

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 4 (22), 2017

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

М.В. Темлянец
(главный редактор)
Новичихин А.В.
(отв. секретарь)

П.П. Баранов
Е.П. Волынкина
Г.В. Галевский
В.Ф. Горюшкин
В.Е. Громов
Л.Т. Дворников
Жан-Мари Дрезет
Стефан Золотарефф
Пенг Као
С.В. Коновалов
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
Е.Г. Оршанская
Т.В. Петрова
Е.В. Протопопов
В.И. Пантелеев
Арвинд Сингх
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
А.В. Феоктистов
В.Н. Фрянов
В.П. Цымбал
Си Чжан Чен

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Мусорина Е.В., Рубаникова Ю.А. Перераспределение углерода в структуре рельсовой стали после длительной эксплуатации.....4
Павловец В.М. Анализ способов окомкования железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования.....9
Павловец В.М. Организация предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей.....16
Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V.....22
Александров А.А., Дашевский В.Я. Влияние алюминия на растворимость кислорода в расплавах Ni - Co, Ni - Co - Cr..
Сафонов Е.Н. Плазменная закалка заэвтектидных сталей.....26

ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- Волченко Г.Н., Челпанов В.Г., Фрянов В.Н. Совершенствование техники и технологии набрызгбетонирования для расширения сферы применения при чрезвычайных ситуациях.....36
Риб С.В., Басов В.В. Физическое моделирование геомеханических процессов в окрестности горной выработки.....45

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ

- Фомин А.С., Киселев С.В., Олексенко А.В. Структурный анализ механизма Янсена.....51

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Зоря И.В., Байдалин А.Д. Вопросы энергосбережения при утилизации тепла дымовых газов котельных на предприятиях угольной промышленности Кузбасса.....54

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ганиев И.Н., Якубов У.Ш., Сангов М.М., Хакимов А.Х. Анодное поведение сплава аж5к10 , модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl.....57

ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕДАГОГИКА

Протопопов Е.В., Феоктистов А.В., Темлянцев М.В., Гордеева О.В., Васильева М.Б. Проектное обучение как инструмент интеграции деятельности вуза в образовательное пространство региона (опыт внедрения технологии проектного обучения в СибГИУ).....63

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ

К юбилею Рожихиной Ирины Дмитриевны.....70

Рефераты.....72

К сведению авторов.....78

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС77-52991 от 01.03.2013 г.

Адрес редакции:

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М
тел. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г
тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г
тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Подписано в печать

25.12.2017 г.

Выход в свет

29.12.2017 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,5.

Уч.-изд.л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 752.

Цена свободная.

А.А. Юрьев¹, Ю.Ф. Иванов^{2,3}, В.Е. Громов¹, Е.В. Мусорина¹, Ю.А. Рубанникова¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Институт сильноточной электроники СО РАН

³Томский политехнический университет

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В СТРУКТУРЕ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

Углерод в структуре стали может находиться в твердом растворе на основе α - и γ -железа (на позиции элементов внедрения), на дислокациях (в виде атмосфер Коттрелла и Максвелла), на межфазных (карбид/матрица) и внутрифазных (границы зерен, пакетов и кристаллы пакетного и пластинчатого мартенсита) границах, в частицах карбидной фазы [1 – 12]. Количество углерода в твердых растворах на основе α - и γ -железа обычно оценивается по относительному изменению параметра кристаллической решетки этих фаз [13 – 15]. Оценку количества углерода в карбидных частицах проводят исходя из химического состава карбида, типа кристаллической решетки и объемной доли частиц карбидной фазы в стали. Для цементита (в предположении стехиометрического состава) подобный расчет осуществлен в работе [16]. Оценка количества углерода, расположенного на дефектах (дислокациях и границах раздела), является наиболее сложным моментом и практически не поддается прямому экспериментальному определению. Из ситуации выходят, используя косвенные методы, например, методы внутреннего трения и микрорентгеноспектрального анализа [3, 4 – 8, 12], а также проводят теоретические оценки. Наиболее полный анализ перераспределения углерода в нелегированных сталях в зависимости от температуры отпуска осуществлен в работе [5], в случае легированных сталей (состояние закалки и низкотемпературного отпуска) – в работах [17, 18]. В работе [19] представлены результаты количественных исследований структурно-фазового состояния закаленной стали марки 38ХНЗМФА, выявлены места распо-

ложения углерода и выполнен анализ его перераспределения в зависимости от температуры аустенитизации. В работе [2] подобные оценки были выполнены для закаленной стали; в работе [20] – для сталей с бейнитной структурой, подвергнутых пластической деформации одноосным сжатием с различной степенью деформации; в работе [21] – для углеродистых сталей, подвергнутых различным видам нагружения. Рельсовая сталь марки Э76ХФ относится к высокоуглеродистым сталям перлитного класса. В современных условиях больших нагрузок на ось и высоких скоростей движения поверхностные слои рельсов испытывают при длительной эксплуатации интенсивные пластические деформации, что приводит к эволюции структурно-фазовых состояний. Так, пластины цементита либо изогнуты, либо разрушены, на межфазных границах отмечается крайне высокая плотность дислокаций, происходит растворение цементита и образование аустенита за счет обратного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения [22 – 28]. Эти процессы приводят к перераспределению углерода, что в конечном счете отражается на механических свойствах [22 – 28]. Поэтому выявление закономерностей эволюции карбидной фазы, дефектной субструктуры и перераспределения углерода при длительной эксплуатации рельсов приобретает особую актуальность и имеет научную и практическую ценность.

Целью настоящей работы является анализ методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии структурно-фазового состояния и распределения атомов углерода в металле дифференцированно закаленных 100 метровых рельсов после длительной эксплуатации.

В качестве материала исследования использовали образцы дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 15-12-00010.

Выражаем благодарность Е.В. Полевому за предоставленные образцы рельсов и результаты анализа макроструктуры.

в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». При проверочном анализе химического состава металла

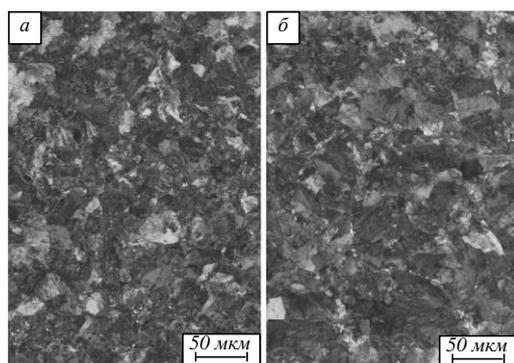


Рис. 1. Микроструктура рельсовой стали после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто на расстоянии 2 мм (а), 10 мм (б) от поверхности катания (поперечное сечение)

рельсов получены следующие результаты: 0,74 % С; 0,75 % Мn; 0,60 % Si; 0,011 % Р; 0,010 % S; 0,42 % Cr; 0,07 % Ni; 0,14 % Cu; 0,04 % V; 0,003 % Al; 0,003 % Ti; 0,012 % N; 0,0014 % O₂ (по массе).

По содержанию всех химических элементов металл рельсов удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 для стали марки Э76ХФ. Макроструктуру металла рельсов выявляли в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2013 на полнопрофильном темплете, вырезанном из рельса в поперечном направлении, после травления в 50 %-ном водном растворе соляной кислоты. Исследования микроструктуры металла головки рельсов проводили методом оптической микроскопии после электролитического полирования поверхности микрошлифов в 5 %-ном уксусном растворе хлорной кислоты с последующим травлением в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Исследования фазового состава и состояния кристаллической решетки осуществляли

методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu). Исследования дефектной субструктуры и состояния карбидной фазы рельса осуществляли методами дифракционной электронной микроскопии (просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ)) [29 – 32]. Фольги для исследования готовили путем электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом из области катания на расстоянии 2, 10 мм и вблизи поверхности катания вдоль центральной оси.

Металлографически установлено, что микроструктура металла представляет собой пластинчатый перлит балла 2-3 шкалы 1 ГОСТ 8233 с разрозненными участками феррита по границам зерен, количество которого не превышает 5 % и оценивается баллом 1,5 шкалы 7 ГОСТ 8233. Бейнит в микроструктуре исследуемого рельса не выявлен (рис. 1). По мере удаления от поверхности перлит приобретает более грубое строение. При исследовании травленых шлифов установлено, что с поверхности катания наблюдается значительно деформированная структура на глубину до 200 мкм, по которой развивается растрескивание.

По морфологическому признаку ПЭМ выделены следующие структурные составляющие: перлит пластинчатый, зерна феррито-карбидной смеси, зерна структурно свободного феррита. Как и в работе [28] основным типом структуры исследуемой стали являются зерна пластинчатого перлита, относительное содержание которых в материале 0,7; относительное содержание зерен феррито-карбидной смеси – 0,25; остальное – зерна структурно свободного феррита. Близкое к исходной стали состояние металла рельсов после пропущенного тоннажа 691,8 млн т брутто выявляется на расстоянии 10 мм от поверхности катания вдоль центральной оси (рис. 2).

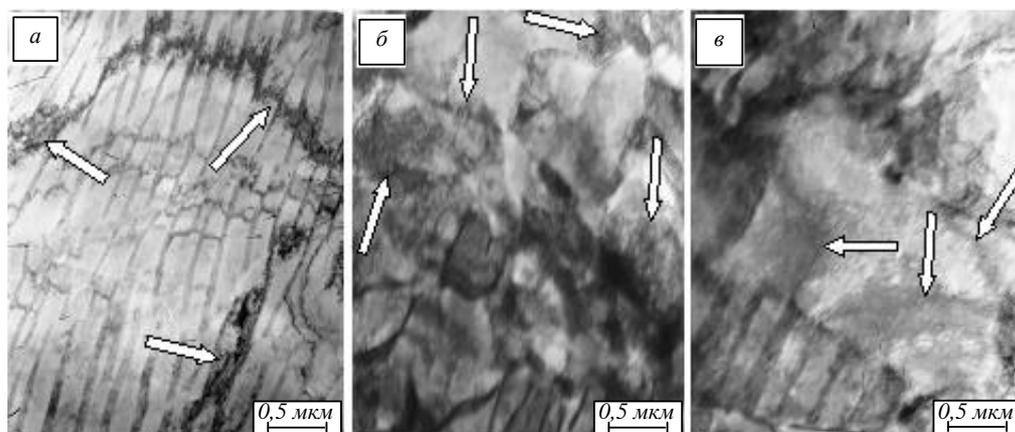


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры рельсовой стали на расстоянии 10 мм от поверхности катания вдоль центральной оси после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто (стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры):

а – пластинчатый перлит; б – зерна феррито-карбидной смеси; в – зерна структурно-свободного феррита

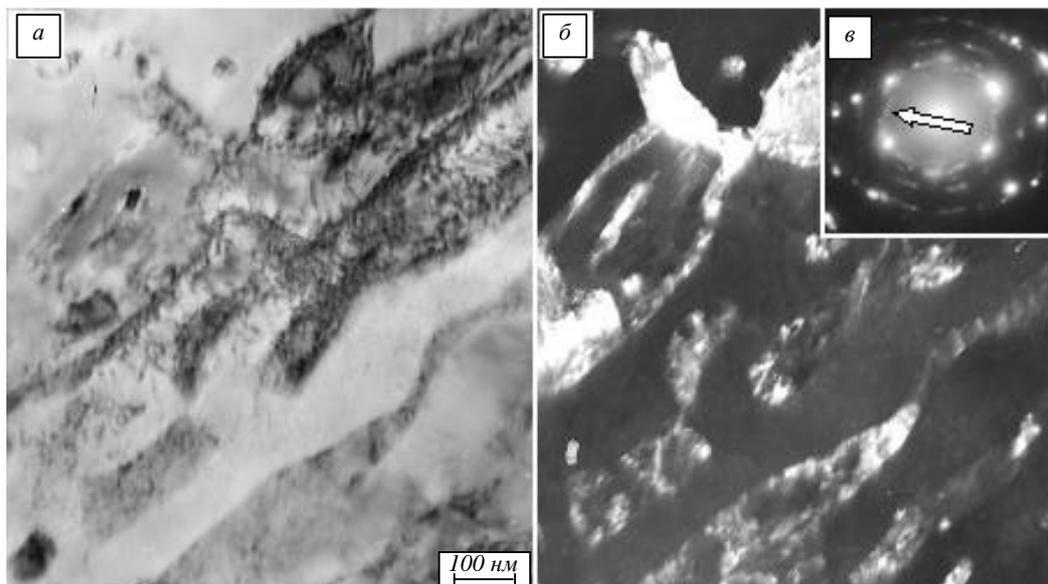


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры рельсовой стали в центре головки поверхности катания (поверхностный слой толщиной примерно 2 мм):
а – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексе [031]Fe₃C; *в* – микроэлектронграмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Отличительной особенностью структуры этого слоя является большое количество изгибных экстинкционных контуров, их присутствие указывает на упругопластические искажения кристаллической решетки материала, что может быть вызвано механическим воздействием подвижного состава на металл рельсов в процессе длительной эксплуатации [2].

Эксплуатация рельсов сопровождается следующими процессами. Во-первых, наблюдается рост скалярной плотности дислокаций в пределах от $2,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (в слое, расположенном на расстоянии 10 мм от поверхности катания) до $3,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ вблизи поверхности катания. При этом тип дислокационной субструктуры (хаотически распределенные дислокации и дислокационные сетки) не изменяется. Во-вторых, разрушается структура пластинчатого перлита путем разрезания пластин цементита и их растворением. Характерное изображение формирующейся при этом структуры приведено на рис. 3.

Разрушение пластин цементита сопровождается формированием частиц глобулярной формы, размеры которых в поверхностном слое составляют 30 нм (поперечные) и 50 нм (продольные). По мере удаления от поверхности катания размеры частиц увеличиваются и в слое, расположенном на расстоянии 10 мм от поверхности катания, составляют 30 – 215 нм. Исследования, выполненные методами темнопольного анализа, показывают, что эксплуатация рельсов сопровождается дроблением пластин цементита с последующим их разрушени-

ем. Рефлексы карбидной фазы на микроэлектронграмме, полученной с таких пластин, имеют как радиальное, так и азимутальное размытие, что может свидетельствовать о высоком уровне дефектности кристаллической решетки цементита, а также изменении параметра кристаллической решетки вследствие ухода атомов углерода [33]. В-третьих, одновременно с разрушением колоний перлита снижается объемная доля цементита в исследуемой стали от 11,2 % в слое, расположенном на глубине 10 мм, до 4,9 % в поверхностном слое.

Выявленные количественные закономерности изменения параметров структуры поверхности катания в центре головки позволили проанализировать распределение атомов углерода в структуре стали. Оценки относительного содержания атомов углерода на структурных элементах стали осуществляли по выражениям, обобщенным в табл. 1.

Результаты выполненных оценок представлены в табл. 2.

Проведенные оценки показали, что эксплуатация рельсовой стали сопровождается существенным перераспределением атомов углерода в поверхностном слое рельсов. Если в исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита, то после эксплуатации рельсов местом расположения углерода, наряду с частицами цементита, являются дефекты кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен).

Анализ распределения углерода в стали

Место расположения углерода	Оценочное выражение	Источник
Твердый раствор на основе α -железа	$\Delta C_{\alpha} = \Delta V_{\alpha} \frac{a_{\alpha} - a_{\alpha}^0}{39 \pm 4} 10^3$	[2, 12, 13]
Частицы карбидных фаз	$\Delta C(\text{Fe}_3\text{C}) = 0,07 \Delta V_i$	[2, 16, 19]
Элементы дефектной структуры	$\Delta C_{\text{д}} = C_0 - \Delta C_{\alpha} - \Delta C(\text{Fe}_3\text{C})$	[2, 19]

П р и м е ч а н и е. ΔV_{α} и ΔV_i – объемная доля α -железа и карбидной фаз; a_{α} – текущий параметр решетки α -фазы; $a_{\alpha}^0 = 0,28668$ нм; $a_{\alpha} = 0,28782$ нм; C_0 – среднее содержание углерода в стали.

Выводы. Методами рентгеноструктурного анализа и электронной дифракционной микроскопии проведены исследования фазового состава, дефектной макро- и микроструктуры металла поверхности катания вдоль центральной оси дифференцированно термоупрочненных рельсов категории ДТ350 после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается множественным преобразованием структуры стали. На микроуровне это проявляется в увеличении скалярной плотности дислокаций, формировании упругопластических полей напряжений и разрушении пластин цементита перлитных колоний. Показано, что атомы углерода, покинувшие кристаллическую решетку частиц цементита, располагаются преимущественно на дефектах кристаллической структуры стали (дислокации, границы зерен и субзерен).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
2. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. – 174 с.
3. Speich G., Swann P.R. Yield strength and transformation substructure of quenched iron-nickel alloys // J. Iron and Steel Inst. 1965. Vol. 203. No. 4. P. 480 – 485.
4. Белоус М.В., Черепин В.Т., Васильев М.А. Превращения при отпуске стали. – М.: Металлургия, 1973. – 232 с.
5. Белоус М.В. Распределение углерода по состояниям при отпуске закаленной стали // Металлофизика. Респ. межвед. сб. 1970. № 32. С. 79 – 82.
6. Белоус М.В., Шаталова Л.А., Шейко Ю.П. Состояние углерода в отпущенной и холоднодеформированной стали. Первое превращение при отпуске // ФММ. 1994. Т. 78. № 2. С. 99 – 106.
7. Белоус М.В., Москаленок Ю.Н., Черепин В.Т., Шейко Ю.П., Мешашти С. Состояние углерода в отпущенной и холоднодеформированной стали. Объемные эффекты при нагреве закаленных сплавов Fe – C // ФММ. 1995. Т. 80. № 3. С. 103 – 114.
8. Белоус М.В., Новожилов В.Б., Шаталова Л.С., Шейко Ю.П. Распределение углерода по состояниям в отпущенной стали // ФММ. 1995. Т. 79. № 4. С. 128 – 137.
9. Изотов В.И., Козлова А.Г. Распределение углерода в пакете мартенситных кристаллов и его влияние на прочность закаленных низколегированных сталей // ФММ. 1995. Т. 80. № 1. С. 97 – 111.

Распределение углерода в структуре рельсовой стали после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто

Структурный элемент	Концентрация углерода, % (по массе)		
	Поверхность	2 мм от поверхности	10 мм от поверхности
Частицы цементита	0,3300	0,71	0,75
Кристаллическая решетка α -железа	0,0284	0	0
Дефекты кристаллической структуры	0,3816	0,03	0

10. Изотов В.И., Филиппов Г.А. Влияние переохлаждения при нормальном $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении на распределение углерода в феррите низколегированной стали // ФММ. 1999. Т. 87. № 4. С. 72 – 77.
11. Speich G.R. Tempering of low-carbon martensite // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. Vol. 245. No. 10. P. 2553 – 2564.
12. Kalich D., Roberts E.M. On the distribution of carbon in martensite // Met. Trans. 1971. Vol. 2. No. 10. P. 2783 – 2790.
13. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon // Trans. Met. Soc. AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1818 – 1820.
14. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameters of Fe-C austenite of room temperature // Trans. Met. Soc. AIME. 1969. Vol. 246. No. 8. P. 1834 – 1836.
15. Веселов С.И., Спектор Е.З. Зависимость параметра решетки аустенита от содержания углерода при высоких температурах // ФММ. 1972. Т. 34. № 5. С. 895 – 896.
16. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* – М.: Металлургия, 1977. – 407 с.
17. Thomas G., Sarikaya M. Lath martensites in carbon steels – are they bainitic? – Proc. Int. Conf. Solid-Solid Phases Transform., Pittsburgh, Pa, Aug. 10-14, 1981. – Warrendale, Pa, 1982. P. 999 – 1003.
18. Sarikaya M., Thomas G., Steeds J.W. e.a. Solute element partitioning and austenite stabilization in steels. – Proc. Int. Conf. Solid-Solid Phases Transform., Pittsburgh, Pa, Aug. 10-14, 1981. – Warrendale, Pa, 1982. P. 1421 – 1425.
19. Иванов Ю.Ф., Попова Н.А., Гладышев С.А., Козлов Э.В. Взаимодействие углерода с дефектами и процессы карбидообразования в конструкционных сталях. – В сб. трудов «Взаимодействие дефектов кристаллической решетки и свойства». – Тула: изд. ТулПИ, 1986. С. 100 – 105.
20. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Никитина Е.Н. Бейнитная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. – 177 с.
21. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Попова Н.А., Коновалов С.В., Конева Н.А. Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали. – Новокузнецк: Полиграфист, 2016. – 510 с.
22. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the Surface Layers of Railway Rails and Wheels // Steel tech. 2008. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 23.
23. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Sauvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation in nanoscale Fe-C composite // Acta Mater. 2006. Vol. 54. P. 1659 – 1669.
24. Ning Jiang-li, Courtois-Manara E., Kormanaeva L., Ganeev A.V., Valiev R.Z., Kubel C., Ivanisenko Yu. Tensile properties and work hardening behaviors of ultrafine grained carbon steel and pure iron processed by warm high pressure torsion // Mater. Sci. and Eng. A. 2013. Vol. 581. P. 81 – 89.
25. Gavriljuk V.G. Decomposition of cementite in pearlitic steel due to plastic deformation // Mater. Sci. and Eng. A. 2003. Vol. 345. P. 81 – 89.
26. Li Y.J., Chai P., Bochers C., Westerkamp S., Goto S., Raabe D., Kirchheim R. Atomic-scale mechanisms of deformation-induced cementite decomposition in pearlite // Acta Mater. 2011. Vol. 59. P. 3965 – 3977.
27. Gavriljuk V.G. Effect of interlamellar spacing on cementite dissolution during wire drawing of pearlitic steel wires // Scripta Mater. 2001. Vol. 45. P. 1469 – 1472.
28. Microstructure of quenched rails / V.E. Gromov, A.B. Yuriev, K.V. Morozov, Yu.F. Ivanov Cambridge: CISP Ltd, 2016. – 156 p.
29. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
30. Ray F. Egerton Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. – Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005. – 211 p.
31. Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
32. Barry Carter C., David B., Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
33. Громов В.Е., Юрьев А.А., Морозов К.В. и др. Эволюция тонкой структуры в поверхностных слоях 100-м дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 2. С. 267 – 273.

