТНОМ ПОЛЕ <i>Шляров В.В., Серебрякова А.А., Аксенова К.В., Шлярова Ю.А.</i>	46
МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ <i>Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Панченко И.А., Громов В.Е.</i>	50

СОДЕРЖАНИЕ СЕЛЕНА В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (ОБЗОР) <i>Самохвалова О.С., Семина И.С.</i>	54
ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Порфирьев М.А., Юрьев А.А., Кормышев В.Е., Шлярова Ю.А., Громов В.Е.</i>	60
ВЫБОР МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕЙНИТНОЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Шевченко Р.А., Сафонов С.О., Лихоузов А.М., Долгополов А.Е., Шевченко В.В.</i>	62
II МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	68
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ <i>Хомутильников В.А., Дерябина Ю.А., Лукин Е.В., Фейлер Д.Т., Фейлер С.В.</i>	68
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ <i>Сафонов С.О., Шевченко Р.А., Долгополов А.Е., Лихоузов А.М., Наумченко Д.Н.</i>	71
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ <i>Фейлер Д.Т., Хомутильников В.А., Фейлер С.В.</i>	74
ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ СТАЛИ В СОВРЕМЕННОМ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ <i>Преснякова Н.В., Пресняков Н.И., Дмитриенко В.И.</i>	78
ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОСПЛАВНОГО ГАЗА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА <i>Закурдаев Н.В., Новиков А.Ю., Дмитриенко В.И.</i>	82
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ УГЛЕРОДОМ <i>Безрукова Е.С., Чернева Е.Н., Полях О.А., Ноздрин И.В., Строкина И.В.</i>	89
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ В ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ <i>Лепихов В.С., Ильина Ю.В., Марденова А.А., Ноздрин И.В.</i>	92
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ «АЛЮМИНИЦИК» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ <i>Мартусевич Е.А., Говриленко Д.А., Митягин В.О., Ноздрин И.В.</i>	95
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ <i>Топина К.В., Сюльдина С.А., Ядыкина М.А., Полях О.А., Ноздрин И.В.</i>	99
ВАРИАНТЫ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОФОСФОРИСТОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ БАКЧАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ <i>Топина К.В., Строкина И.В., Ноздрин И.В., Полях О.А.</i>	102
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ <i>Топина К.В., Чернева Е.Н., Хорощенко А.А., Полях О.А., Ноздрин И.В.</i>	106

<p>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОКОРУНДА МАРКИ ЭХН <i>Сюльдина С.А., Полях О.А.</i>.....</p>	109
<p>РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА С УВЕЛИЧЕНИЕМ ОБЪЕМА КАМЕРЫ ТУШЕНИЯ <i>Ядыкина М.А., Полях О.А.</i>.....</p>	112
<p>НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ ИЗ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ <i>Новиков А.М., Поливко А.С., Усольцев А.А., Князев С.В., Кибко Н.В.</i></p>	115
<p>ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Васильева И.С., Оськин А.И., Князев С.В., Усольцев А.А., Кибко Н.В.</i></p>	120
<p>АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ <i>Маракулина М.Ю., Зайцева М.М., Топоев А.А., Князев С.В., Усольцев А.А.</i></p>	126
<p>МОДЕРНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНОГО УЧАСТКА В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Щапина М.Е., Акулина Н.В., Киселев П.В., Князев С.В., Усольцев А.А.</i>.....</p>	133
<p>МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРМОВОЧНОГО УЧАСТКА СТАЛЬНОГО ЛИТЬЯ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Токтарев А.А., Сурков И.В., Киселев П.В., Князев С.В., Усольцев А.А.</i></p>	138
<p>МОДЕРНИЗАЦИЯ ФОРМОВОЧНОГО УЧАСТКА ЧУГУННОГО ЛИТЬЯ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Музыченко М.В.¹, Хатнянский Е.А., Киселев П.В., Князев С.В., Усольцев А.А.</i></p>	143
<p>РЕГЕНЕРАЦИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Кузьмич А.В., Чередниченко А.В., Киселев П.В., Князев С.В., Усольцев А.А.</i></p>	149
<p>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТАЛЛОТЕРМИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СВАРКИ РЕЛЬСОВ <i>Морозов М.А., Маракулина М.Ю., Усольцев А.А., Князев С.В.</i>.....</p>	155
<p>СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ПОД МАРГАНЦОВИСТЫМ ФЛЮСОМ <i>Михно А.Р., Морозов М.А., Маракулина М.Ю., Усольцев А.А., Князев С.В.</i>.....</p>	161
<p>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ИЗГИБ ПОЛОСЫ ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ МЕЖВАЛКОВОГО ПРОСТРАНСТВА <i>Клепов Д.Н., Зорин И.А., Яшин В.В., Арышенский Е.В.</i>.....</p>	164
<p>ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ В ВЫСОКОМАГНИЕВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СКАНДИЕМ СПЛАВАХ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Зорин И.А., Клепов Д.Н., Рагазин А.А., Арышенский В.Ю.</i>.....</p>	168