© 2017 г. А.А. Юрьев, Ю.Ф. Иванов,
В.Е. Громов, Е.В. Мусорина,
Ю.А. Рубанникова

Поступила 20 октября 2017 г.

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОКОМКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ В РЕЖИМЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей по форме, близкой форме куба, в холостой зоне тарели методом напыления и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [1, 2]. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по их сечению и организовать процесс формирования массы окатыша с более высокой скоростью.

Другим достоинством технологии принудительного зародышеобразования является возможность использования трудноокомкуемых минеральных и техногенных материалов (углеродсодержащих, древесных, грубодисперсных и др.) для формообразования. Низкие адгезионные свойства этих материалов предлагается компенсировать усилиями, возникающими при напылении увлажненной дисперсной шихты сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж окомкователя. Эти возможности технологии особенно актуальны для окусования дисперсного техногенного сырья, одним из методов формообразования которого является производство окатышей [3, 4].

Техника напыления позволяет расширить число управляющих воздействий на процесс зародышеобразования и формирования окатышей. К их числу относятся: давление, расход и угол атаки струи сжатого воздуха, соотношение воздух – шихта и их влажности, конструктивные характеристики струйного аппарата и механизмов деления напыленного слоя шихты. Эти параметры в большинстве способов окомкования должны быть увязаны с назначением оптимального угла наклона днища тарели к горизонту и ее частоты вращения [1, 2]. Для этого требуются теоретическая проработка силового воздействия на зародыш сложной формы в режиме переката со стороны окомкователя и экспериментальная проработка условий пластической деформации зародышей

в процессе принудительного зародышеобразования.

Целью настоящей работы явился анализ способов окомкования железорудной шихты, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

На рис. 1 показано условие устойчивости зародыша на наклонной плоскости шихтового гарнисажа (ШГ) в отсутствие центробежной силы. Устойчивость зародыша на шихтовом гарнисаже определяется горизонтальным положением его центра масс (Ц) относительно линии опоры – ребра OO_1 (рис. 1). Это условие соблюдается в стационарном режиме работы окомкователя, когда зародыш правильной формы, образующийся в холостой зоне тарели (рис. 1, а), поступает в рабочую зону окомкователя и в процессе переката деформируется и наращивает свою массу (рис. 1, б, в).

Если линия действующей силы (в данном случае силы тяжести) переместится за опорное ребро OO_1 , то сформируется момент силы, который выведет зародыш из состояния устойчивости и обеспечит его перекаат (рис. 1, г). Это справедливо для зародыша со смятыми (деформированными) углами и ребрами (рис. 1, д) и в отношении зародыша, на котором при перекаате частично сформирована оболочка окатыша (рис. 1, е). Положение устойчивости характеризуется углом перекаата γ_k , составленным из перпендикуляра на опорную плоскость ШГ и линией действующей силы. Графически этот угол можно зафиксировать при $\gamma = \gamma_k$. Выход из состояния устойчивости и создание условий для перекаата окатышей происходят при $\gamma > \gamma_k$. Для этих условий у зародыша правильной кубической формы угол перекаата превышает 45° (рис. 1, а). Угол перекаата зависит от частоты вращения тарели окомкователя, угла наклона днища тарели к горизонту и степени деформации зародыша. В свою очередь более высокая степень деформации позволяет назначить более узкие интервалы изменения угла наклона днища тарели к горизонту [5]. Поэтому в процессе зародышеобразования желательнее иметь максимальную степень деформации зародыша.

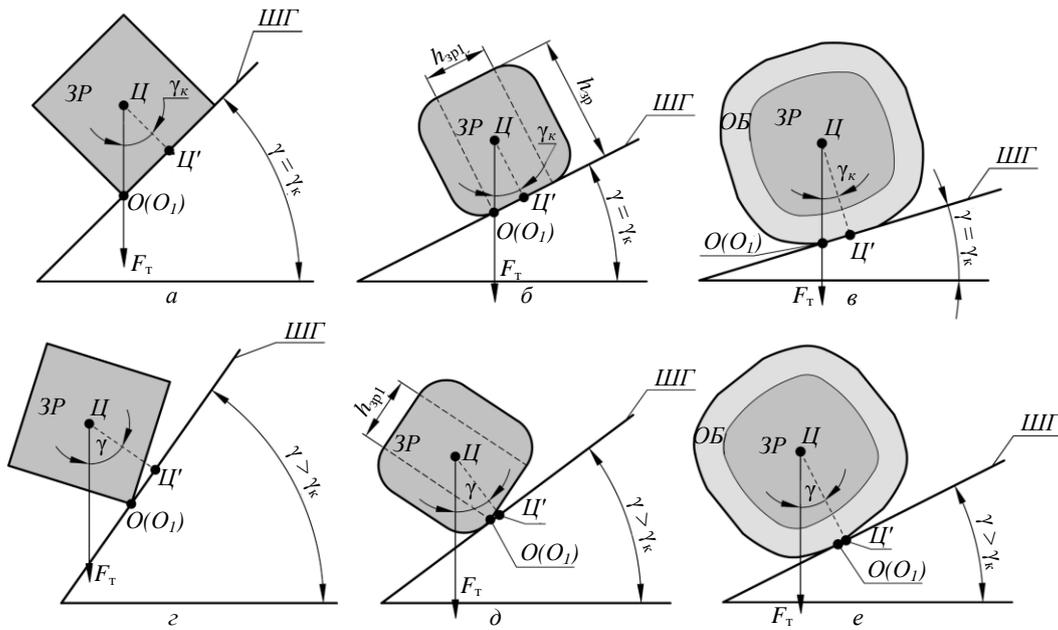


Рис. 1. Схемы, иллюстрирующие устойчивость (а – е) зародыша и режим его переката (z – e) на ШГ; зародыши: а, z – правильной кубической формы; б, д – с частично смятыми углами и ребрами; в, е – с полностью смятыми углами и ребрами

Угол переката может быть определен из треугольника ЦЦ'О (рис. 1, б) как арктангенс отношения его сторон:

$$\gamma_k = \arctg(h_{zp1} / h_{zp}) = \arctg K_{см}, \quad (1)$$

где $K_{см} = h_{zp1} / h_{zp}$ – коэффициент смятия зародыша (может принимать значения в диапазоне 0 – 1); h_{zp} – размер ребра несмятого зародыша после зародышеобразования, м; h_{zp1} – размер ребра смятого (деформированного) зародыша, м.

В работе [5] установлено, что назначение режима окомкования тарельчатого окомкователя (частоты вращения, угла наклона тарели к горизонту) в технологии принудительного зародышеобразования зависит от формы зародыша и коэффициента смятия последнего. Формула (1), по которой определяется параметр γ_k с учетом коэффициента $K_{см}$, справедлива для симметрично-сминаемого зародыша. В практических условиях зародышеобразования смятие происходит несимметрично. Причем в первую очередь смятию подвергаются углы зародыша, поэтому указанная формула справедлива только для одного из двенадцати произвольно выбранного ребра. Поэтому для повышения достоверности вычислений параметра $K_{см}$ количество отобранных для измерительных действий зародышей должно быть не менее десяти. С учетом смятия углов и уменьшения размеров всех граней зародыша формула (1) примет следующий вид:

$$K_{см} = \sum_1^n \left\{ \sum_{i=1}^{12} h_{zpi} / (12 n) \right\} / \sum_1^n \left\{ \sum_{i=1}^{12} h_{zi} / (12 n) \right\}, \quad (2)$$

где $i = 12$ – число граней зародыша; $n = 10$ – количество зародышей, отобранных для измерения размеров ребер и взятых для анализа.

Экспериментальные схемы, реализующие режим окомкования железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования (рис. 2), были оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности (получены патенты). На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь диаметром $D = 0,62$ м работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели к горизонту составлял 45° . Расход шихты на зародышеобразование не превышал 0,05 кг/с. Все технологические схемы были ориентированы на получение несмятых зародышей правильной кубической формы с размерами граней h_{zp} на уровне 10 – 11 мм. В работе [2] подробно показана техническая возможность получения зародышей такой формы. Зародыши для расчета параметра $K_{см}$ и анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после зародышеобразования (несмятые) и в нижней части холостой зоны тарели (смятые).

В ходе эксперимента от места деления напыленного слоя (НС) шихты на зародыши и до нижней части холостой зоны зародыши проходили относительное расстояние L/D , где происходило частичное смятие их углов и граней за счет переката по гарнисажу и ударного

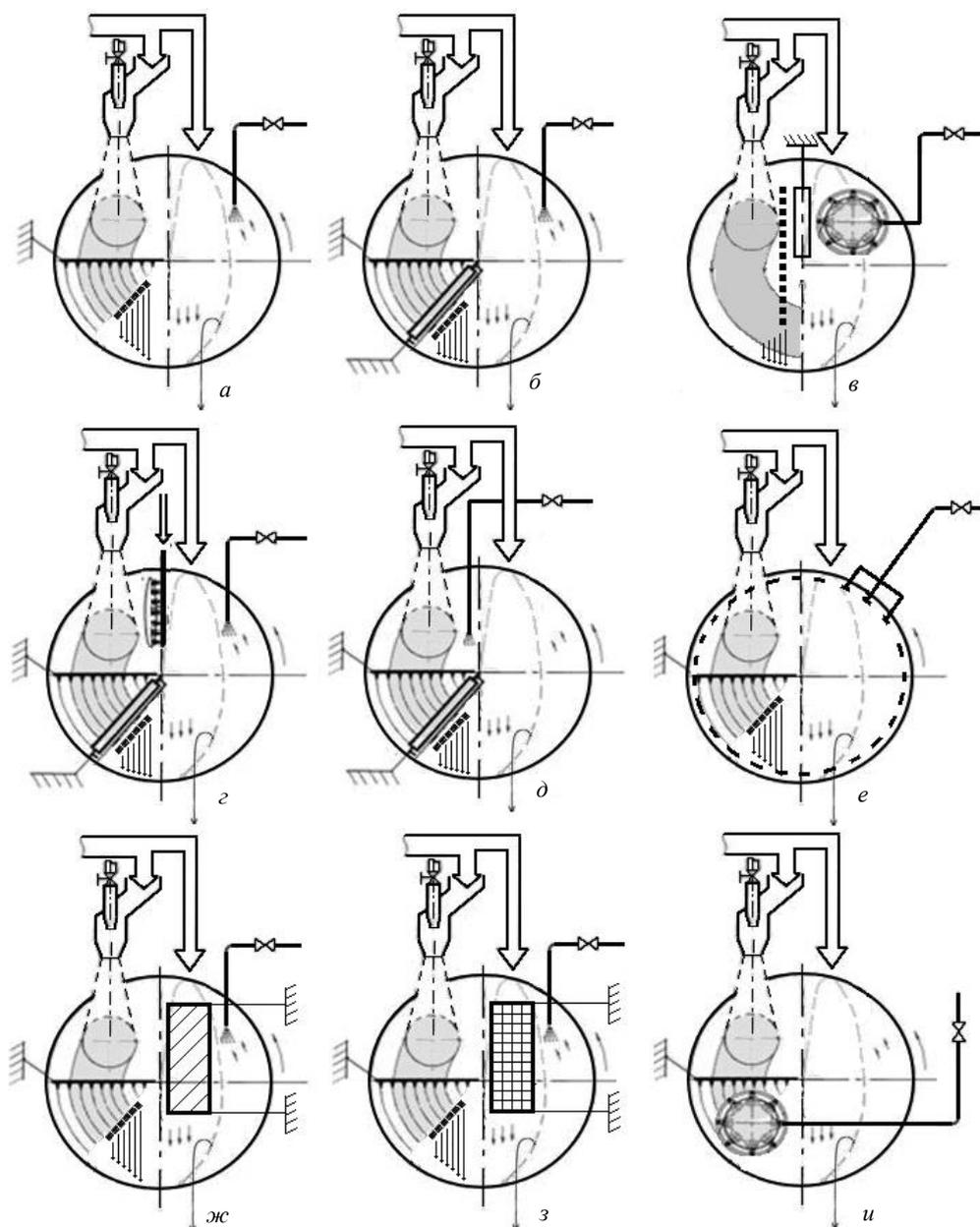


Рис. 2. Экспериментальные схемы, реализующие окомкование железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования:

a – плужковым делителем; *б* – вращающимся барабаном; *в* – то же в верхней части холостой зоны; *г* – то же с увлажнением напыленного слоя; *д* – то же с его увлажнением; *е* – плужковым делителем с профилированием и увлажнением бортового гарнисажа; *ж* – плужковым делителем и ленточным пригрузом, установленным над нисходящим слоем зародышей; *з* – то же с ленточным пригрузом, снабженным ячейковой решеткой; *и* – вращающимся барабаном и увлажнением массива зародышей

взаимодействия друг с другом. Соотношение L/D является конструктивной характеристикой и безразмерным параметром физической модели (экспериментальной схемы), непосредственно влияющей на выходные показатели способов окомкования и позволяющей перенести результаты моделирования на производственный объект [1, 2].

Сложность экспериментальной схемы (ЭС) определяли по количеству конструктивных элементов схемы, наличию вращающихся узлов, налипания шихты на детали схемы, по

появлению отказов и затруднений в работе. Численное значение выхода годного (ВГ) вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи (фракции ≤ 5 мм) в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 мин).

Размеры граней зародышей измеряли с помощью измерительного шаблона и штангенциркуля с точностью 0,1 мм. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Результаты экспериментов

Номер ЭС (рис. 1)	Показатели работы экспериментальной схемы			
	L/D	Сложность ЭС	ВГ, %	$K_{см}$
<i>a</i>	0,25 – 0,30	Простая	85	0,92
<i>б</i>	0,25 – 0,30	Сложная	92	0,87
<i>в</i>	0,80 – 1,00	Сложная	88	0,74
<i>г</i>	0,25 – 0,30	Сложная	94	0,79
<i>д</i>	0,25 – 0,30	Сложная	93	0,91
<i>e</i>	0,25 – 0,30	Простая	86	0,90
<i>ж</i>	0,25 – 0,30	Сложная	78	0,78
<i>з</i>	0,25 – 0,30	Сложная	73	0,77
<i>и</i>	0,25 – 0,30	Сложная	94	0,78

Процесс зародышеобразования и деления НС по схеме *a* осуществляется плужковым делителем достаточно простой формы, в котором отсутствуют вращающиеся элементы конструкции, что является достоинством схемы [6, 7]. Плужковый делитель сочетает в одном устройстве функции продольного и поперечного делений напыленного слоя. Для уменьшения налипания шихты на делитель его поверхность покрыта бакелитовым лаком. Недостатком схемы является большой разброс размеров зародышей, которые преимущественно имеют форму параллелепипеда. В этой связи перекаат зародышей происходит перпендикулярно большей (продольной) оси зародыша. Поэтому изменение формы зародыша происходит несимметрично, а наибольшей деформации подвержены только нескольких граней. В этой связи пластическая деформация зародышей по этой схеме развивается в минимальной степени, а значение $K_{см}$ самое высокое из всех представленных ниже технических решений. Эксперименты, проведенные по указанной технической схеме [2], позволили впоследствии усовершенствовать конструкцию делителей напыленного слоя шихты и получить ряд работоспособных технических решений, способных управлять процессами принудительно зародышеобразования и окомкования.

По схеме *б* зародышеобразование и деление напыленного слоя осуществляются снабженным ребрами вращающимся барабаном, получающим движение от ШГ [2]. Эта схема аппаратно более сложная по сравнению со схемой *a*, но обладает основным преимуществом – дает возможность получить зародыши с узким фракционным составом ($h_{зр} = 10 - 11$ мм). Относительное расстояние (длина пути) L/D имеет практически такое же значение, как и в схеме *a*. Это обусловлено тем, что габариты продольного делителя существенно уменьшились по сравнению с габаритами плужкового делителя.

На освободившейся площади днища тарели был установлен вращающийся барабан с ребрами из нержавеющей стали. Продольный делитель выполнен в виде тонких ножей, покрытых бакелитовым лаком, что позволило почти полностью исключить налипание шихты. Установлено, что уменьшение диаметра вращающегося барабана увеличивает скорость его вращения, а это дополнительно снижает налипание шихты на металлические части делителей. Опытным путем установлено, что снижение налипания влажной шихты на металл можно обеспечить интенсивным орошением (смывом) поверхности делителей распыленной водой. Образующиеся зародыши имеют форму, близкую к форме куба. Они перекаатываются по всем своим граням, что усиливает процесс пластической деформации и снижает коэффициент смятия до 0,87. Необходимо отметить, что в технике действующего производства проблема налипания шихты на гарнисаж окомкователя решается путем установки разнообразных по конструкции очистительных устройств [8 – 11]. Главное требование к таким устройствам – это высокая износостойкость их поверхности. При работе очистителей не должны формироваться бесформенные куски шихты и возникать затруднения при перекаате зародышей.

По технической схеме *в* деление напыленного слоя на зародыши осуществляется вращающимся барабаном с ребрами, аналогичным схеме *б*. Отличие заключается в том, что деление НС происходит на выходе из нисходящего слоя материалов на более удаленном расстоянии от нижней части холостой зоны тарели [2]. Нахождение НС под давлением слоя восходящих материалов в рабочей зоне окомкователя позволяет повысить прочность зародышей и выровнять плотность НС по его длине. Поэтому протяженность пути зародышей по этой схеме существенно возрастает до $L/D = 0,8 - 1,0$. Перекаат зародышей и ударное взаимодействие на

этом расстоянии способствуют более интенсивному смятию их углов и ребер и обеспечивают значение параметра $K_{см}$ до 0,74. Это единственная экспериментальная схема, построенная без привлечения дополнительных конструктивных элементов и имеющая максимальное значение L/D и минимальную величину $K_{см}$.

По схеме z деление напыленного слоя на зародыши осуществляется аналогично схеме b , но НС перед делением целенаправленно переувлажняют до $(1,05 - 1,10) W_{ш}$, где $W_{ш}$ – влажность загружаемой шихты, %. Поэтому образующиеся зародыши более пластичные и в большей степени сминаемы до $K_{см}=0,79$. Повышенная влажность зародышей также способствует эффективному доокомкованию шихтовой мелочи и получению более высокого значения ВГ. Можно прогнозировать, что комбинация позиций b и z может дать максимальный эффект по коэффициенту смятия и снизить его значение ориентировочно до 0,6 – 0,7. Выход годного может превысить 95 %. К недостаткам указанной схемы возможно отнести избыточное содержание влаги в зародышах, что может создать дополнительные трудности при последующей термической обработке.

Увлажнение ШГ до влажности $W_{ш} = (0,9 - 1,1) W_{ш}$ (схема d) способствует более эффективному сцеплению НС с ШГ и повышению степени напыления шихты. Поэтому в процессе принудительного зародышеобразования эта технологическая операция направлена преимущественно на повышение эффективности напыления шихты на движущийся шихтовый гарнисаж [2]. На процесс деления НС на зародыши она практически не влияет. Поэтому все параметры (ВГ = 93 %, $K_{см} = 0,91$) близки к параметрам, полученным при реализации схемы b . К недостаткам можно отнести возможность диффузии влаги из ШГ в напыленный слой, что также может усложнить процесс последующей термической сушки.

На бортовом шихтовом гарнисаже окомкователя согласно технологической схеме e выполнены продольные волнообразные каналы, которые в момент удара зародышей о борта способствуют мягкому смятию углов зародышей и снижению значений $K_{см}$ до 0,90. Эта технологическая схема отличается простотой, отсутствием вращающихся частей и минимальным налипанием шихты на элементы конструкции. Недостатком ее является необходимость выполнения волнообразных каналов малого диаметра (20 – 25 мм) на поверхности шихтового гарнисажа.

Установка массивного пригруза (лента, нагруженная влажной шихтой) на поверхности

перекатывающихся зародышей в рабочей зоне окомкователя по схемам $ж$ и $з$ является достаточно простым и эффективным мероприятием [2]. По схеме $ж$ на слое зародышей установлена гладкая эластичная лента, изготовленная из резины или ткани. По схеме $з$ поверхность ленты дополнительно снабжена пластмассовой ячейковой решеткой, увеличивающей массу пригруза и усиливающей пластическую деформацию зародышей, позволяющей снизить параметр $K_{см}$ до 0,77. Выход годного снижается до 73 % за счет частичного захвата шихты ячейками пригруза. К недостатку этой схемы можно отнести некоторое ограничение визуализации процесса окомкования и снижение контроля над технологическим процессом окомкования.

Переувлажнение образующихся зародышей в зоне зародышеобразования до $W_{зр} = (1,05 - 1,15) W_{ш}$ увеличивает их пластичность аналогично схеме z , что позволяет достичь относительно низкого значения $K_{см} = 0,78$. Эта схема также близка по сложности схеме z , по параметру L/D и относится к наиболее эффективной по выходу годного, но имеет тот же недостаток.

Можно отметить, что технически простые схемы a , e , направленные на регулирование пластической деформации зародышей, менее эффективны, чем более сложные. Применение технологически более сложных схем на практике позволяет получить коэффициент смятия в пределах значений 0,74 – 0,91, а выход годного обеспечить на уровне 73 – 94 %. Комбинация схем b , z и b , $и$ позволяет прогнозировать снижение параметра $K_{см}$ до 0,6 – 0,7. Но в этом случае теряются преимущества технологии получения окатышей с пониженным содержанием влаги в зародышевом центре.

Общим недостатком проанализированных технических схем является трудность согласования режима зародышеобразования, осуществляемого в холостой зоне тарели окомкователя, и технологического режима переката, реализуемого в рабочей области тарели окомкователя, на одном технологическом агрегате. Эта трудность заключается в том, что после процесса зародышеобразования зародыш представляет собой недеформированный брикет правильной кубической формы. Если условно предположить, что после переката зародышей в холостой зоне тарели он не деформируется, то для обеспечения переката зародышей такой формы в рабочей зоне окомкователя минимальным углом наклона днища тарели к горизонту является угол в 45 градусов. Как было показано выше, в реальном процессе переката зародышей в холостой зоне та-

рели в нижнюю часть днища тарели происходит деформация углов и ребер зародышей. В результате этого меняется степень деформации зародыша, и он становится более округлым. Вследствие этого изменяются условия доокомкования зародышей до окатышей в режиме переката в рабочей зоне тарели, поскольку минимальное значение угла наклона днища тарели к горизонту становится еще меньше. При этом коэффициент смятия зародышей в холостой зоне тарели почти не меняется, уменьшаясь от единицы до некоторого определенного значения (см. таблицу), не превышающего 0,74 – 0,92. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,87 – 0,96. В рабочей зоне окомкователя, напротив, происходит резкое падение значений $K_{см}$ от 0,74 – 0,92 до нуля. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,37 – 0,46. Это значит, что, назначая угол $\gamma = \gamma_k$ по условиям параметра $K_{см}$, сформированного в рабочей зоне окомкователя, мы заведомо усложняем режим транспортировки и деформирования зародышей в холостой зоне окомкователя. Наиболее простым решением является выравнивание условий деформирования и формообразования в этих зонах. Необходимо добиться техническими мероприятиями выравнивания значений коэффициентов $K_{см}$ в этих зонах. Наиболее действенным решением является искусственная деформация зародышей в холостой зоне тарели, желательна совмещенная с приростом массы.

Известно много решений, направленных на привлечение сопутствующих технологических операций (напыление, деление, очистка) к формообразованию шихты [2]. Следует признать, что они, зачастую, технически сложны. Возможно комбинированное решение задачи, в которой задаются благоприятные условия зародышеобразования по углу γ с использованием полученного коэффициента $K_{см}$ в холостой зоне окомкователя, ограничивая при этом режим переката в зоне, занятой шихтовыми материалами. Для выравнивания условий формообразования в этом случае целесообразно использовать дополнительные управляющие воздействия в рабочей зоне окомкователя: частоту вращения тарели, влажность шихты и гарнисажа, механические активаторы шихты и др. Используя принцип выравнивания условий деформирования в разных зонах окомкователя можно применять частичную деформацию зародышей механическим ускорением при перекате в холостой зоне окомкователя и другие инженерные решения. Ускоренный перекат зародышей позволяет в свою очередь повысить скорость упрочнения и роста массы окатышей.

Выводы. Проанализированы технические схемы, позволяющие управлять пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании. Получены опытные данные и результаты наблюдений, необходимые для сравнения и подбора оптимального технического решения. Проведена оценка конструктивных и технологических преимуществ каждой схемы. Предложены механизмы выравнивания условий формообразования шихты в разных зонах окомкователя и методы сближения условий деформирования зародышей, позволяющие интенсифицировать перекал материалов и рост массы зародышей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии : учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
4. Газоочистные устройства сталеплавильных агрегатов и утилизация промышленных отходов : учебное пособие для вузов / Е.В. Протопопов, Ю.И. Дерин, Е.П. Волынкина, С.Г. Коротков – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 96 с.
5. Павловец В.М., Герасимук А.В. Особенности движения зародыша сложной формы на тарели окомкователя в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2017. Вып. 37. С. 15 – 24.
6. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
7. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
8. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин,

Н.Ф. Пашков, П.К. Антоненко, Р.М. Жак. – М.: Metallurgy, 1994. – 240 с.

9. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Metallurgy, 1976. – 184 с.

10. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Metallurgy, 1982. – 232 с.

11. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Metallurgy, 1966. – 152 с.

© 2017 г. В.М. Павловец
Поступила 8 ноября 2017 г.

В.М. Павловец

Сибирский государственный индустриальный университет

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЛАГОУДАЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ОКОМКОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Мировое производство железорудных окатышей в настоящее время превышает 500 млн. т в год, что составляет более четверти мирового выпуска окискованного сырья для черной металлургии [1, 2]. Основными производителями окатышей для черной металлургии являются США, Германия, Япония, Китай, Швеция, Россия, Украина и некоторые другие страны.

Структура производства окатышей во всех странах примерно одинакова и включает обогащение железных руд с получением тонкодисперсного концентрата, дозирование и смешивание компонентов шихты, окомкование влажной шихты и термообработку сырых окатышей [3 – 5]. Каждая из этих технологических операций реализуется на определенном участке производства и имеет строго целевое назначение. В частности, участок окомкования выполняет функции формообразования влажной сыпучей шихты в окатыши и первичного упрочнения. Участок термообработки предназначен для формирования необходимой (стандартной) прочности и включает термические операции: двухступенчатую сушку слоя окатышей, регламентированный подогрев, многоступенчатый обжиг и охлаждение окатышей, реализуемые на обжиговой конвейерной машине. Причем все технологические операции на обжиговой машине также имеют самостоятельное назначение и часто лимитируют друг друга, поскольку сопровождаются сложными высокотемпературными тепломассообменными процессами, протекающими одновременно. Среди них – диффузионный перенос влаги, многостадийное окисление и декарбонизация, массообмен при спекании, фазовое и минеральное структурообразование, уплотнение и упрочнение, растворение твердых спеков в шлаковой фазе и многие другие, находящиеся на стадии более детального изучения. Практически все эти процессы имеют температурное активирование. Поэтому, если на первой стадии сушки окатыши не будут полностью высушены, то интенсивность подогрева и обжига совместно с протекающими диффузионными процессами может быть сни-

жена, что приведет к уменьшению производительности агрегата, перерасходу топлива и энергии. Таким образом, первая стадия термообработки – сушка – является лимитирующей для большинства последующих процессов, развивающихся на обжиговой машине.

В мировой практике проблема полноты высушивания окатышей направлена на интенсификацию режима сушки непосредственно на обжиговой машине, что является достаточно сложной производственной задачей для отдельного теплотехнического агрегата, на котором одновременно протекают многочисленные теплофизические процессы. В этой связи спектр инженерных решений достаточно мал, поскольку решение одной проблемы в начальной стадии термообработки может спровоцировать появление другой проблемы уже в конечной стадии термообработки. Среди наиболее значимых инженерных решений в этой области следующие: пофракционная укладка слоя окатышей для формирования повышенной фильтрации газов, формирование структурных свойств окатышей и всего слоя, усиливающих влагоудаление в ходе конвективной сушки, реверсивная подача теплоносителя, многоступенчатый режим сушки, применение акустических волн и слоевого горения, вовлечение в процесс сушки нулевой зоны обжиговой ленты и некоторые другие, не менее сложные, но применяемые на практике [1, 3 – 5].

Новым в решении этой проблемы явилось предложение о переносе части тепловой нагрузки с высокотемпературной стадии технологии (обжиговой машины) на низкотемпературный участок производства – участок окомкования (окомкователь и транспортерная лента), протяженность которого соизмерима с длиной обжиговой машины [1, 2]. Сущность этого решения заключается в использовании струйной тепловой обработки (СТО) в рабочем пространстве окомкователя либо на участке транспортирования сырых окатышей к обжиговому агрегату для предварительного влагоудаления из окатышей перед участком термообработки.

Удаление до 10 – 15 % влаги на участке окомкования сокращает длительность влагоудаления и протяженность зоны сушки на обжиговой машине, что в свою очередь позволяет повысить температуру процесса термической сушки, скорость нагрева окатышей в зонах подогрева и обжига. Механизм предварительного влагоудаления (ПВУ) при низкотемпературном напылении влажной шихты связан с переносом молекулярной влаги из дисперсной фазы в газовый поток за счет разности скоростей фаз и концентраций жидкости в них. Расчеты показывают, что в результате внедрения этого мероприятия производительность обжиговой машины может повыситься на 2 – 3 % [1, 2]. Это решение было предложено на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ и успешно отработано в лабораторных условиях и используется в учебном процессе. В этом решении впервые реализован подход к окомкователю как к низкотемпературному тепловому агрегату, в котором наряду с процессами формообразования шихты и упрочнения окатышей реализована функция предварительного влагоудаления, что позволило расширить функциональные возможности окомковательного оборудования. Это решение оформлено в виде многочисленных объектов интеллектуальной собственности [2], к которым проявили интерес зарубежные издатели [6, 7].

Струйная тепловая обработка может быть организована в виде отдельных воздушных струй, ориентированных на сырые материалы, или с помощью трехфазных воздушно-шихтовых струй, направленных на шихтовый гарнисаж (технология ЗНД) или на комкующиеся материалы (технология ЗОН) [2]. Достоинством технологии ЗНД является использование холостой зоны тарели в технологическом процессе. В технологии ЗОН зародыши, напротив, формируются традиционным капельным орошением в сочетании с перекатом, а оболочка окатыша напыляется воздушно-шихтовыми струями. Указанные технологии позволяют получать окатыши с повышенной реакционной способностью. Отдельные струи (нагретые и холодные) целесообразно применять как для действующей технологии окомкования железорудной шихты (ЗО), так и в сочетании с технологиями ЗНД и ЗОН. Эти возможности технологий ЗНД и ЗОН особенно актуальны для производства окатышей из дисперсного технологического сырья [8, 9].

Следует заметить, что в действующей технологии окомкования железорудной шихты нарушение режима увлажнения материалов может снизить производительность окомкова-

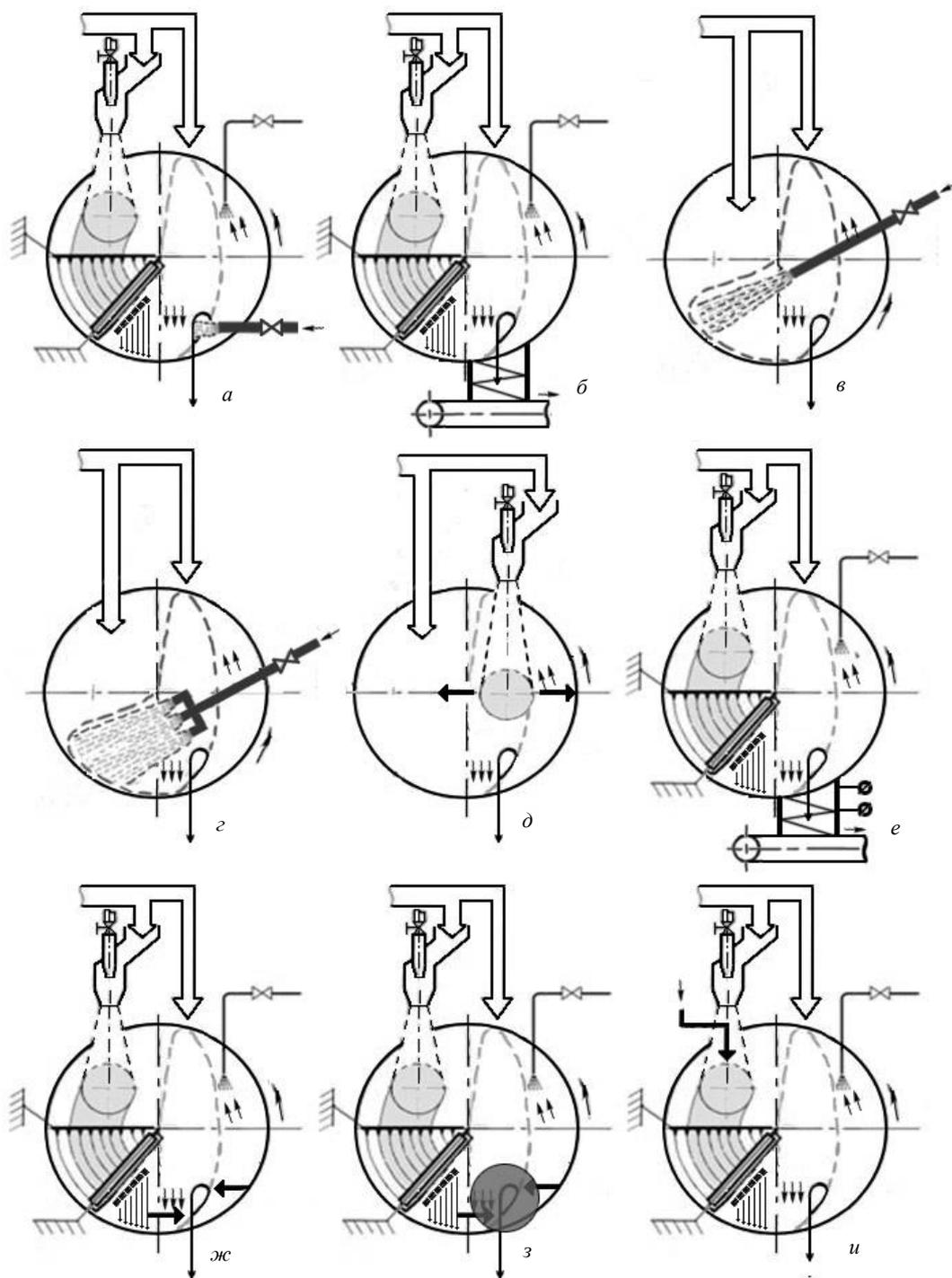
теля, усилить налипание шихты на ограждения оборудования, нарушить режим переката и снизить прочность окатышей [3 – 5, 10]. Технологии ЗНД и ЗОН в меньшей степени зависят от колебаний влажности напыляемой шихты и позволяют одновременно с окомкованием организовать предварительное влагоудаление в циркуляционной зоне комкуемого слоя или в холостой зоне окомкователя в процессе зародышеобразования. Естественно предположить, что конструктивные решения технических схем СТО могут влиять на степень предварительного влагоудаления из зародышей и окатышей в процессе их производства [2].

Целью настоящей работы является анализ комбинированных технических решений на основе СТО, позволяющих организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования в производстве железорудных окатышей и опирающихся как на принудительное зародышеобразование и напыление шихты на зародыши, так и на действующую технологию окомкования шихты в режиме переката.

Экспериментальные схемы, реализующие процесс предварительного влагоудаления, показаны на рисунке. Они представляли собой комбинированные технические решения, на которые в свое время автором были получены охранные документы.

На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр $D = 0,62$ м и работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял 45° . Расход шихты на холодное напыление и зародышеобразование составлял 0,05 кг/с. Расход сжатого воздуха давлением 0,2 МПа не превышал $0,2 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Окомкователь работал в нескольких режимах: по технологии принудительного зародышеобразования ЗНД (см. рисунок, схемы *а, б, е, ж, з, и*), по технологии принудительного формирования оболочки окатышей в режиме напыления шихты ЗОН (схема *д*) и по схеме получения окатышей в режиме капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката ЗО (схемы *в, г*). Струйную тепловую обработку в схемах *а, б, д, е, ж, з, и, к* проводили с помощью струй сжатого воздуха, нагретого до 100°C . В схемах *в, г* применяли струи холодного воздуха. Окатыши для анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после СТО в количестве 0,5 кг, для которых определяли их влажность $W_{\text{ок}}$ стандартным методом ($t = 105^\circ\text{C}$, $\tau = 30$ мин) и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты $W_{\text{ш}}$, определяя коэффициент безразмерной влажности θ_w ($\theta_w = W_{\text{ок}}/W_{\text{ш}}$).



Экспериментальные технические схемы, позволяющие организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования

Схемы ПВУ: *а* – струей нагретого воздуха в зоне циркуляции; *б* – то же на участке разгрузки окатышей; *в* – то же в холодной зоне; *г* – то же многосопловой струей; *д* – одной ВШС в челночном режиме работы; *е* – ультразвуковым излучателем на участке разгрузки; *ж* – барботированием слоя окатышей двухсопловой струей воздуха в зоне циркуляции; *з* – то же с экранированием зоны барботирования и циркуляции; *и* – влагопоглощающие дисперсные добавки

Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали агрегатов, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и

массой образовавшейся мелочи фракции ≤ 5 мм после цикла зародышеобразования, доокомкования (5 мин) и СТО. При определении выхода годного учитывали, что годные окатыши имели размер 12 – 16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Важной характеристикой технологических схем, приве-

денных на рисунке, является режим работы устройства. Если процесс ПВУ протекает одновременно с зародышеобразованием и окомкованием, то режим работы окомкователя совмещенный. Если в процессе работы окомкователя развивается сначала зародышеобразование и окомкование, а затем ПВУ, то режим работы условно назван прямым последовательным. Для выбора наиболее эффективной технологической схемы необходимо учитывать весь комплекс показателей, к которым можно отнести характер распределения пористости, размеры и форму пор, возможности влиять на коэффициент смятия зародышей, эффективность напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж (ШГ) и другие показатели, которые трудно учесть в рамках предлагаемой работы.

В настоящей работе ограничились основными параметрами (режим работы, сложность схемы, выход годного, относительное влагоудаление), которые непосредственно связаны с режимом ПВУ на участке окомкования. Характеристика технологических схем и результаты экспериментов представлены в таблице.

Сущность экспериментальной схемы *a* заключается в последовательной реализации процесса получения окатышей по технологии ЗНД на основе холодного напыления влажной шихты и в термической обработке влажных окатышей струей воздуха, нагретого до 100 – 150 °С. Процесс предварительного влагоудаления сначала протекает при напылении влажной шихты, а затем у окатышей кондиционных размеров в циркуляционной зоне слоя материалов. Эта схема отличается универсальностью, поскольку применима для всех технологий получения окатышей: технологии принудительного зародышеобразования, технологии напыления влажной шихты на комкующиеся материалы и для действующей технологии [11, 12].

Для тарельчатого окомкователя циркуляционная нагрузка – это кондиционные окатыши диам. 14 – 16 мм, движущиеся по спиралеобразной траектории на поверхности слоя перед разгрузкой на транспортерную ленту [2]. Это наиболее простая в аппаратном исполнении схема предварительного влагоудаления, в которой с помощью СТО одновременно осуществляется наклеп поверхности (упрочнение) окатышей и срыв с нее слабосвязанных частиц. При этом кондиционные окатыши динамическим давлением струи искусственно задерживаются на поверхности циркуляционного слоя в течение 5 – 15 с и обеспечивают частичное влагоудаление с поверхности окатышей. В этой технологии возможно применение боль-

шого числа управляющих воздействий на процесс ПВУ: скорости воздуха и его температуры, угла атаки в двух плоскостях, количества струй (позиция *ж*), установки отражающего экрана (позиция *з*) и других. Если окомкователь при этом работает в режиме ЗНД, то кондиционные окатыши имеют пониженное влагосодержание в центральной части гранулы, а СТО обеспечивает влагоудаление на поверхности окатышей, что позволяет получить окатыши с равномерным распределением влаги по сечению. Меньший результат дает применение СТО для окатышей, полученных по технологии ЗОН, у которых влажность поверхностного слоя ниже влажности центральных слоев. В этой схеме СТО в минимальной степени нарушает процесс доокомкования.