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $\text{CoCrFe}_x\text{Mn}_{(40-x)}\text{Ni}$ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ <i>Панова В.С., Кузнецова В.А., Осинцев К.А., Коновалов С.В., Панченко И.А.</i>	173
СТРУКТУРА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi <i>Панченко И.А., Коновалов С.В., Гостевская А.Н., Дробышев В.К.</i>	175
ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексиус В.С.</i>	178
ВОЗДЕЙСТВИЕ СТАРЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОЕ РАСШИРЕНИЕ ТРАКТОРНОГО ПОРШНЯ ИЗ СПЛАВА АК21М2,5Н2,5 <i>Прудников А.Н., Закирова Г.К.</i>	182
МИКРОСТРУКТУРА СТАЛИ 10 ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОТЖИГА <i>Прудников А.Н., Закирова Ш.К.</i>	185
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВСТРОЕННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ <i>Баяндина М.М., Кустов А.В.</i>	188
ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНОГО ЦЕХА АО «ЕВРАЗ ЗСМК» <i>Князев С.В., Куценко А.А., Нечепорук А.И., Сорокин А.А.</i>	193
СИСТЕМА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И КОМФОРТА В ОБЖИМНОМ ЦЕХЕ <i>Куценко А.А., Назаров М.А.</i>	196
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ ТЯГОДУТЬЕВЫХ АГРЕГАТОВ ГО МОЗ НА АСПИРАЦИОННЫЕ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫЕ УСТАНОВКИ <i>Куценко А.А., Назаров М.А.</i>	199
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu <i>Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В., Панченко И.А.</i>	202
ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА <i>Сафонов С.О., Лопатина А.О., Дида Н.И., Савичева Д.Н., Тархнишвили Г.Э.</i>	205
ПРОИЗВОДСТВО СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ-РАЗДЕЛЕНИЯ <i>Вахроломеев В.А., Фастыковский А.Р.</i>	211
ЦИФРОВОЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ <i>Раковский В.С., Чернова А.А., Наумченко Д.М., Щербак А.Н., Фастыковский А.Р.</i>	214

ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ <i>Пимахин А.В., Осколкова Т.Н.</i>	219
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ГОМОГЕНИЗАЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗЫ Al_5FeSi В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКАХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si <i>Коробейников Д.В., Попова М.В.</i>	224
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА AL-15% SI ПОСЛЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ <i>Ломиворотов Н.П., Попова М.В.</i>	229
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА <i>Ломиворотов Н.П., Полунин А.М., Попова М.В.</i>	235
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МЕДИСТЫХ СИЛУМИНОВ <i>Полунин А.М., Попова М.В.</i>	241
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ Al-Mg-Si <i>Попова М.В., Михеева М.В., Караваева К.А.</i>	246
ВЛИЯНИЕ ВИДА ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников В.А., Рексиус В.С., Прудников А.Н.</i>	251
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛИТКОВ И ПРЕССОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников В.А., Шелтреков М.О., Прудников А.Н.</i>	254
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Алексеева Е.А., Кибко Н.В.</i>	258
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК <i>Михно А.Р., Махнев И.А., Крюков Р.Е., Панченко И.А.</i>	261
5D-ПЕЧАТЬ. АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО <i>Коток М.М., Коновалов С.В., Панченко И.А.</i>	265
III ЭКОЛОГИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ	267
ВСКРЫШНЫЕ ПОРОДЫ УГЛЕДОБЫЧИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Царева Е.Е., Коротков С.Г.</i>	267
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ СО ВСКРЫШНЫМИ ПОРОДАМИ <i>Царева Е.Е., Коротков С.Г.</i>	271
МАЛАКОФАУНИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ – КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И КОРРЕЛЯЦИИ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ <i>Лысенко Н.Е., Тетерина И.И.</i>	274

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ УЧАСТКА ПЕРЕРАБОТКИ ЛОМА ОТРАБОТАННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ФУТЕРОВОК <i>Рожкова О.А., Павловец В.М.</i>	277
ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОРКРЕТ ПОКРЫТИЙ <i>Рожкова О.А., Павловец В.М.</i>	286
ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНИКИ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Толстикова Ю.Ф., Павловец В.М.</i>	293
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ВЯЗКОСТИ И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МАСС НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО МАСЛА <i>Толстикова Ю.Ф., Павловец В.М.</i>	299
ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОРОЖНОЙ ПЫЛИ Г.ЧЕРЕПОВЦА <i>Хорошилов А.П., Пономарева И.В.</i>	305
ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ КЛИМАТА <i>Федорев Д.А., Бабичева Н.Б.</i>	307
ПРОБЛЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЕВОЙ ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Целлер Е.Н., Павловец В.М.</i>	311
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСВА <i>Целлер Е.Н., Павловец В.М.</i>	316
РОЛЬ ДРОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ <i>Петрунин Ю.С., Павловец В.М.</i>	322
ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ НА КОЛИЧЕСТВО ИЗВЛЕКАЕМЫХ МЕТАЛЛОВКЛЮЧЕНИЙ <i>Петрунин Ю.С., Павловец В.М.</i>	329
ПРОБЛЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕШЛАМОВ И ПОЛУЧЕНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ <i>Аликперов Р.Ч., Павловец В.М.</i>	334
ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕШЛАМОВ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Аликперов Р.Ч., Павловец В.М.</i>	340
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ОБЪЕМНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ ШИХТЫ И ПОРИСТОСТЬЮ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ <i>Платова Г.А., Павловец В.М.</i>	346

ОСОБЕННОСТИ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ОКАТЫШЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ <i>Платова Г.А., Павловец В.М.</i>	353
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕССОВОК, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ <i>Паутов З.В., Павловец В.М.</i>	362
ПРЕДПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА <i>Паутов З.В., Павловец В.М.</i>	368
НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ТОРКРЕТИРОВАНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ФУТЕРОВОК И СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ <i>Новикова К.И., Павловец В.М.</i>	376

Научное издание

НАУКА И МОЛОДЕЖЬ: ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 27

*Труды Всероссийской научной конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых*

Часть I

Под общей редакцией

С.В. Коновалова

Технический редактор

Г.А. Морина

Компьютерная верстка

Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 25.04.2023 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 25,1 Уч.-изд. л. 227,9 Тираж 300 экз. Заказ № 91

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