Схема *б* включает установку контактного спиралеобразного теплообменника на участке разгрузки готовых окатышей из тарели окомкователя на транспортерную ленту. Эта схема более сложная по сравнению со схемой *a*, но более автономная, поскольку не нарушает процесс окомкования на заключительном этапе технологии, что позволяет повысить выход годного с 91,5 до 96,2 %. Поэтому здесь можно увеличить температуру теплоносителя до 200 – 250 °С и его скорость в противоточном режиме движения до 30 – 50 м/с. Достоинством является больший путь движения окатышей по спиралеобразному каналу диам. 0,05 м и длиной до 6,0 м и, соответственно, более высокая длительность СТО (до 30 – 50 с). В процессе СТО стенки канала нагреваются до 50 °С, что также способствует повышению эффективности влагоудаления. Эксперименты, проведенные на спиралеобразном резиновом теплообменнике ($t = 150$ °С, $v = 30$ м/с), показали возможность удаления до 1,5 % ($\theta_w = 0,81$) влаги. Недостатком схемы *б* является необходимость сбора слабосвязанных частиц и возврат их в окомкователь и ограничения по температуре стенки для эластичных (резиновых, резиноканевых) теплообменников.

Для схем *в* и *г* процесс влагоудаления является сопутствующим, поскольку основное назначение этих схем заключается в увеличении пути переката за счет ориентации комкуемых материалов в холостую зону окомкователя струями холодного воздуха. Поэтому нагретые струи в этой схеме применять нецелесообразно. Указанный режим работы позволяет увеличить производительность окомкователя по показателю ВГ до 94,4 %. Ударное взаимодействие сырых окатышей с бортами тарели формирует упрочняющий наклеп и обеспечивает повышение прочности.

Характеристика экспериментальных технических схем и результаты опытов

Номер экспериментальной схемы (см. рисунок)	Показатели работы устройства			
	Режим работы	Сложность экспериментальной схемы	Выход годного, %	θ_w
<i>a</i>	Прямой последовательный	Простая	91,5	0,85
<i>б</i>	Прямой последовательный	Сложная	96,2	0,81
<i>в</i>	Совмещенный	Простая	94,4	0,97
<i>г</i>	Совмещенный	Простая	94,1	0,97
<i>д</i>	Совмещенный	Сложная	92,8	0,88
<i>e</i>	Прямой последовательный	Сложная	96,3	0,81
<i>ж</i>	Прямой последовательный	Простая	92,1	0,84
<i>з</i>	Прямой последовательный	Простая	92,5	0,82
<i>и</i>	Совмещенный	Сложная	96,6	0,80

Положительный эффект по влагоудалению достигается для окатышей, у которых размеры близки к кондиционным (диам. 14 – 16 мм), аналогично схеме *a*. Это обусловлено тем, что для окатышей более низких размеров (диам. менее 14 – 16 мм) при доокомковании требуется более интенсивное увлажнение поверхности гранул. По конструктивному оформлению обе технологические схемы относятся к сравнительно простым решениям.

Схема *д* предполагает циклическое (челночное) напыление влажной шихты на поверхность материалов, комкуемых в рабочей зоне окомкователя по технологиям ЗОН или ЗОНД, необходимое для интенсификации роста массы оболочки окатыша. Процесс влагоудаления также является совмещенным, но более эффективен по сравнению с процессами, представленными схемами *в* и *г*, поскольку рост массы не нарушается, а, напротив, реализуется с более высокой скоростью. Сушится не тонкий поверхностный слой размером 0,5 – 1,0 мм (как в схемах *a* и *ж*), а более массивный размером 2 – 3 мм. В этой схеме трудно организовать СТО, поскольку возможно нарушение режима доокомкования из-за аэродинамического взаимодействия струй воздуха и воздушно-шихтовых струй в рабочей зоне окомкователя.

Схема *e* отличается от схемы *б* установкой дополнительных ультразвуковых излучателей на тракте подсушки окатышей, что безусловно усложняет аппаратное оформление способа. Эксперименты показали относительно невысокую эффективность ультразвука на слоевых процессах. Положительный эффект можно достичь повышением мощности и частоты излу-

чателя, что требует относительно высоких энергетических и материальных затрат. Степень влагоудаления ниже $\theta_w = 0,81$ можно обеспечить только путем удлинения тракта сушки, что достаточно затруднительно. Особенностью схем *б* и *e* является возможность сравнительно точного определения длительности СТО. В остальных схемах этот показатель можно оценить только приближенно.

Предварительное влагоудаление по схеме *ж* позволяет организовать барботирование восходящего слоя окатышей в нижней части окомкователя струями теплоносителя, ориентированными под острым углом к поверхности слоя окатышей (как вариант – установленными вертикально). Этот режим дает возможность организовать интенсивное циркуляционное движение теплоносителя по сравнению со схемой *a* в глубине слоя и обеспечить более высокую площадь поверхности слоя окатышей, накрываемую СТО. В результате более интенсивной СТО, основанной на автономных струях, значение параметра θ_w можно снизить до 0,84.

Динамические параметры теплоносителя можно увеличить на 10 – 15 % в схеме *з*, в которой зона барботаж и циркуляции окатышей снабжена отражающим экраном, препятствующим выбросу комкующихся материалов из рабочего пространства окомкователя. Экран целесообразно выполнять из эластичных материалов, в наименьшей степени деформирующих влажные окатыши и препятствующим налипанию шихты.

В схеме *и* реализована классическая схема принудительного зародышеобразования, в которой одновременно с влажной шихтой воз-

можно напыление пористого поглотителя влаги (связующего, порообразователя, органических добавок и других материалов). Использование, например, древесной пыли или древесных отходов в количестве 2 – 3 % позволяет снизить показатель θ_w до 0,80. Эта схема относится к классической технологии ЗНД, по которой возможно одновременно с зародышеобразованием получить снижение влажности сначала зародышей, а потом и окатышей, у которых понижена влажность в зародышевом центре.

Можно отметить, что в рассмотренных схемах влагоудаление является как основным, так и сопутствующим процессом. При реализации основного процесса (схемы *a*, *в*, *з*) возможно нарушение процесса окомкования, что несколько ограничивает его использование и требует дополнительных мер по стабилизации технологии. Вынос этого процесса за рабочее пространство окомкователя (схемы *б* и *е*), несомненно, оправдывает задачу, но усложняет аппаратное оформление технологии. Поэтому более предпочтительным является комбинированный процесс получения окатышей, в котором основной процесс реализован по технологии ЗНД (схемы *a*, *б*, *и*), а завершающий процесс влагоудаления с помощью СТО организован по схемам *ж*, *з*.

Технически возможно сочетание технологических схем ЗНД и ЗОН, которое позволяет повысить равномерность влагоудаления по сечению окатышей. Результаты экспериментов позволили сформулировать подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, в котором возможна тепловая обработка слоя влажных окатышей для предварительного влагоудаления.

Выводы. Проанализированы экспериментальные технические схемы, реализующие методы предварительного влагоудаления железорудных окатышей в рабочем пространстве окомкователя и на участке окомкования, организованные с помощью струйной тепловой обработки. В работе оценивали сложность экспериментальной схемы, стабильность работы окомковательного оборудования и степень предварительного влагоудаления из окатышей. Обсуждение преимуществ и недостатков каждой схемы в направлении предварительного влагоудаления дало возможность увязать их с достоинствами режима принудительного зародышеобразования. Это позволило наметить пути совершенствования технологии производства окатышей. Результаты экспериментов дают возможность сформулировать подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, предназначенному для тепло-

вой обработки слоя влажных окатышей на стадии окомкования и транспортировки окатышей к обжиговому агрегату.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, П.К. Антоненко, Р.М. Жак. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
4. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1976. – 184 с.
5. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
6. Pavlovets V.M. Thermal Stessin Yron-Ore Pellets Differentiated Porosity // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. № 8. P. 538 – 543.
7. Pavlovets V.M. Producing Wet Pellets by Forced Nucleation // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. № 6. P. 511 – 516.
8. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
9. Газоочистные устройства сталеплавильных агрегатов и утилизация промышленных отходов: Учебное пособие для вузов / Е.В. Протопопов, Ю.И. Дерин, Е.П. Волынкина, С.Г. Коротков – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 96 с.
10. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1966. – 152 с.
11. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 6. С. 9 – 13.
12. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.

© 2017 г. В.М. Павловец
Поступила 8 ноября 2017 г.

УДК 669.018.25:519.237

*И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова***Сибирский государственный индустриальный университет****ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ СИСТЕМ $Fe - C - Si - Mn - Ni - Mo - W - V$ И $Fe - C - Si - Mn - Cr - Ni - Mo - V$**

Разработка новых материалов и использование инновационных технологий восстановления, значительно повышающих износостойкость изделий, являются актуальными задачами машиностроения. Ведется разработка методов и изготовление специальных материалов для наплавки [1 – 10]. Наибольшее распространение для наплавки абразивно-изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки низкоуглеродистые низколегированные, аустенитные высокомарганцевые типа С, а также быстрорежущие стали типа F по классификации МИС [11]. Широко применяются наплавочные карбидные сплавы типа Р, представляющие собой композиционные материалы и состоящие из армирующих частиц карбидов вольфрама и матрицы. Они отличаются наивысшей износостойкостью в условиях абразивного износа [11]. Характерной особенностью процесса износа таких сплавов является поэтапный износ отдельных элементов композиции. При этом наблюдается так называемый теневой эффект, когда более износостойкие армирующие частицы берут на себя основную нагрузку от разрушающих сил, предохраняя этим матрицу сплава от износа. Таким образом, при равной износостойкости матрицы работоспособность композиционных сплавов определяется их химическим составом, концентрацией, износостойкостью и прочностью армирующих частиц. Однако износостойкость матрицы может быть и определяющим показателем при работе в условиях абразивного износа.

В настоящей работе приведены результаты исследования износостойкости, твердости и микроструктуры наплавленного металла порошковыми проволоками систем $Fe - C - Si - Mn - Cr - Ni - Mo - V$ и $Fe - C - Si - Mn - Ni - Mo - W - V$.

Изготовление проволоки проводили в лабораторных условиях. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм. Оболочка выполнена из ленты из стали Ст3. В качестве наполнителя использовали соответствующие порошкообразные материалы: порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849 – 86; порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ 1415 – 93; порошок высокоуглероди-

стого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757 – 91; порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755 – 91, порошок никеля ПНК-1Л15 по ГОСТ 9722 – 97; порошок ферромолибдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759 – 91; порошок вольфрама марки ПВП-1, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130 – 94. В качестве углеродсодержащего компонента использовали ранее опробованный [12 – 15] углеродфторсодержащий материал (УФСМ) следующего химического состава: 21,0 – 46,23 % Al_2O_3 ; 18 – 27 % F; 8 – 15 % Na_2O ; 0,4 – 6,0 % K_2O ; 0,7 – 2,3 % CaO; 0,50 – 2,48 % Si_2O ; 2,10 – 3,27 % Fe_2O_3 ; 12,5 – 30,2 % $C_{общ}$; 0,07 – 0,90 % MnO; 0,06 – 0,90 % MgO; 0,09 – 0,19 % S; 0,10 – 0,18 % P.

Наплавку под флюсом АН-26С проводили на образцах толщиной 16 мм из стали марки 09Г2С в шесть слоев. Процесс вели с использованием сварочного трактора АСАВ-1250; режим наплавки: сила тока 450 А; напряжение 30 В; скорость 10 см/мин.

Измерение твердости проводили с использованием твердомера МЕТ-УД, осуществляли пять измерений на поверхности каждого образца.

Испытания на износостойкость проводили на машине 2070 СМТ-1 по схеме вращающийся диск – образец. Методика проведения испытаний на износостойкость приведена в работе [16]. Суммарный износ определяли по разнице массы образцов до постановки на испытательный стенд и после испытаний. За величину износа принята потеря массы образца за один оборот диска.

Металлографический анализ образцов проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле (диапазон увеличений 100 – 1000). В качестве реактива для травления поверхности образцов использовали спиртовой раствор азотной кислоты. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений осуществляли в соответствии с ГОСТ 1778 – 70 (увеличение 100). Величину бывшего зерна аустенита определяли по ГОСТ 5639 – 82 (увеличение 100). Размер игл мар-

тенсита определяли по ГОСТ 8233 – 56 (увеличение 1000).

Химический состав образцов, твердость и износ наплавленного металла приведены в табл. 1.

Металлографический анализ металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V показал, что при содержании углерода 0,17 – 0,23 %, хрома в пределах 1,32 – 1,45 % (образцы 1 – 4) в наплавленном слое образуется равномерная структура с мелкоиглольчатым мартенситом (балл 3) в бывших зернах аустенита, остаточным аустенитом, присутствующим в небольшом количестве в виде отдельных островков, и δ -ферритом в виде тонких прослоек по границам первичных зерен аустенита. Размер игл мартенсита в структуре образцов находится в диапазоне 2 – 5 мкм (табл. 2). Величина бывшего зерна аустенита соответствует № 6.

Применение УФСМ в качестве углеродсодержащего компонента обеспечивает высокое металлургическое качество наплавленного металла. Загрязненность всех исследованных образцов неметаллическими включениями незначительна: установлено небольшое количество мелких неметаллических включений, в частности, силикатов недеформирующихся и оксидов точечных (табл. 2).

Установлено, что содержание хрома в наплавленном слое в количестве 1,32 – 1,45 % препятствует росту зерна аустенита в процессе наплавки и, соответственно, способствует формированию структуры мелкоиглольчатого мартенсита после охлаждения, что подтверждается лучшими показателями твердости и сопротивляемости износу в сравнении с образцами, наплавленными проволокой с повышенным содержанием вольфрама (табл. 1).

Металлографический анализ металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V показал,

что введение вольфрама в количестве 2,43 – 3,38 % при уменьшении содержания углерода и хрома до 0,12 – 0,15 и 0,07 – 0,09 % соответственно приводит к образованию в наплавленном слое феррито-перлитной структуры. Образцы 5 – 8 имеют феррито-перлитную структуру с размером бывшего зерна аустенита № 4 и 5. Указанные структурные изменения обуславливают снижение твердости и износостойкости наплавленного металла (табл. 2).

Таким образом установлено, что для наплавки деталей и механизмов оборудования, работающего при абразивном изнашивании, более предпочтительной является порошковая проволока системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V.

Выводы. Использование для наплавки низкоуглеродистых экономнолегированных порошковых проволок систем Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V и Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V с применением в качестве углеродсодержащего компонента углеродфторсодержащего материала обеспечивает формирование наплавленных слоев с малой степенью загрязненности неметаллическими включениями. Использование для наплавки порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V приводит к формированию в наплавленном слое равномерной структуры мелкоиглольчатого мартенсита с тонкими прослойками δ -феррита и остаточного аустенита, что обеспечивает твердость и износостойкость, достаточные для эксплуатации деталей горного оборудования. Использование для наплавки порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V приводит к образованию наплавленных слоев, имеющих более низкое содержание углерода и хрома, но повышенное содержание вольфрама, вследствие чего образуется не мартенситная, а феррито-перлитная структура, не обеспечивающая требуемых твердости и износостойкости.

Т а б л и ц а 1

Химический состав, износ и твердость наплавленного металла

Образец	Содержание элементов, %								Твердость HRC	Износ образцов г/об. · 10 ⁻⁴
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W		
1	0,23	0,12	0,85	1,45	0,53	0,51	0,68	0,08	25	1,65
2	0,21	0,23	0,89	1,45	0,54	0,55	0,54	0,03	21	1,15
3	0,17	0,18	0,85	1,40	0,52	0,54	0,63	0,05	21	1,11
4	0,17	0,28	0,91	1,32	0,45	0,46	0,59	0,06	21	1,12
5	0,15	0,20	0,79	0,08	0,56	0,25	0,51	3,38	17	1,15
6	0,14	0,17	0,75	0,07	0,5	0,13	0,47	2,57	16	4,08
7	0,14	0,26	0,78	0,09	0,55	0,68	0,56	2,88	16	1,70
8	0,12	0,21	0,71	0,07	0,52	0,50	0,44	2,43	15	1,79

Характеристики неметаллических включений и структуры исследованных образцов

Образец	Загрязненность неметаллическими включениями, балл		Величина зерна аустенита, балл	Размер игл мартенсита, мкм
	силикаты недеформирующиеся (хрупкие)	оксиды точечные		
1	1б, 2б, 3а	1 а	6, 5	2 – 5
2	1б, 2б, 2а	1 а, 2а	6	2 – 4
3	1б, 2б, 3а	1 а	6	2 – 5
4	1б, 2б, 3а	1 а	6	2 – 4
5	2б, 1б, 2а	1а	4, 5	–
6	2б, 1б, 2а	1а	4, 5	–
7	1б, 2б, 2а	1 а	4	–
8	2б, 3б	1 а	4	–

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Белый А.И. Износостойкость и прочность карбидов вольфрама WC – W₂C, полученных различными способами // Автоматическая сварка. 2010. № 12. С. 20 – 23.
- Poletaev Y.V., Zubchenko A.S. Structure and properties of welded joints in chromium-manganese steels // Welding International. 1988. Vol. 2. P. 452 – 455.
- Barker K.C., Ball A. Synergistic abrasive-corrosive wear of chromium containing steels // British Corrosion Journal. 1989. Vol. 24. P. 222 – 228.
- El-Mahallawi I., Abdel-karim R., Naguib A. Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel // Materials Science and Technology. 2001. Vol. 17. P. 1385 – 1390.
- Mizoguchi S., Tanigaki T., Tokura M., Koike H., Nishimura H. Multilayer Submerged Arc Surfacing With High Chromium Iron Alloy // Surfaced Engineering. 1987. Vol. 3. P. 313 – 320.
- Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // Material Science and Technology. 2014. Vol. 30. P. 316 – 322.
- Rao Z., O'Connor B.H., Sood D.K., Williams J.S. Wear behaviour of carbon implanted hard chromium coatings // Surface Engineering. 1997. Vol. 13. P. 61 – 65.
- Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy // Material Science and Technology. 2014. Vol. 30. P. 316 – 322.
- Kozyrev N.A., Galevsky G.V., Kryukov R.E., Titov D.A., Shurupov V.M. New materials for welding and surfacing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150. 2016. 012031. P. 1 – 8.
- Gusev A.I., Kibko N.V., Kozyrev N.A., Popova M.V., Osetkovskiy I.V. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150. 2016. 012033. P. 1 – 9.
- Kozyrev N.A., Osetkovskiy I.V., Kozyreva O.A., Zernin E.A., Kartsev D.S. Influence of Filler Metals in Welding Wires on the Phase and Chemical Composition of Weld Metal // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 125. P. 1 – 7
- Kozyrev N.A., Galevskiy G.V., Titov D.A., Kolmogorov D.E., Gusarov D.E. On Quality of a Weld Bead Using Power Wire 35v9h3sf // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 125. P. 1 – 8
- Jiang Y.F., Yang F.Z., Tian Z.Q., Zhou S.M. Effects of iron ion contents on composition, morphology, structure and properties of chromium coatings electrodeposited from novel trivalent chromium sulphate electrolyte // Transaction Of The IMF. 2012. Vol. 19. P. 86 – 91.

14. Casteletti L.C., Rafael Nucci, Lombardi A. Neto, Arnoni E.A.B., Totten G.E. Hard chromium substitution using HVOF coatings // *International Heat Treatment And Surface Engineering*. 2008. Vol. 2. P. 27 – 31.
15. Alejandro Basso, Sebastian Laino & Ricardo C. Dommarco. Wear Behavior of Carbide Ductile Iron with Different Matrices and Carbide Distribution // *Tribology Transactions*. 2013. Vol. 56. P. 33 – 40.
16. Гусев А.И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. Наплавка порошковыми проволоками систем С – Si – Mn – Mo – V – В и С – Si – Mn – Cr – Mo – V деталей горнорудного оборудования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 318 – 323.

© 2017 г. И.В. Осетковский, Н.А. Козырев,
А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова
Поступила 20 сентября 2017 г.

УДК 669.014

А.А. Александров, В.Я. Дашевский

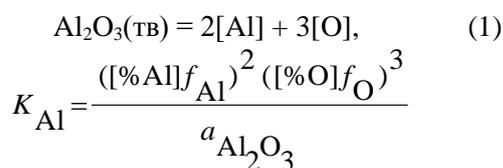
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

РАСТВОРИМОСТЬ КИСЛОРОДА В АЛЮМИНАТСОДЕРЖАЩИХ РАСПЛАВАХ Ni – Co И Ni – Co – Cr* **

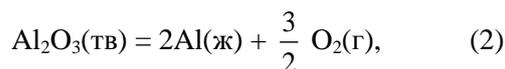
Сплавы систем Ni – Co и Ni – Co – Cr широко применяются в современной технике [1, 2]. Одной из вредных примесей в этих сплавах является кислород, который находится в металле как в растворенном виде, так и в виде неметаллических включений. Присутствие кислорода приводит к снижению физико-механических свойств сплавов. При производстве сплавов Ni – Co и Ni – Co – Cr часто в качестве раскислителя используют алюминий. Для практики производства такого рода сплавов представляет значительный интерес изучение влияния алюминия на растворимость кислорода в этих сплавах.

Для расплавов системы Ni – Co – Cr из всего многообразия их составов можно выделить три наиболее часто встречающихся состава основы сплавов: Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr. Рассмотрим термодинамику процесса раскисления этих сплавов алюминием. Наличие данных о термодинамике растворов кислорода в жидких никеле и кобальте [3 – 6] позволяет оценить влияние алюминия на растворимость кислорода в расплавах систем Ni – Co и Ni – Co – Cr.

Реакция раскисления расплавов системы Ni – Co алюминием



может быть представлена как сумма реакций



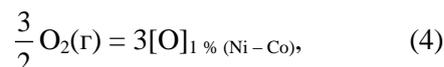
$$\Delta G_{(2)}^\circ = 1\,687\,908 - 325,15T, \text{ Дж/моль [6];}$$

*Из материалов конференции «Металлургия-2017»

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-60138 мол_а_дк.

$$2\text{Al}(\text{ж}) = 2[\text{Al}]_{1\% (\text{Ni-Co})}, \quad (3)$$

$$\Delta G_{(3)}^\circ = 2RT \ln \left(\frac{\gamma_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^\circ M_{\text{Ni-Co}}}{M_{\text{Al}} 100} \right);$$



$$\Delta G_{(4)}^\circ = 3RT \ln \left(\frac{\gamma_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^\circ M_{\text{Ni-Co}}}{M_{\text{O}} 100} \right),$$

где $\gamma_{i(\text{Ni-Co})}^\circ$ – коэффициент активности компонента i в расплаве при бесконечном разбавлении; M_i – молекулярная масса компонента i .

Молекулярная масса расплавов системы Ni – Co рассчитана по формуле $M_{\text{Ni-Co}} = M_{\text{Ni}} X_{\text{Ni}} + M_{\text{Co}} X_{\text{Co}}$ [7], а коэффициенты активности $\gamma_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^\circ$ и $\gamma_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^\circ$ – по уравнению [8]

$$\ln \gamma_{i(\text{Ni-Co})}^\circ = X_{\text{Ni}} \ln \gamma_{i(\text{Ni})}^\circ + X_{\text{Co}} \ln \gamma_{i(\text{Co})}^\circ +$$

$$+ X_{\text{Ni}} X_{\text{Co}} [X_{\text{Co}} (\ln \gamma_{i(\text{Co})}^\circ - \ln \gamma_{i(\text{Ni})}^\circ + \varepsilon_{i(\text{Co})}^{\text{Ni}}) +$$

$$+ X_{\text{Ni}} (\ln \gamma_{i(\text{Ni})}^\circ - \ln \gamma_{i(\text{Co})}^\circ + \varepsilon_{i(\text{Ni})}^{\text{Co}})].$$

Рассчитанные значения константы равновесия реакции (1), значения коэффициентов активности γ_{Al}° и γ_{O}° для никеля и кобальта и рассчитанные для никель-кобальтовых сплавов при 1873 К приведены в таблице. В расчетах коэффициентов активности $\gamma_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^\circ$ и $\gamma_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^\circ$ использовали следующие значения параметров взаимодействия $\varepsilon_{\text{Al}(\text{Ni})}^{\text{Co}} = 0,90$ [9]; $\varepsilon_{\text{O}(\text{Ni})}^{\text{Co}} = -1,4$ [4]; $\varepsilon_{\text{Al}(\text{Co})}^{\text{Ni}} = -0,12$ [10]; $\varepsilon_{\text{O}(\text{Co})}^{\text{Ni}} = -0,25$ [5].

Концентрация кислорода в расплаве, равновесная с заданным содержанием алюминия, может быть рассчитана по уравнению

$$\lg [\% \text{O}]_{\text{Al}} = \frac{1}{3} \lg K_{\text{Al}} + \frac{1}{3} \lg a_{\text{Al}_2\text{O}_3} - \frac{2}{3} \lg [\% \text{Al}] -$$

$$- \left[\frac{2}{3} e_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} + e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} \right] [\% \text{Al}] -$$

$$- \left[e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{O}} + \frac{2}{3} e_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^{\text{O}} \right] [\% \text{O}]. \quad (5)$$

Оксид Al_2O_3 при 1873 К – твердый ($T_{пл} = 2323$ К), поэтому $a_{Al_2O_3} = 1$. Величину [%O] в правой

части уравнения (5) можно выразить через отношение $(K_{Al}/[\% Al]^2 f_{Al}^2 f_{O}^3)^{1/3}$.

Значения констант равновесия реакций (1) и (7), коэффициентов активности и параметров взаимодействия для расплавов систем Ni – Co и Ni – Co – Cr при 1873 К

Параметр	Значение параметра при содержании кобальта, %				
	0	15	20	40	100
M_{Ni-Co}	58,69	58,726	58,738	58,787	58,933
X_{Ni}	1	0,851	0,801	0,601	0
X_{Co}	0	0,149	0,199	0,399	1
lgK_{Al}	-13,739	-13,726	-13,775	-14,166	-15,501
lgK_{Cr} [7]	-7,753	-7,577	-7,522	-7,326	-7,029
γ_{Al}°	$2,2 \cdot 10^{-4}$ [3]	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,005 [5]
γ_{O}°	0,337 [4]	0,276	0,259	0,208	0,161 [5]
e_{Al}^{Al}	0,085 [3]	0,084	0,083	0,081	0,076 [5]
e_{O}^{Al}	-1,47 [3]	-1,497	-1,506	-1,542	-1,65 [6]
e_{Al}^{O}	-2,482 [3]	-2,527	-2,542	-2,603	-2,786 [6]
e_{O}^{O}	0 [4]	0	0	0	0 [5]
e_{Cr}^{Cr}	0,0083 [4]	0,0071	0,0067	0,0050	0 [6]
e_{O}^{Cr}	-0,15 [7]	-0,138	-0,134	-0,118	-0,07 [5]
e_{Cr}^{O}	-0,50 [7]	-0,461	-0,448	-0,397	-0,24 [5]
r_{O}^{Cr}	$2,415 \cdot 10^{-3}$ [7]	$2,057 \cdot 10^{-3}$	$1,937 \cdot 10^{-3}$	$1,457 \cdot 10^{-3}$	0 [5]
e_{Al}^{Cr}	0,0233 [9]	0,0236	0,0237	0,0241	0,0253 [10]
e_{Cr}^{Al}	0,0408 [9]	0,0414	0,0416	0,0424	0,0447 [10]

При [%O] $\rightarrow 0$ $f_{O} \rightarrow 1$. В связи с малостью величины [%O] можно принять $(K_{Al}/[\% Al]^2 f_{Al}^2 f_{O}^3)^{1/3} \approx (K_{Al}/[\% Al]^2 f_{Al}^2)^{1/3}$. Такая замена не вносит заметной погрешности в расчеты [6]. В этом случае уравнение (5) примет вид

$$lg[\%O]_{Al} = \frac{1}{3}lgK_{Al} - \frac{2}{3}lg[\%Al] - \left[\frac{2}{3}e_{Al(Ni-Co)}^{Al} + e_{O(Ni-Co)}^{Al} \right] [\%Al] - \left[e_{O(Ni-Co)}^{O} + \frac{2}{3}e_{Al(Ni-Co)}^{O} \right] \times (K_{(1)}/[\% Al]^2 f_{Al}^2)^{1/3}. \quad (6)$$

Равновесные концентрации кислорода в расплавах системы Ni – Co при раскислении алюминием рассчитывали по уравнению (6). Используемые в расчетах величины параметров взаимодействия $e_{Al(Ni-Co)}^{Al}$, $e_{O(Ni-Co)}^{Al}$, $e_{Al(Ni-Co)}^{O}$ и $e_{O(Ni-Co)}^{O}$ (см. таблицу) определяли по уравнению $\varepsilon_{i(Ni-Co)}^j = \varepsilon_{i(Ni)}^j X_{Ni} + \varepsilon_{i(Co)}^j X_{Co}$ [7].

Рассчитанные зависимости равновесной концентрации кислорода от содержания алюминия в расплавах системы Ni – Co приведены ниже:

для сплава Ni – 15 % Co

$$lg[\%O]_{Al} = -4,575 - \frac{2}{3}lg[\%Al] + 1,441[\%Al] + 4,481 \cdot 10^{-5}/[\%Al]^{2/3};$$

для сплава Ni – 20 % Co

$$lg[\%O]_{Al} = -4,592 - \frac{2}{3}lg[\%Al] + 1,450[\%Al] + 4,339 \cdot 10^{-5}/[\%Al]^{2/3};$$

для сплава Ni – 40 % Co

$$lg[\%O]_{Al} = -4,722 - \frac{2}{3}lg[\%Al] + 1,487[\%Al] + 3,292 \cdot 10^{-5}/[\%Al]^{2/3}.$$

Зависимости равновесной концентрации кислорода от содержания алюминия в расплавах Ni – Co при 1873 К приведены на рисунке.

Раскислительная способность алюминия по мере увеличения содержания кобальта возрастает.

В расплавах системы Ni – Co – Cr при содержании хрома выше 0,01 – 0,16 % (в зависимости от содержания кобальта) продуктом реакции взаимодействия хрома с кислородом, содержащимся в расплаве, является оксид Cr₂O₃ [7]

$$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{тв}) = 2[\text{Cr}] + 3[\text{O}], \quad (7)$$

$$K_{\text{Cr}} = \frac{([\% \text{Cr}] f_{\text{Cr}})^2 ([\% \text{O}] f_{\text{O}})^3}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}.$$

Концентрация кислорода, равновесная с заданным содержанием хрома в расплаве, для реакции (7) может быть рассчитана по уравнению [7]

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \lg K_{\text{Cr}} + \frac{1}{3} \lg a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] -$$

$$- \left[\frac{2}{3} e_{\text{Cr}(\text{Ni-Co})}^{\text{Cr}} + e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Cr}} \right] [\% \text{Cr}] -$$

$$- \left[e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{O}} + \frac{2}{3} e_{\text{Cr}(\text{Ni-Co})}^{\text{O}} \right] \times$$

$$\times \left(K_{\text{Cr}} / [\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2 \right)^{1/3} -$$

$$- r_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2. \quad (8)$$

При раскислении расплавов Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr алюминием при весьма низких его содержаниях, когда хром является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода,

равновесную с заданным содержанием хрома и алюминия, можно рассчитать по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = \lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} -$$

$$- \left[\frac{2}{3} e_{\text{Cr}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} + e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} \right] [\% \text{Al}]. \quad (9)$$

С учетом значений параметров взаимодействия уравнение (9) примет вид:

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -2,064 + 1,469[\% \text{Al}]; \quad (9a)$$

для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -1,782 + 1,478[\% \text{Al}]; \quad (9б)$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr

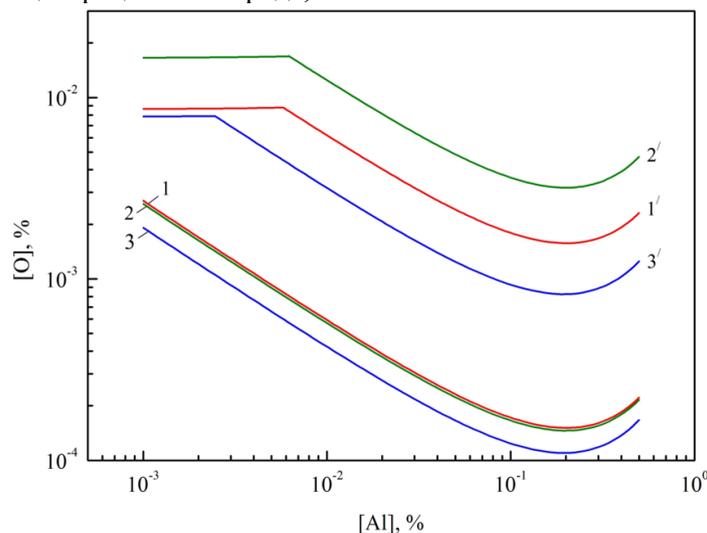
$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Al}} = -2,106 + 1,513[\% \text{Al}]. \quad (9в)$$

При более высоких содержаниях алюминия в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, его взаимодействие с кислородом описывается реакцией (1). Концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием алюминия и хрома, можно рассчитать по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = \frac{1}{3} \lg K_{\text{Al}} - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] -$$

$$- \left[\frac{2}{3} e_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} + e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Al}} \right] [\% \text{Al}] -$$

$$- \left[\frac{2}{3} e_{\text{Al}(\text{Ni-Co})}^{\text{Cr}} + e_{\text{O}(\text{Ni-Co})}^{\text{Cr}} \right] [\% \text{Cr}] -$$



Зависимость концентрации кислорода от содержания алюминия в расплавах Ni – 15 % Co (1), Ni – 20 % Co (2), Ni – 40 % Co (3) и Ni – 15 % Co – 10 % Cr (1'), Ni – 20 % Co – 15 % Cr (2'), Ni – 40 % Co – 10 % Cr (3') при 1873 К

$$-\left[\frac{2}{3}e_{\text{Al}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}} + e_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{O}}\right] \times \left(K_{\text{Al}} / [\% \text{Al}]^2 f_{\text{Al}}^2\right)^{1/3} - r_{\text{O}(\text{Ni}-\text{Co})}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2. \quad (10)$$

С учетом величины константы равновесия реакций раскисления алюминием и параметров взаимодействия (см. таблицу) уравнение (10) примет вид:

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -3,557 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,441[\% \text{Al}] + \frac{4,481 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}}; \quad (10a)$$

для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -3,253 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,450[\% \text{Al}] + \frac{4,339 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}}; \quad (10б)$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Al+Cr}} = -3,847 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Al}] + 1,487[\% \text{Al}] + \frac{3,292 \cdot 10^{-5}}{[\% \text{Al}]^{2/3}}. \quad (10в)$$

Решая совместно уравнения (9) и (10), можно определить содержание алюминия [%Al]*, при котором происходит смена механизма реакции раскисления. При решении уравнений в первом приближении пренебрегаем членами, содержащими параметры взаимодействия, в связи с их малостью. Тогда получаем следующие значения:

Сплав	[%Al]*
Ni – 15 % Co – 10 % Cr	0,0058
Ni – 20 % Co – 15 % Cr	0,0062
Ni – 40 % Co – 10 % Cr	0,0024

Рассчитанные по уравнениям (9а – 9в) и (10а – 10в) равновесные концентрации кислорода в расплавах Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr при 1873 К приведены на рисунке в сравнении с данными о растворимости кислорода в расплавах системы Ni – Co. Алюминий при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве. Дальнейшее повышение содержания алюминия приводит к весьма существенному снижению концентрации кислорода в расплаве.

Поскольку хром при высоком его содержании значительно снижает активность кислорода в расплаве и в гораздо меньшей степени повышает активность алюминия (см. таблицу), то в сплавах Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr раскислительная способность алюминия существенно ниже, чем в сплавах Ni – 15 % Co, Ni – 20 % Co и Ni – 40 % Co.

Кривые растворимости кислорода в расплавах Ni – Co и Ni – Co – Cr, содержащих алюминий, проходят через минимум (см. рисунок). Дальнейшие присадки алюминия приводят к увеличению концентрации кислорода в расплаве.

Содержания алюминия, которым соответствуют минимальные концентрации кислорода, могут быть определены по уравнению [7]

$$[\% \text{Al}]' = -\frac{1}{2,3} \cdot \frac{2}{(2e_{\text{Al}}^{\text{Al}} + 3e_{\text{O}}^{\text{Al}})}. \quad (11)$$

Ниже приведены рассчитанные по уравнению (11) значения содержаний алюминия в точках минимума и соответствующие им минимальные концентрации кислорода:

Co, %	15	20	40
[%Al]'	0,201	0,200	0,195
[%O] _{Al} ^{мин}	1,51·10 ⁻⁴	1,46·10 ⁻⁴	1,10·10 ⁻⁴
[%O] _{Al+Cr} ^{мин}	1,57·10 ⁻³	3,19·10 ⁻³	8,26·10 ⁻⁴

Таким образом из приведенных данных видно, что содержание алюминия в точках минимума незначительно снижается при увеличении содержания кобальта.

Выводы. В расплавах системы Ni – Co алюминий характеризуется весьма высоким сродством к кислороду. Раскислительная способность алюминия по мере увеличения содержания кобальта возрастает. В расплавах системы Ni – Co – Cr алюминий при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве, дальнейшее повышение содержания алюминия приводит к весьма существенному снижению концентрации кислорода в расплаве. Полученные результаты позволяют заключить, что использование алюминия в качестве раскислителя при производстве сплавов систем Ni – Co и Ni – Co – Cr позволит получить конечный металл с весьма низкой концентрацией кислорода. Определены содержания алюминия [%Al]*, при которых происходит смена механизма ре-

акции раскисления расплавов Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr. Кривые растворимости кислорода в расплавах Ni – Co и Ni – Co – Cr, содержащих алюминий, проходят через минимум, положение которого смещается в сторону более низких содержаний алюминия по мере увеличения содержания кобальта в расплаве. Дальнейшие присадки алюминия приводят к возрастанию концентрации кислорода в расплаве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логунов А.В., Шмотин Ю.А. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисковых газовых турбин. – М.: Наука и технологии, 2013. – 264 с.
2. Прецизионные сплавы. Справочник / Под ред. Б.В. Молотилова, 2 изд. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.
3. Ishii F., Ban-ya S. Equilibrium between Aluminum and Oxygen in Liquid Nickel and Nickel-Iron Alloy // *Tetsu to Hagane*. 1995. Vol. 81. No. 1. P. 22 – 27.
4. Sigworth G.K., Elliott J.F., Vaughn G., Geiger G.H. The Thermodynamics of Dilute Liquid Nickel Alloys // *Metallurgical Soc. CIM*. 1977. Annual Volume. P. 104 – 110.
5. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of dilute liquid cobalt alloys // *Canadian Metallurgical quarterly*. 1976. Vol. 15. No 2. P. 123 – 127.
6. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
7. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni – Co, содержащих хром // *Металлы*. 2016. № 4. С. 71 – 78.
8. Frohberg M.G., Wang M. Thermodynamic properties of sulphur in liquid copper-antimony alloys at 1473 K // *Z. Metallkd*. 1990. Vol. 81. H. 7. S. 513 – 518.
9. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Ч. II. Оценка параметров взаимодействия элементов в никелевых сплавах // *Электрометаллургия*. 2009. № 2. С. 29 – 38.
10. Белянчиков Л.Н. Оценка параметров взаимодействия, коэффициентов активности и теплот растворения элементов в сплавах на основе кобальта методом пересчета с их значений в сплавах железа // *Электрометаллургия*. 2009. № 4. С. 16 – 22.

© 2017 г. А.А. Александров,
В.Я. Дашевский
Поступила 30 ноября 2017 г.

УДК 621.785.54

Е.Н. Сафонов

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЫ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ*

Заэвтектоидные стали, потенциально обладающие повышенными твердостью и износостойкостью при контактном нагружении, обычно применяются в термически упрочненном состоянии (закалка с отпуском) для обеспечения необходимой прочности. Такая термообработка не позволяет реализовать максимальную твердость рабочей поверхности деталей и сопровождается соответствующим уменьшением их эксплуатационного ресурса. Решение этой проблемы, особенно актуальной для массивных изделий типа прокатных валков, возможно при использовании термического упрочнения рабочих поверхностей, например плазменной закалкой [1]. При этом физико-химическое состояние и свойства материала во внутренних слоях изделия не изменяются, обеспечивая заданную конструктивную прочность. Поверхностное упрочнение таких изделий позволяет увеличить их износостойкость и срок службы за счет благоприятного сочетания высокой твердости поверхностного рабочего слоя с достаточно прочной сердцевиной, структура и свойства которой формируются на предшествующих этапах производства.

При нагреве поверхности детали плазменной дугой прямого действия основные характеристики термического цикла следующие: максимальная температура, время пребывания данной точки выше температуры точки A_{c1} , скорости нагрева и охлаждения определяются сочетанием параметров режима обработки и взаимозависимы. Например, с увеличением скорости перемещения дуги при прочих равных условиях понижаются максимальная температура цикла, время пребывания нагреваемого объема в аустенитной области и увеличивается скорость охлаждения. Увеличение мощности дуги, напротив, сопровождается ростом максимальной температуры, глубины прогрева, времени пребывания нагреваемого объема в температурном интервале существования аустенита, но, одновременно, увеличивается

размер зерна аустенита с соответствующим повышением точки M_n (температуры начала мартенситного превращения), возможно снижение скорости охлаждения.

Выявление закономерностей формирования размеров, структурно-фазового состава и свойств термообработанного воздействием плазменной дуги слоя, а также влияния на эти показатели технологических режимов процесса возможно на основе анализа результатов экспериментальных исследований.

Цель настоящей работы – определение рациональных параметров режима поверхностной плазменной закалки сталей 9ХС (0,88 % С), У10 (1,03 % С) и 170ХНМ (1,65 % С) на основе исследования структуры и свойств локальной зоны упрочнения.

Обработку образцов из предварительно отожженных сталей с исходной перлитно-цементитной структурой осуществляли дугой прямой полярности в аргоне. Диапазон изменения параметров режима: ток плазменной дуги 130 – 300 А, скорость ее перемещения 1 – 5 см/с. Напряжение на дуге составляло 21 – 23 В. Сочетания параметров режима вы-

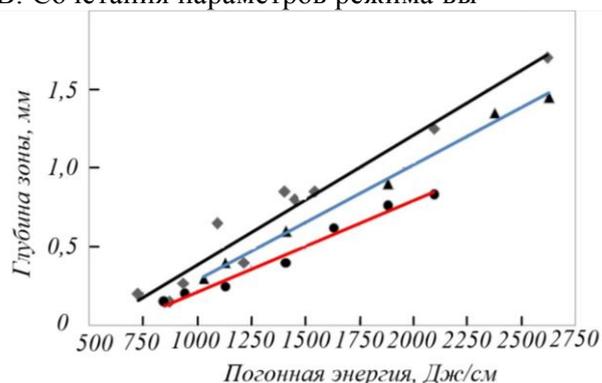


Рис. 1. Влияние погонной энергии (q) дуги на глубину (h) зоны плазменной закалки заэвтектоидных сталей:

◀ – 9ХС; ▲ – У10; ● – 170ХНМ

бирали с учетом обеспечения максимальных производительности процесса, глубины и ширины зоны закалки при отсутствии макроплавления поверхности.

*Из материалов конференции «Металлургия-2017»

Геометрические размеры (глубину и ширину), структуру и микротвердость локальной зоны упрочнения изучали на поперечных микрошлифах. Использовали оптические микроскопы Neophot-2, Zeiss Observer D1m (увеличение 50 – 1000) и программное обеспечение Thixomet PRO. Измерение микротвердости пирамидой Виккерса под нагрузкой 1,962 Н (200 г) проводили на твердомере Future-Tech 300 и ПМТ-3 под нагрузкой 0,784 Н (80 г) в сечениях с максимальной глубиной зоны упрочнения. Фазовый анализ поверхностного слоя проводили с использованием рентгеновских дифрактометров ДРОН-1, ДРОН-3 в Fe и Co K α -излучениях.

В результате проведенных исследований установлено, что с увеличением тока плазменной дуги глубина, ширина и твердость локальной зоны упрочнения возрастают. Увеличение скорости перемещения дуги при фиксированном значении тока сопровождается снижением этих показателей, что объясняется уменьшением погонной энергии процесса тепловложения.

Таким образом, определяющее влияние на геометрические размеры локальной зоны плазменной закалки, характеристики температурного поля и термического цикла процесса термообработки оказывает величина удельного теплового потока через поверхность (погонной энергии, представляющей отношение эффективной тепловой мощности дуги к скорости ее поступательного перемещения).

Зависимости глубины локальной зоны плазменной закалки исследованных сталей от погонной энергии дуги в изученном диапазоне параметров режима представлены на рис. 1. С увеличением погонной энергии дуги глубина зоны плазменной закалки возрастает для всех исследованных сталей, однако с увеличением содержания углерода этот рост замедляется, что можно связать с соответствующим уменьшением

теплопроводности. Необходимо отметить, что для стали 170ХНМ погонная энергия порядка двух тысяч Дж/см близка к предельной, поскольку дальнейшее ее увеличение сопровождается макроплавлением поверхности.

На рис. 2 представлены зависимости изменения микротвердости по глубине закаленной зоны исследованных сталей при различных значениях погонной энергии. Можно отметить, что фазовые превращения, протекающие в поверхностном слое при плазменной обработке, позволяют эффективно увеличить микротвердость всех исследованных сталей в зоне термического влияния. Так, для закаленного дугой с погонной энергией 2618 Дж/см поверхностного слоя стали 9ХС характерно наличие остаточного аустенита (до 43 %), игольчатого мартенсита пластинчатой морфологии (до 51 %) с дисперсностью 5 – 15 мкм и до 6 % карбидной фазы. Начиная с глубины примерно 0,5 мм (для центрального сечения) содержание остаточного аустенита понижается, карбидной фазы увеличивается, а в структуре наряду с мартенситом появляется троостит с межпластинчатым расстоянием 0,1 – 0,15 мкм. Микротвердость этой зоны уменьшается в соответствии с объемным соотношением присутствующих фаз. На глубине 1,3 – 1,5 мм троостит постепенно замещается сорбитом с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,5 мкм и пластинчатым перлитом. На глубине 1,7 мм и далее влияние поверхностного нагрева не прослеживается, структура представлена перлитом и вторичным цементитом с характерной для нее микротвердостью (рис 3). Для других режимов обработки общие закономерности формирования структурно-фазового состояния зоны упрочнения сохраняются с соответствующим уменьшением протяженности участков однородной структуры и изменением соотношения структурных составляющих.

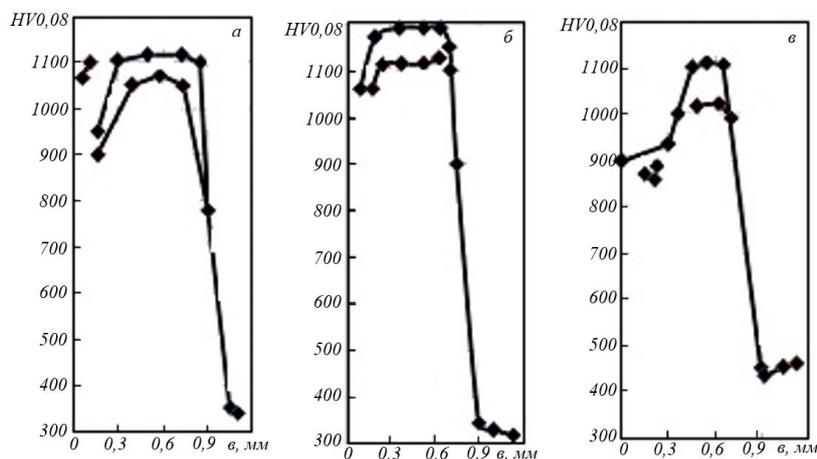


Рис. 2. Изменение микротвердости (HV 0,08) по глубине (z) зоны плазменной закалки сталей

9ХС (а), У10 (б), 170ХНМ (в) при погонной энергии дуги 2094 Дж/см (а, в) и 2375 Дж/см (б)

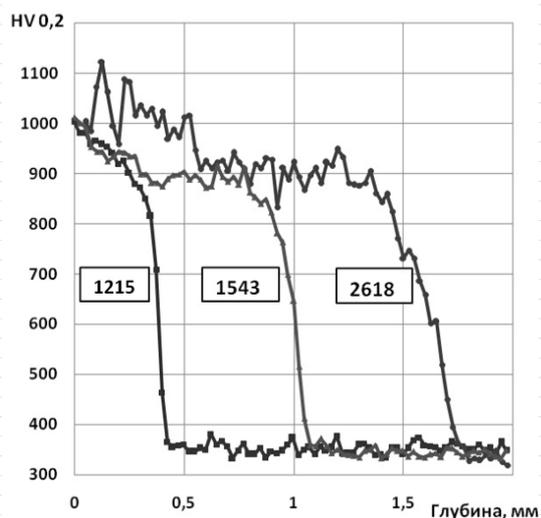


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине локальной зоны плазменной закалки стали 9ХС при различных значениях погонной энергии дуги

На рис. 4 показано влияние погонной энергии плазменной дуги на соотношение показателей структурных составляющих в поверхностном слое локальной зоны закалки стали У10. Фазовый анализ поверхностного слоя показал, что на линиях γ -фазы наблюдается асимметрия со стороны больших углов отражения, что свидетельствует о незавершенности процессов гомогенизации аустенита при нагреве. Кроме того, величина определенного методом экстраполяции истинного параметра решетки аустенита для всех режимов выше, чем соответствующая общему содержанию углерода в стали (примерно 1 %). Количество углерода в аустените, рассчитанное по этим параметрам, зависит от погонной энергии термообработки и изменяется в пределах 1,3 – 1,6 %. Это свидетельствует о том, что полной гомогенизации аустенита по

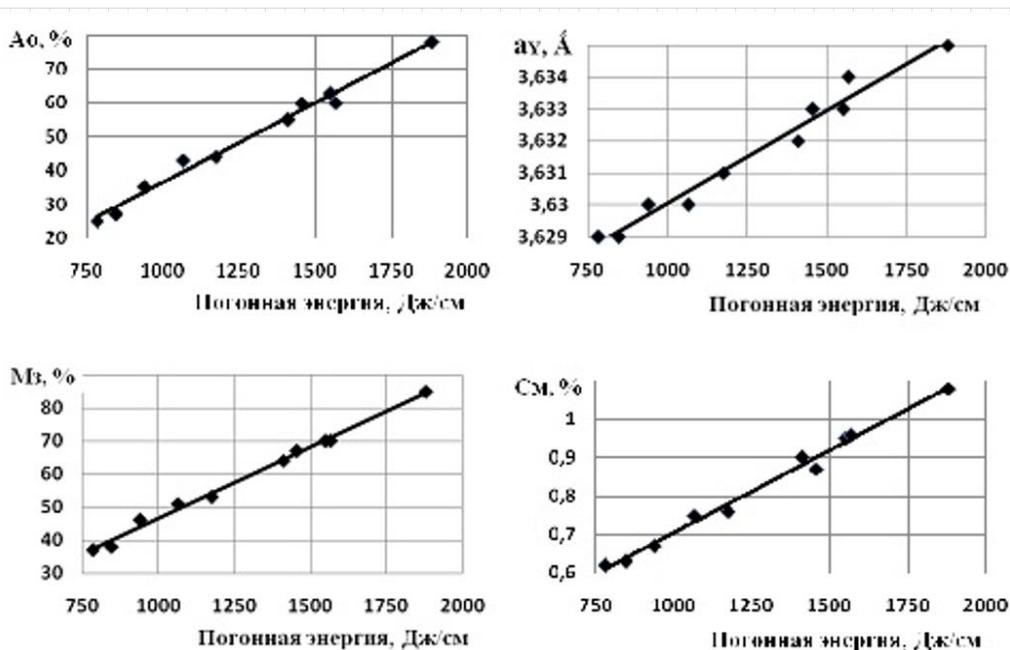


Рис. 4. Влияние погонной энергии дуги при плазменной закалке стали У10 на объемную долю остаточного аустенита в поверхностном слое (A_0 , %), параметр решетки аустенита (a_{γ} , Å), объемную долю мартенсита закалки в составе α -фазы (M_s , %), концентрацию углерода в мартенсита закалки (C_m , %).

углероду даже в поверхностном, наиболее нагретом дугой слое в диапазоне исследованных параметров режима не происходит.

Поскольку отражений от цементита на дифрактограммах не отмечено, логично предположить, что локальное обогащение аустенита углеродом происходит за счет его растворения, а температурно-временные условия диффузии при этом недостаточны для полного выравнивания концентрации углерода. Так как обогащенный углеродом аустенит имеет повышенную устойчивость против распада при охлаждении, в по-

верхностном слое образцов, обработанных при рассматриваемом сочетании параметров режима, фиксируется высокая (до 78 %) концентрация остаточного аустенита. В диапазоне малых значений погонной энергии дуги содержание остаточного аустенита не превышает 30 %.

В ходе рентгеноструктурного анализа стали У10 отмечено смещение дифракционных линий α -фазы в сторону меньших углов отражения, что свидетельствует о присутствии α -твердого раствора, обогащенного углеродом. Экспериментально установлено, что плазменная обра-

ботка стали У10 при повышенных значениях погонной энергии дуги позволяет зафиксировать мартенсит с содержанием углерода более 1 %, причем максимальное количество высокоуглеродистого мартенсита, рассчитанное при графическом разделении мартенситного мультиплета, составило 85 % от общего количества α -фазы. При начальных значениях исследованного диапазона погонной энергии концентрация углерода в мартенсите не превышает 0,6 – 0,7 %, а количество высокоуглеродистого мартенсита в составе α -фазы уменьшается примерно до 40 % (рис. 4). Таким образом, с увеличением погонной энергии плазменной закалки в заэвтектоидных сталях увеличивается степень растворения избыточного цементита, аустенит насыщается углеродом, что ведет к образованию значительной доли остаточного аустенита совместно с углеродистым тетрагональным мартенситом повышенной твердости при охлаждении.

Увеличение тепловложения с ростом погонной энергии дуги при плазменной закалке способствует достижению более высоких температур нагрева поверхности и увеличению времени ее пребывания в области температур выше A_{c1} . В то же время более мягкое влияние параметров обработки с увеличением концентрации углерода в заэвтектоидных сталях объясняется наличием структурно-свободного цементита (например, количество карбидной фазы в стали 170ХНМ достигает 15 – 20 %). Поскольку карбиды обладают пониженной по сравнению со сталью теплопроводностью, чем больше содержание карбидной фазы, тем выше энергозатраты для формирования термообработанного слоя определенной глубины.

Рассматривая влияние погонной энергии дуги на структурно-фазовый состав и твердость зоны упрочнения, необходимо учитывать, что при нагреве заэвтектоидных сталей выше температуры фазового перехода средняя концентрация углерода в аустените возрастает от 0,8 % за счет растворения карбидных фаз. Устойчивость аустенита при этом увеличивается.

Здесь необходимо отметить, что механизм и кинетика аустенитного превращения при быстрым нагреве, характерном для плазменной закалки, до настоящего времени подробно не исследованы. Известно несколько гипотез механизма аустенитизации, проанализированных в работе [2], но при любом механизме образуется аустенит, неоднородный по углероду [3, 4], и эта неоднородность при быстром охлаждении наследуется продуктами его превращения. В результате, после охлаждения в тонком (примерно до 0,3 мм) поверхностном слое фиксируется высокоуглеродистая аустенитно-

мартенситная структура, микротвердость которой изменяется в пределах от 850 до 1200 HV 0,08 в зависимости от соотношения присутствующих фаз и морфологии мартенсита (рис 2). И в том, и в другом случаях степень завершенности перераспределения углерода, которая контролируется температурно-временными показателями термического цикла обработки и зависит от исходной структуры стали, может существенно различаться. Это, в свою очередь, определяет значительное разнообразие структурных состояний зоны термического влияния, фиксируемых после обработки. Например, известно, что твердость мартенсита эффективно возрастает при увеличении в нем концентрации углерода до 0,6 %, далее увеличение твердости замедляется. Поэтому режим обработки заэвтектоидной стали должен обеспечить степень растворения карбидов, достаточную для получения мартенсита с такой концентрацией. Дальнейший рост тепловложения и растворение карбидной фазы увеличивают долю остаточного аустенита. Следовательно, для заэвтектоидных сталей при обработке на максимальную твердость поверхности предпочтительны режимы с тепловложением, обеспечивающим необходимую степень насыщения аустенита углеродом из растворяющейся карбидной фазы.

При режимах с минимальным из исследованных тепловложением в поверхностном слое заэвтектоидных сталей формируется преимущественно мартенситная структура, содержащая до 30 % остаточного аустенита, концентрация углерода в мартенсите составляет примерно 0,65 %, а доля высокоуглеродистого мартенсита в составе α -фазы не превышает 30 %. Твердость поверхности с такой структурой достигает 1000 HV 0,2 и постепенно уменьшается по глубине.

Увеличение тепловложения сопровождается формированием в поверхностном слое исследованных сталей повышенной (до 78 %) доли высокоуглеродистого содержащего примерно 1,5 % С остаточного аустенита, увеличением концентрации углерода в мартенсите (свыше 1 %) и ростом объемной доли высокоуглеродистого мартенсита в составе α -фазы. Такая структура, представляющая собой композицию твердых составляющих (мартенсита и карбидов в менее твердом остаточном аустените), характеризуется значительным разбросом микротвердости (рис. 3), потенциально нестабильна после охлаждения и обладает повышенным запасом износостойкости. Мартенситное превращение остаточного аустенита, протекающее в процессе контактно-ударного или абразивного взаимодействия с изнашивающей средой, обеспечивает не только

повышение твердости, но и частичную диссипацию энергии разрушения в сочетании с релаксацией напряжений при образовании кристаллов мартенсита деформации. Износостойкость рабочих поверхностей деталей в процессе такой трансформации структуры многократно возрастает.

Таким образом, изменяя погонную энергию дуги с помощью целенаправленного выбора параметров режима плазменной закалки заэвтектоидной стали, можно сформировать поверхностный слой, обладающий дисперсной мартенситно-аустенитно-карбидной структурой с переменным содержанием составляющих фаз. При повышенном содержании углеродистого мартенсита и карбидов твердость такого слоя будет максимальной для данного состава стали, а поверхность будет обладать повышенной износостойкостью в условиях работы инструмента деформации, контактного трения качения и скольжения. В случае, если преобладающей фазой в составе этого слоя является высокоуглеродистый остаточный аустенит, твердость поверхности будет ниже, однако в соответствующих условиях эксплуатации можно реализовать механизм превращения аустенита в мартенсит деформации с повышением износостойкости.

Выводы. Исследовано влияние погонной энергии процесса плазменной закалки заэвтектоидных сталей на структуру и свойства (глубина и твердость) локальной зоны упрочнения. Показано, что по глубине зоны формируется градиентная структура с закономерно изменяющимися дисперсностью и микротвердостью составляющих. Структурно-фазовое состояние этой зоны обеспечивает плавный переход механических свойств от закаленного слоя к основному металлу. В поверхностном слое зоны упрочнения формируется дисперсная мартен-

ситно-аустенитно-карбидная структура с переменным в зависимости от режима обработки содержанием составляющих, далее по глубине концентрация остаточного аустенита и мартенсита уменьшается, в структуре появляется троостит, который постепенно замещается сорбитом. Глубже располагается перлитно-цементитная структура сталей, не претерпевшая фазовых превращений в результате термического воздействия. На основании результатов исследований установлены закономерности, позволяющие целенаправленно управлять структурным состоянием и технологическими свойствами зоны упрочнения исследованных сталей, добиваясь их оптимального соотношения для различных условий изнашивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балановский А.Е. Основные вопросы теории плазменного поверхностного упрочнения металлов (Обзор, часть первая) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 12. С. 18 – 30.
2. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
3. Christian J.W. The theory of transformations in metals and alloys. – Oxford: Pergamon Press, 2002. – 617 p.
4. Shtansky D.V., Naka K., Onomori Y. Perlite to austenite transformation in an Fe – 2,6 Cr – 1 C alloy // Acta mater. 1999. Vol. 47. No. 9. P. 2619 – 2632.

© 2017 г. Е.И. Сафонов
Поступила 27 ноября 2017 г.

ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

УДК 622.281.424

Г.Н. Волченко¹, В.Г. Челпанов², В.Н. Фрянов³

¹Сибирская инжиниринговая компания ООО «СИБКОМ»

²Фирма «Урал»

³Сибирский государственный индустриальный университет

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАБРЫЗГБЕТОНИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Строительство, ремонт зданий и сооружений с применением метода набрызгбетонирования (торкретирование) давно известны. Этот метод отличается оперативностью, малобюджетностью и является наиболее обоснованным и привлекательным для быстрого строительства и ремонта. Торкрет-бетон как материал бетонирования представляет собой бетонную смесь, которую подают к месту производства работ по материалопроводу и наносят путем разбрызгивания под высоким давлением, что обеспечивает уплотнение смеси.

Раздельная технология силового-инерционного формования бетонной смеси в конечном итоге приводит к тому, что раздробленные на мельчайшие частицы смеси, обладающие высокой кинетической энергией, наносятся на поверхность бетонирования. При этом по мере накопления, т.е. формования, под действием сил инерции происходит процесс выталкивания воды и воздуха из бетонной смеси, что позволяет получить смесь высокой плотности, прочности и адгезии.

Понятия технологии «сухого» и «мокрого» торкрет-бетона относятся к состоянию исходной смеси во время ее транспортирования по материалопроводу. Эти понятия сначала ничего не говорят о консистенции и процентном содержании воды и цемента в бетонной смеси: при «мокром» торкрет-бетоне проводится транспортирование бетонной смеси с предварительно обеспеченной консистенцией смеси и водоцементным отношением; при «сухом» торкрет-бетоне отличие проявляется при транспортировании сухой бетонной смеси сплошным потоком и обеспечении водоцементного отношения и консистенции смеси на выходе из распылительного сопла при нанесении бетонной смеси на поверхность.

Применение сухого торкретирования подходит для крупных и мелких ремонтных проектов, в которых можно эффективно организовать защиту

от пыли и удаление отскока, где не требуется качественной отделки поверхности, и внешний вид не имеет важного значения. Преимущества сухого метода: больше толщина укладываемого слоя за один проход; исключение необходимости создания «клеящего» слоя; большое расстояние подачи рабочей смеси – до 300 м по горизонтали и до 100 м по вертикали. Недостатки – большой отскок, т.е. потери до 30 %; большое пылевыведение, невозможность затирки слоя сразу после укладки.

Мокрый метод торкретирования эффективен при стабильном (непрерывном) выполнении большого объема работ. Преимущества: меньший отскок (10 – 15 %); меньше пылевыведения; возможность затирки поверхности слоя, возможность повторного применения смеси от отскока (при соответствующей подготовке рабочего места); возможность использования торкрет-машины в качестве бетононасоса. Недостатки: обеспечивает малую скорость потока на выходе, в результате чего нанесенная смесь меньше уплотняется, что вызывает снижение прочности нанесенного слоя; возникают существенные проблемы при засорении шлангов; на конце сопла возникает реактивная тяга, которая не позволяет работать с люльки, а материальный рукав нужно держать двумя руками; расстояние подачи рабочей смеси меньше – до 100 м по горизонтали и до 30 м по вертикали. Из вышесказанного следует, что каждый из методов имеет свои преимущества и какой применить – исходят из имеющихся в наличии ресурсов и конечных целей.

Анализ и обобщения рассматриваемой проблемы обоснованно ставят задачу создания эффективной инновационной, мобильной, малобюджетной, импортозамещающей технологии, позволяющей нивелировать недостатки известных технологий для оперативного



Рис. 1. Мобильное оборудование и технология нанесения набрызгбетона полусухим методом

строительства и ремонта зданий и сооружений и др. Необходимо разработать линейку импортозамещающего оборудования, эффективную рецептуру сухих смесей на базе местного сырья и др. [1]. Можно обоснованно ставить задачу о совершенствовании существующих технологий и создания варианта, который бы комплексно использовал преимущества сухого и мокрого торкретирования.

Группой инженеров (Фирма «Урал», г. Днепр) под руководством Челпанова В.Г. разработана и внедрена технология «полусухого» метода набрызга бетона [2] (рис. 1). Данная технология занимает промежуточное место между сухим и мокрым торкретированием, используя достоинства обеих технологий. В предлагаемой технологии по материалному рукаву раствор подается порциями с воздушными промежутками, что увеличивает эффективность подачи за счет поршневого действия порции. Это позволяет легко удерживать рукав и ствол в руках, так как он полупустой и легкий. Создано и опробовано пилотное оборудование для нанесения набрызгбетона полусухим методом, что значительно расширяет возможности применения технологии для решения различных инженерных задач. Технология нанесения полусухого торкрета возможна при использовании оборудования, выпускаемого в России, но не используемого для торкретирования. ООО «СИБКОМ» разработал эффективную модификацию ствола (торкрет-сопла) *Termiton[®]X4* для мокрого и полусухого торкрета, повышающую эффективность способа (рис. 2) [3, 4]. Эта технология наиболее приемлема для строительства и ремонта с использо-

ванием 3D панелей («Русская стена»). Получаемый процесс позволяет наносить слой до 250 мм на вертикальной поверхности [2].

Сибирская инжиниринговая компания ООО «СИБКОМ» г. Новокузнецк при содействии Института горного дела СО РАН г. Новосибирск, Института горного дела и геосистем СибГИУ на основе исследований [3, 4] разработала импортозамещающий инновационный продукт и запустила стартап «Техника и технология набрызгбетонирования *Termiton[®]*». Совершенствовать оборудование производства мировых брендов представлялось делом не перспективным. Решающим фактором для разработки новой модификации ствола (торкрет-сопла) установки набрызгбетонирования является первостепенное значение данного изделия в финальной части процесса сухого набрызгбетонирования. Важнейшим элементом ствола для набрызга бетона служат узлы затворения и смешивания. Устройство должно за 20 – 30 с⁻³ максимально затворить (смочить) сухую смесь, чтобы получить максимальное количество и высокое качество набрызгбетона (с высокой адгезией (прилипание) и когезией (плотность наносимой смеси)), что может кардинально снизить запыленность при отскоке сухой смеси.

Termiton[®]X5 – это новейшая разработка ООО «СИБКОМ» в линейке высокоэффективных, легких, износостойких (с применением инновационных материалов), с прогрессивной эргономикой и промышленным дизайном стволов (торкрет-сопла) для набрызгбетонирования под торговой маркой *Termiton[®]* (рис. 3, 4).



Рис. 2. Модификация ствола *Termiton*[®] X4 для мокрого и полусухого торкрета

Изделие *Termiton*[®] X5 совместимо с любым торкрет-оборудованием (*Aliva*[®]-257, MEYCO[®] riccola, MPC5 4 и др.), снижает (в 5 раз) запыленность на рабочем месте, уменьшает потери компонентов торкрет-смеси за счет снижения отскока (экономия сухих смесей минимум на 25 %), повышает прочность бетона и производительность труда по сравнению с основным конкурентом – торкрет-форсункой *Aliva*[®] *Converto* производства *Sika*[®] (Швейцария).

В результате совершенствования, широкомасштабных испытаний и внедрения техники и технологии *Termiton*[®] на ведущих горнодобывающих и шахтостроительных предприятиях России (ОАО «Евразруда» г. Таштагол, Мирнинский специализированный шахтостроительный трест АК «АЛРОСА» г. Мирный, ООО «Заполяная строительная компания» г. Норильск, ООО «Шахта Байкаимская» г. Польшаево, ЗАО «Служба защиты сооружений»

г. Москва, ТОО «Востокцветмет» г. Усть-Каменогорск (Казахстан) и др.) на различном торкрет-оборудовании, при использовании различных сухих смесей были получены эффективные производственные результаты. Установлено, что достигается кардинальное снижение отскока сухих смесей (в 5 раз) и запыленности на рабочем месте (более чем в 6 раз), что позволяет получить существенный экономический, экологический и социальный эффект (рис. 3). Положительные результаты установлены и при нанесении фибробетона [5].

Создание производственных условий для оказания высококачественных услуг по креплению горных выработок, в частности, по набрызгбетонированию для предприятий горной промышленности, металлургии, строительства и др. базируется на инновационной технике технологии *Termiton*[®], превосходящей аналоги по ресурсосбережению и качеству.



Рис. 3. Работа изделия *Termiton*[®] X5 с торкрет установкой *Aliva*[®]-257 в шахте (а) и на высоте (б)

Рис. 4. Общий вид изделия *Termiton*® X5 новейшей модификации

При этом материалы и оборудование для осуществления этой технологии существенно дешевле предлагаемых на рынке, что в конечном счете снижает себестоимость продукта и позволяет успешно конкурировать на рынке услуг по данному виду работ [6 – 8].

Как было сказано выше, каждый из методов имеет свои преимущества и какой применить – сложная инженерная задача, решаемая исходя из имеющихся в наличии ресурсов и конечных целей (см. таблицу).

В результате значительного производственного опыта использования различных технологий набрызга бетона сделано несколько практических выводов.

1. Расчет бетонных конструкций методом конечных элементов убедительно доказывает, что там, где нет активного попадания влаги, разрушение бетона происходит за счет вынужденных естественных колебаний конструкции.

Первые силовые трещины в конструкции появляются одновременно с началом ее работы. В конструкции изначально заложены зоны бетона, которые в процессе эксплуатации или дают трещину, или отторгают часть бетона. И только в процессе дальнейшей эксплуатации появляются хлориды, коррозия арматуры за счет первоначальных силовых трещин.

Вывод: нанесение на локально разрушенную поверхность не армированных фиброй материалов ведет к возникновению трещин и отторжению материалов, так как эти материалы не работают на растяжение.

2. Разрушенный бетон практически имеет прочность на сжатие от 2,0 до 3,0 МПа. Ремонт такого бетона должен производиться материалом равным ему по прочности. На испытываемые образцы бетона прочностью 3,00 МПа был нанесен 0,05-м слой бетона сухим торкретом прочностью 5,50 МПа. При испытаниях

Сравнительные показатели методов торкретирования

Номинальные показатели	Метод торкретирования			
	Полусухой	Мокрый	Сухой	Сухой <i>Termiton</i> ®
Потребление электроэнергии, кВт	23	8	45	45
Потребление воздуха, м ³ /мин	2	0,3	6	6
Скорость факела, м/с	60	30	150	150
Наносимый слой за один набрызг, м	25	4	6	8
Отскок (потери), %	5	10	30	5
Запыленность, кг/м ³ · 10 ⁻⁶	10	15	55	10
Производительность, м ³ /смена	8	4	5	8
Высота подачи, м	120	30	100	100
Формирование адгезии	Скорость нанесения + работа цемента	Работа цемента	Скорость нанесения	Скорость нанесения
Прочность на сжатие, МПа	4, 5	3, 5	7, 0	9, 0
Используемые материалы (песок, цемент)	Местные	Местные	Покупная смесь в мешках	Местные



Рис. 5. Механизированный самоходный комплекс для набрызгбетонирования и укладки бетона за опалубку [9]

на растяжение в контактной зоне происходил срыв сухого торкрета.

Вывод: прочный бетон, нанесенный на старую поверхность, отторгается самой конструкцией в процессе ее работы. Многие могли наблюдать так называемое отслоение «коржами».

3. Адгезия старого и нового бетона. По существующей технологии ремонтных составов бетона имеются добавки, которые взаимодействуют с оставшейся известью в старом бетоне, что позволяет проводить сращивание старого и нового бетона за счет микрохимических соединений.

Вывод: работа добавок на основе извести не может происходить без большого количества влаги. Сухой торкрет не имеет достаточно влаги для работы добавок, так как нанесение смеси происходит на большой скорости, что приводит к вытеснению влаги из ремонтного состава.

4. Сухой торкрет-бетон не позволяет работать локально. Например, нужно произвести локальный ремонт плиты перекрытия, восстановить ребро 0,05 x 0,10 м прямоугольной формы. Полусухим и мокрым методами можно без особого труда наращивать такие сложные фигуры. Восстановленные локальные места в дальнейшем могут штукатуриться ремонтными составами. Структура восстанавливаемой поверхности на основе жидкого акрила с последующей обработкой водой под большим давлением позволяет локально реставрировать исторические здания и сооружения из бетона.

Вывод: после полусухого и мокрого методов торкретирования на восстановленную поверхность можно нанести любой вид покрытия.

5. Работа сухим методом торкретирования требует высокой квалификации сопловщика. Например, в США прежде чем приступить к работе сухим методом самостоятельно, уче-

ник должен обучаться с наставником не менее пяти лет.

Технологии набрызгбетонирования традиционно используются в горном деле, металлургии, строительстве. Однако, как показывает практика последних лет, технические возможности общеизвестной технологии набрызгбетонирования (торкретирования), в частности техники и технологии *Termiton*[®], не достаточно широко используются при решении технических, экологических и социальных задач государства в условиях различных чрезвычайных ситуаций.

Основным достоинством техники и технологии набрызгбетонирования *Termiton*[®] является его мобильность на большие расстояния, простота и дешевизна. Ранее разработанные самоходные комплексы на базе автомобиля КамАЗ хорошо себя зарекомендовали для крепления горных выработок [9] (рис. 5).

Нет необходимости при формировании стройплощадки использовать дорогостоящую тяжелую технику, дорогие стройматериалы. Для создания изделий, конструкций из набрызгбетона нужен песок, цемент, вода и электроэнергия. Физико-механические характеристики получаемого бетона известны, причем есть широкие возможности варьировать этими характеристиками в зависимости от решаемой инженерной задачи.

В настоящей работе предлагается несколько направлений использования набрызгбетонирования для повышения оперативности, эффективности производства за счет уменьшения трудозатрат и снижения себестоимости продукции, в том числе при чрезвычайных и форсмажорных ситуациях.

Одно из направлений – это современное строительство и ремонт с использованием 3D панелей. Конструктивная система 3D – это достаточно новая экономичная трехслойная

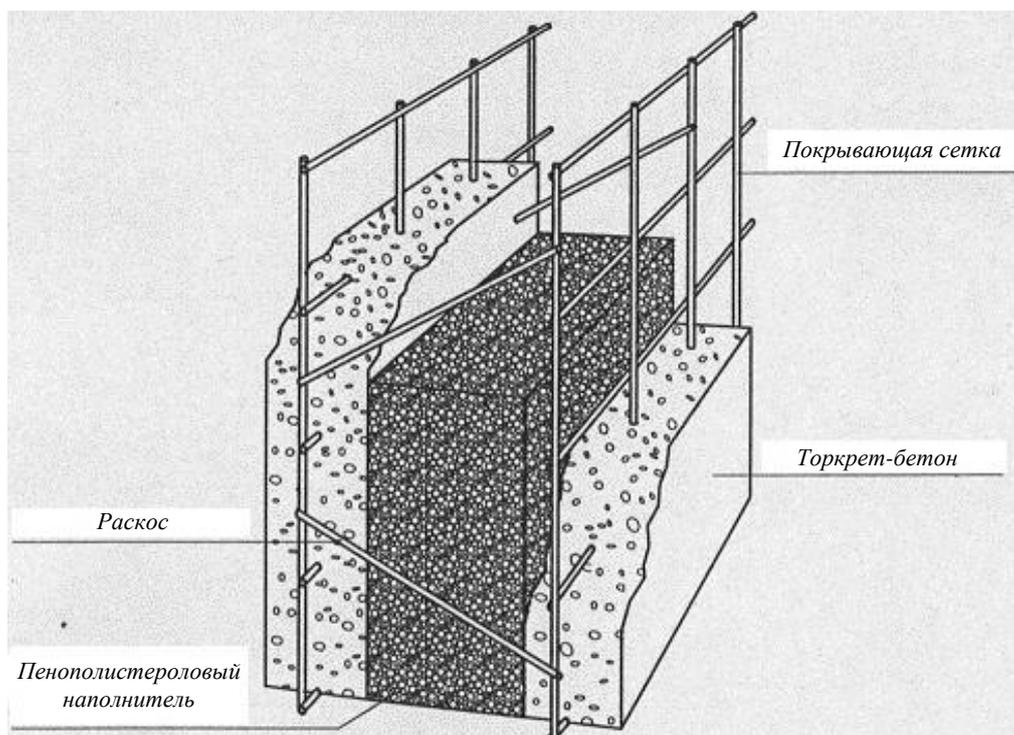


Рис. 6. Поперечное сечение конструктивной системы 3D панели [10]

система, которая находит все более широкое применение в крупнопанельном строительстве и основывается на использовании трехмерных 3D панелей заводского изготовления. 3D панели состоят из пенополистиролового наполнителя толщиной от 40 до 100 мм, расположенного между двумя плоскопараллельными сварными сетками из проволоки (покрывающей сетки) и наклонной диагональной арматуры (раскосов), которая пронизывает пенополистироловый наполнитель и приваривается к контурной проволоке, покрывающей сетки с двух сторон, образуя пространственную арматурную ферму [10] (рис. 6).

В результате получается относительно легкая, трехмерная стержневая система повышенной жесткости. 3D панели поставляются в виде отдельных сборочных единиц на место строительства, где из них можно достаточно легко создать пространственную конструкцию стен и плит. Для выполнения швов между 3D панелями служат соединительные сетки. Таким образом создается непрерывная сеточная структура (арматура) всей конструкции.

В процессе возведения здания на обе наружные поверхности данной «сухой» структуры наносится слой бетонного раствора (торкрет-бетона) толщиной от 40 до 60 мм. Во время этого процесса пенополистироловый наполнитель 3D панелей выступает в роли опалубки и основы под штукатурку. Как только бетон затвердевает, конструкция 3D приобретает свою структурную и функциональную

прочность. В результате получается многослойная система, в которой две наружные железобетонные оболочки соединяются между собой посредством пространственной арматурной конструкции из диагональных стержней и которая обладает значительным сопротивлением сдвигающим усилиям.

Чтобы доказать структурную эффективность конструкций 3D, известные исследовательские центры Австрии и других стран провели множество испытаний на сжатие, изгиб и сдвиг. Эти испытания показали, что все основные теории и методы расчетов для железобетонных конструкций могут быть без ограничений применены и для конструкций 3D. В свою очередь это означает, что, принимая во внимание особые характеристики, все национальные и международные стандарты для железобетонных конструкций действительны и для конструкций 3D [10].

Нами разработаны и обоснованы проекты ремонта зданий после обстрела жилых домов в городах Дебальцево, Енакиево (рис. 7) и др. Практика и расчеты показывают, что при применении 3D панелей при ремонте таких зданий, трудоемкость и время работ значительно снижаются с обеспечением всех строительных норм и правил.

Таким образом, конструктивная система 3D – это экономичная альтернатива традиционным конструктивным системам, которая отвечает всем прочностным и физическим требованиям, связанным со строительной физикой.



Рис. 7. Характер разрушений жилого дома после попадания артиллерийского снаряда:
а – внешние, *б* – внутренние

Кроме того, она позволяет сократить время строительства, вес зданий на 40 % и в разы снизить себестоимость строительства и ремонта малобюджетных жилищных комплексов, так необходимых населению после чрезвычайных ситуаций (рис. 8).

Дома, построенные по любой из технологий купольного строительства, отличаются рядом особых свойств, которых невозможно достичь традиционными методами строительства. Именно благодаря этим отличиям купольные здания являются не просто альтернативой домам кубического типа, они представляют собой совершенно новый вид сооружений, способный решать большинство насущных бытовых проблем при отсутствии каких-либо материальных затрат. Идеально равномерное распределение нагрузки на конструкцию обеспечивается ее сферической формой. Для строительства купольных сооружений производятся 3D панели специальной формы.

Новые возможности для возведения куполов предоставляют пневматические, надувные опалубки. Их достоинства состоят в дешевизне, многооборачиваемости, легкости транспортирования и установки, в совершенстве формы, простоте распалубки. Надувная опалубка, безусловно, безмоментная конструкция. Следовательно, отвердевшая оболочка становится автоматически безмоментной конструкцией. В этом совершенство формы пневмоопалубок [11].

В этой технологии должен быть задействован быстровозводимый пневматический каркас. Он изготавливается индивидуально и в надутом виде полностью повторяет контуры внутренней поверхности купола. В тех местах, где должны быть окна и двери, каркас имеет выступы заданной формы и размеров. Изготовление пневмокаркаса — самый затратный и сложный этап строительства, но поскольку технология вдвое сокращает расходы на сооружение, его цена полностью окупается.

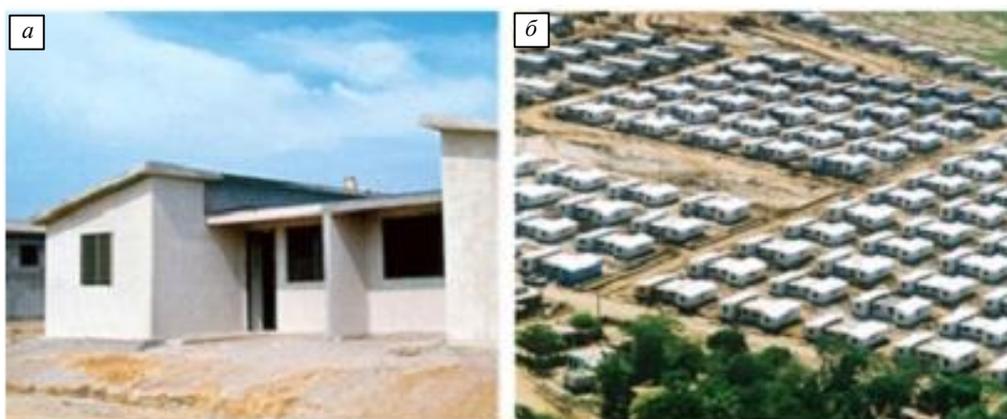


Рис. 8. Малобюджетное строительство:
а – жилое здание; *б* – жилищный комплекс

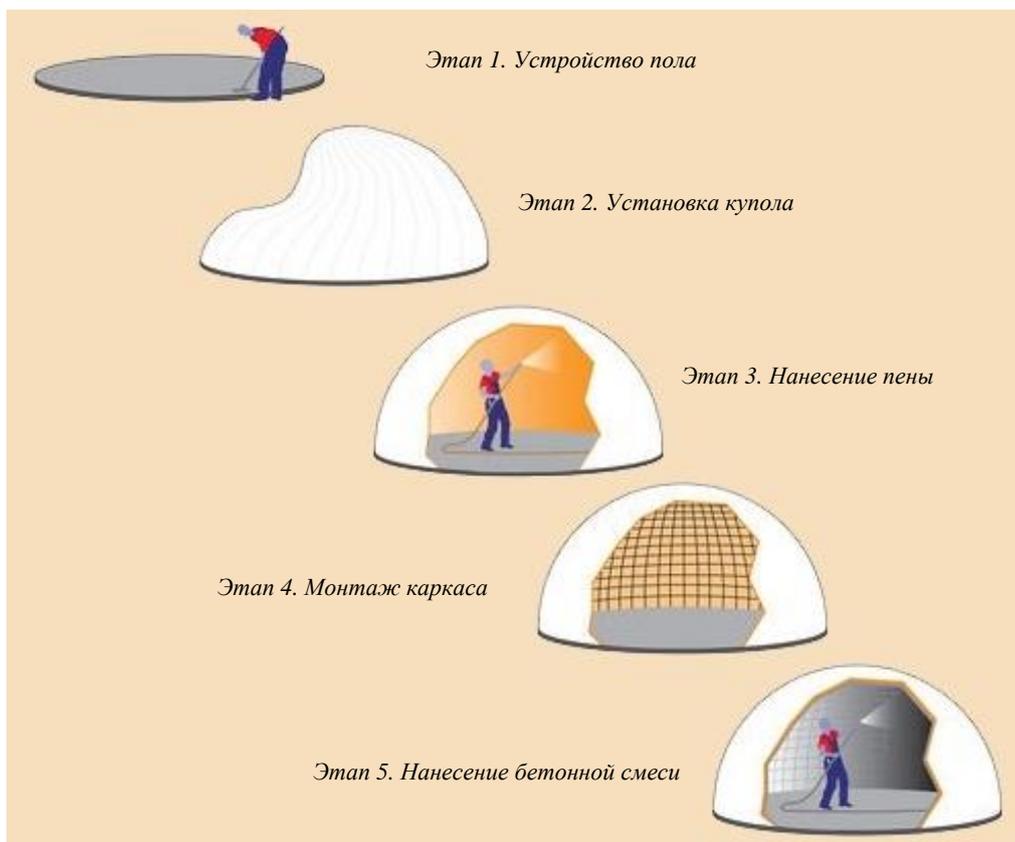


Рис. 9. Этапы варианта технологии возведения купольных конструкций с применением надувной опалубки [12]

Заключительный этап работ – напыление основного материала на купол. После окончательного застывания смеси каркас демонтируют, устраняют дефекты напыления в проемах, на чем процесс возведения купола заканчивается. Как упоминалось выше, строительство дома по купольной технологии экономит около 50 % денежных средств (рис. 9).

В СибГИУ на кафедре геотехнологии и геосистем разрабатывается проект техники и технологии при осуществлении торкретирования для локализации или консервации опасных объектов (создание перемычек в шахте, саркофаг для радиации, могильников и др.). На кафедре строительства и архитектуры разработаны типовые проекты и регламенты для строительства домов с технологией торкретирования с применением конструктивной системы 3D и возведения купольных конструкций с применением надувной опалубки и др. Учитывая, что строительные технологии постоянно совершенствуются, необходимо и в дальнейшем совершенствовать, расширять сферу применения и предлагать комплексные технологии с использованием набрызгбетонирования для строительства и ремонта зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях. Такие разработки предназначены для МЧС России и др.

Выводы. Анализ и обобщения рассматриваемой проблемы, достоинства техники и техно-

логии **Termiton**[®] предполагают решение инженерных задач по созданию инновационного мобильного, малобюджетного, импортозамещающего, оперативного строительства и ремонта зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях. Быстрая технология строительства и ремонта **Termiton**[®] с использованием прогрессивных методов (полусухой набрызг бетона с использованием 3D панелей, надувной опалубкой и др.) позволит расширить сферу применения и оперативно решать проблемы при чрезвычайных, форсмажорных ситуациях (строительство и ремонт при шахтных авариях, при пожарах, наводнениях, ураганах, землетрясениях, взрывах бытового газа, обстрелах и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Венгловский В.Г., Волченко Г.Н., Фрянов В.Н., Приб В.В., Волченко Н.Г. Совершенствование технологии набрызгбетонирования для повышения эффективности и качества крепления подземных выработок // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. статей. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. С. 90 – 94.
2. Электронный ресурс. <https://www.youtube.com/watch?v=uliumDAErSk>.

3. Волченко Г.Н., Фрянов В.Н., Приб В.В., Волченко Н.Г. Нестандартный подход к повышению эффективности и ресурсосбережения малобюджетной технологии набрызгбетонирования при креплении горных выработок // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. статей. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 133 – 137.
4. Волченко Г.Н., Серяков В.М., Фрянов В.Н., Волченко Н.Г. Техника и технология набрызгбетонирования *Termiton*[®] для крепления горных выработок в сложных условиях // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. статей. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 82 – 93.
5. Волченко Г.Н., Исахаров Б.Д., Фрянов В.Н., Волченко Н.Г., Волков Е.А., Приб В.В. Промышленные испытания ствола обеспыливающего набрызгбетонирования *Termiton X4* // Вестник СибГИУ. 2015. № 1 (11). С. 32 – 35.
6. Электронный ресурс. <https://www.youtube.com/watch?v=mR1Zag98Ct0>.
7. Электронный ресурс. <https://www.youtube.com/watch?v=CQfSjww-URU>
8. Волченко Г.Н., Ярыгин И.Г., Фрянов В.Н. Резюме проекта «техника и технология набрызгбетонирования *Termiton*[®]» для инвестора // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. статей. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. С. 148 – 152.
9. Электронный ресурс. <http://uer74.ru/production/mehanizirovannyekompleksy/mechanicalkompleks>
10. Электронный ресурс. <http://textarchive.ru/c-1980611-pall.html>.
11. Электронный ресурс. <http://domdvordorogi.ru/pnevmaticheskaya-opalubka/>.
12. Электронный ресурс. <http://ultradizz.ru/architecture/403-kupolnye-monolitnye-zdaniya-na-naduvnom-karkase.html>.

© 2017 г. Г.Н. Волченко, В.Г. Челпанов,
В.Н. Фрянов

Поступила 17 октября 2017 г.

С.В. Риб, В.В. Басов

Сибирский государственный индустриальный университет

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Одним из методов получения достоверной информации о геомеханических процессах в массиве горных пород при подземной отработке угольных пластов сложного строения являются шахтные эксперименты. Однако их проведение связано с высокими материальными и трудовыми затратами, поэтому в практике научных исследований широко применяется математическое и физическое моделирование [1]. Для изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород широко используются численные методы, а именно, метод конечных элементов [2], реализацию которого осуществляют с помощью комплекса компьютерных программ [3].

В настоящей работе для исследования геомеханических процессов в окрестности подземных горных выработок проводится физическое моделирование процессов деформирования горных пород на моделях из эквивалентных материалов.

Целью настоящей работы является выявление при физическом моделировании закономерностей распределения деформаций в эквивалентном материале в окрестности искусственной полости, воспроизводящей горную выработку на пласте при наличии породного прослойка и без него.

Подбор эквивалентного материала осуществляли для угля, аргиллита, алевролита, алевропесчаника и песчаника [4]. Были рассчитаны прочностные характеристики эквивалентного материала с соблюдением подобия для каждой породы по формулам, предложенным Г.Н. Кузнецовым [1].

Для изготовления эквивалентного материала осуществляли смешивание песка и парафина, процентное содержание материалов смеси по массе составляло 95,0 – 98,5 % и 1,5 – 5,0 % соответственно. Было изготовлено по пять образцов из смеси песка и парафина каждого варианта сочетания их масс. Испытание образцов на одноосное сжатие осуществляли на гидравлическом прессе «Азимут» БП-29.

По результатам испытаний определены предел прочности образцов при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$).

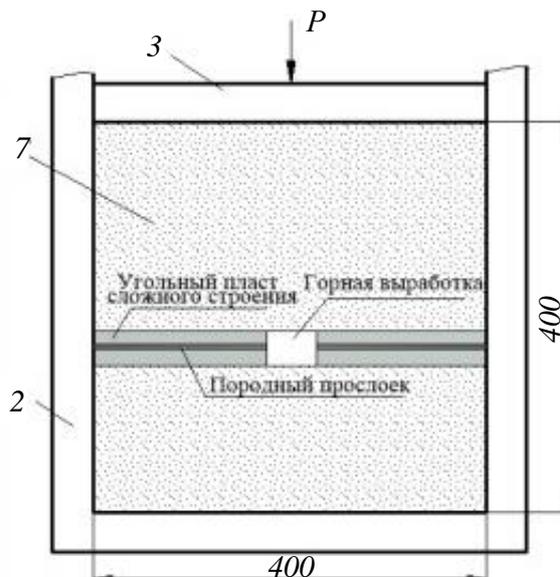
В соответствии с результатами расчета по методике работы [1] и данных проведенных испытаний подобрана рецептура состава смеси и определены пределы прочности эквивалентного материала при сжатии, соответствующие реальным горным породам.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния горных пород в окрестности горной выработки на пластах сложного строения был разработан и изготовлен лабораторный стенд [5]. Общий вид лабораторного стенда и схема расположения горной выработки в модели из эквивалентных материалов показаны на рис. 1. Лабораторный стенд включает в себя корпус, гидравлическое и контрольно-измерительное оборудование. Корпус состоит из боковых стенок, основания, подвижной плиты для размещения гидродомкрата, на котором установлен динамометр, упирающийся в перекладину. В состав контрольно-измерительного оборудования входит динамометр с индикатором часового типа, прошедший метрологическую поверку; фотоаппарат с приспособлениями (штатив, система освещения), компьютер. Пространство стенда для укладки песчано-парафиновой модели имело следующие размеры: ширина 400 мм, высота 400 мм, глубина 100 мм. На физических моделях воспроизводится область горного массива, равная трем радиусам ширины выработки (масштаб 1:100) при соблюдении механического и геометрического подобия.

Моделировали слоистый массив горных пород, вмещающий угольный пласт сложного строения одной из шахт Кузбасса в масштабе 1:100. На модели из эквивалентных материалов воспроизводили область горного массива 40×40 м с угольным пластом и вмещающими его горными породами. В ходе экспериментов сравнивали качественную картину развития процесса деформирования пород в окрестности одиночной выработки для пласта простого



a



б

Рис. 1. Лабораторный стенд для определения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности горной выработки (*a*) и схема расположения горной выработки в модели из эквивалентных материалов (*б*):

- 1 – пространство для укладки песчано-парафиновой модели; 2 – корпус стенда; 3 – подвижная плита; 4 – гидравлический домкрат; 5 – динамометр с индикатором часового типа; 6 – основание стенда; 7 – песчано-парафиновая модель; P – прилагаемая нагрузка

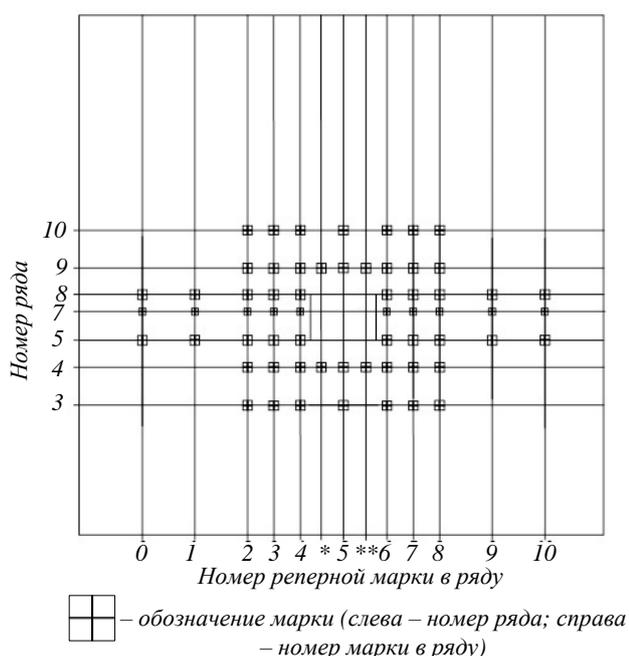


Рис. 2. Схема расположения реперных марок на лицевой стороне физической модели

строения (без породного прослойка) и при наличии в пласте породного прослойка.

Нагрузку задавали ступенчато. Возникающие при этом деформации массива фиксировали зеркальной цифровой фотокамерой с захватом области 480×480 мм, которую устанавливали в одном положении на время всего лабораторного эксперимента (разрешение фотокамеры 20,4 Мп).

Изготовление модели происходило путем закатки слоев снизу вверх. При этом для каждого слоя использовали эквивалентный материал, соответствующий прочностным и деформационным характеристикам породы в натуре. Готовую смесь в горячем состоянии перекладывали в опалубку лабораторного стенда. Грабли и гладилки перед укаткой обеспечивали равномерное разрыхление смеси и выравнивание поверхности

слоя. Уплотнение каждого слоя осуществляли цилиндрическим катком. В центре модели сооружали выработку, высота и ширина которой в пересчете на натуру составляли 3,6 и 5,0 м соответственно.

Измерение смещений поверхности модели проводили по реперным маркам (рис. 2), которые закрепляли на лицевой поверхности модели (семь рядов марок) в окрестности горной выработки (в почве, боках и кровле). Расстояния между марками, приведенные к условиям натуры, по вертикали и по горизонтали составляли от 1 до 4 м. На корпус используемого стенда наклеивали опорные реперные марки, которые остаются неподвижными в процессе испытания. Посредством опорных реперных марок фиксировали оседание всей модели и конвергенцию на участках между марками в горизонтальном и вертикальном направлениях. После установки всех марок на лицевую и тыльную части модели прикручиваются на шпильки прозрачные оргстекла толщиной 10 мм.

В ходе лабораторных экспериментов сравнивали качественную картину изменения дефор-

маций массива в окрестности одиночной выработки:

- модель 1 – для пласта однородного строения (при отсутствии породного прослойка);
- модель 2 – при наличии породного прослойка в пласте.

Общий вид моделей в начале испытаний приведен на рис. 3.

Качественную картину поведения массива изучали на основании анализа смещений фиксированного расположения реперных марок всех уровней на фотоснимках.

Координаты реперных марок определяли методом фотофиксации. Проводили фотографирование модели до начала испытаний, а затем последовательно при каждом цикле нагружения. Положение фотокамеры неизменно для того, чтобы на снимке были расположены опорные реперные марки на корпусе стенда. После проведения испытаний проводили обработку результатов с помощью компьютерной программы AutoCAD.

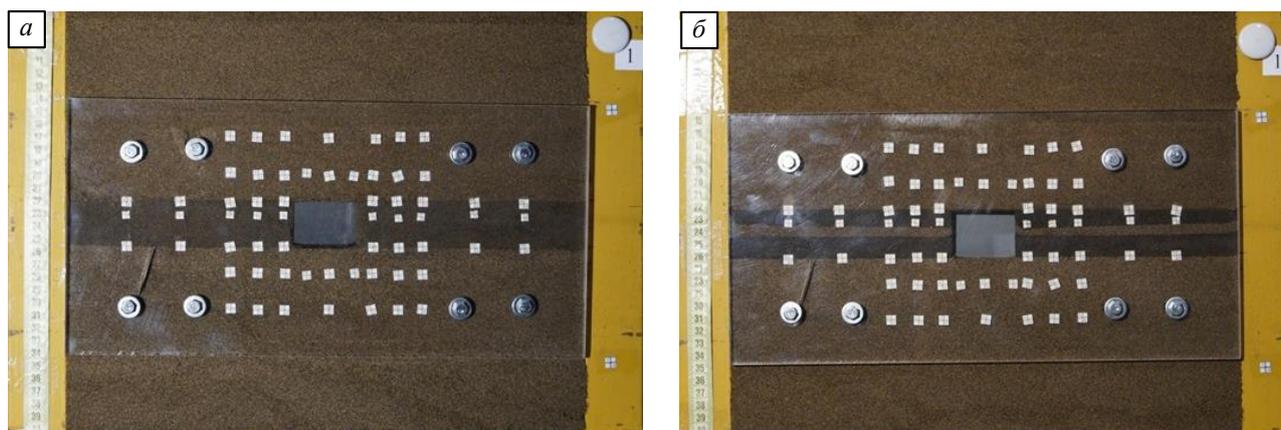


Рис. 3. Начало нагружения моделей 1 (а) и 2 (б)

По результатам исследования (табл. 1, 2) построены зависимости изменения вертикальных смещений кровли и почвы выработки от величины нагружения (рис. 4 – 7).

Установлено, что наличие породного прослойка с прочностью в три раза большей по сравнению с углем приводит к уменьшению смещений пород почвы в выработке на 30 %, а кровли – на 60 %.

Выводы. По результатам обработки фотоснимков установлено, что конструкция стенда, разработанная и реализованная методика физического моделирования позволяют выявлять закономерности распределения смещений при разных вариантах моделей, в том числе при однородном пласте и с включением в него по-

родного прослойка. Можно отметить следующее: при моделировании процессов деформирования пород в окрестности выработки с породным прослойком величины вертикальных смещений уменьшились по отношению к величине смещений, полученных при моделировании выработки без прослойка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование проявлений горного давления / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.И. Васильев и др. – Л.: Недра, 1968. – 279 с.
2. Риб С.В., Домрачев А.Н. Разработка алгоритма оценивания напряженно-деформированного состояния неоднородного угольного

целика с использованием двух- и трехмерной реализации метода конечных элементов. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды X Всероссий-

ской научно-практической конференции. / Под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 465 – 469.

Т а б л и ц а 1

Величины смещений в рядах кровли выработки (9) и почв выработки (4) при максимальном нагружении

Ряд	Смещения марок, мм, после максимального нагружения, при номере марки								
	9-2	9-3	9-4	9-*	9-5	9-**	9-6	9-7	9-8
Ряд 9	7,38	9,31	10,64	11,13	11,12	10,96	10,80	9,60	8,20
	2,44	3,90	5,00	5,45	5,51	5,30	4,96	3,87	3,05
Ряд 4	4-2	4-3	4-4	4-*	4-5	4-**	4-6	4-7	4-8
	5,07	3,65	2,41	2,08	2,20	2,25	2,67	3,97	4,61
	2,09	1,51	0,87	0,79	0,69	0,91	1,05	1,70	2,08

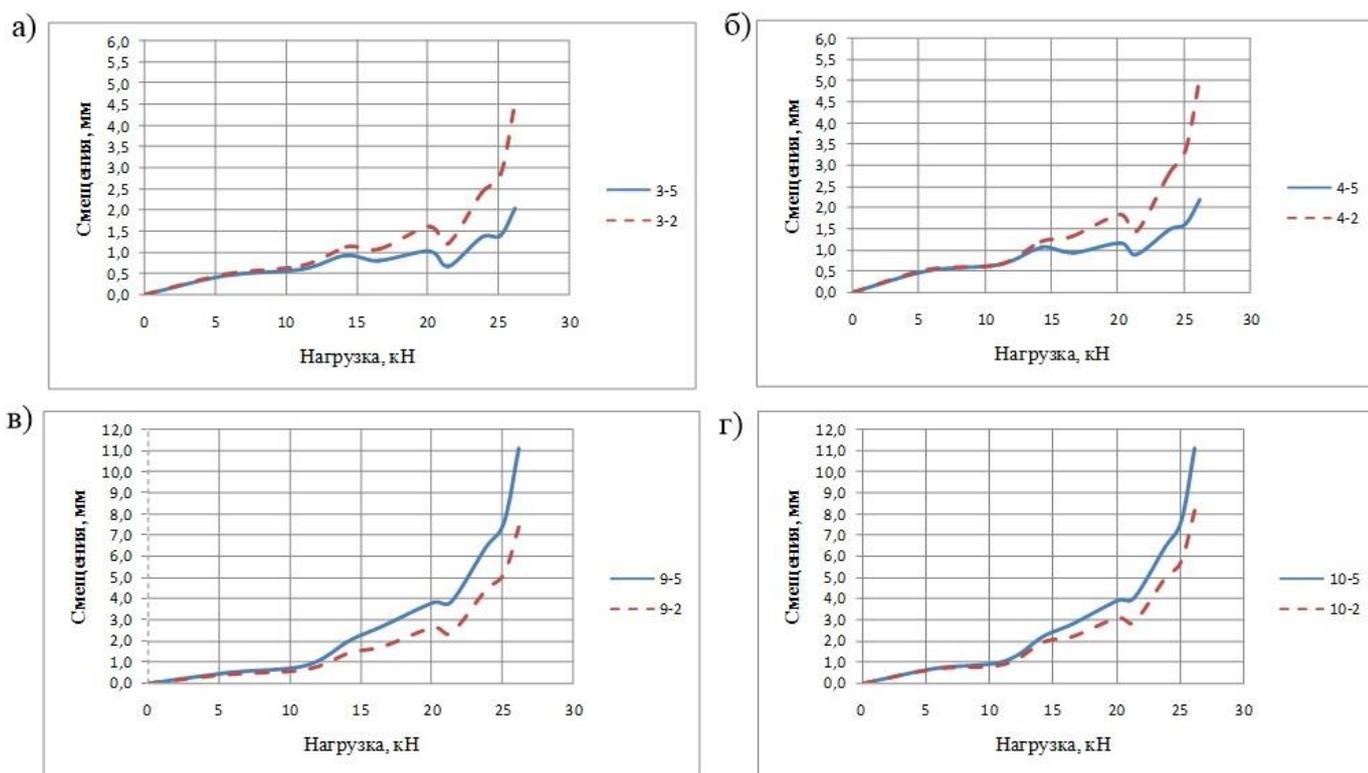


Рис. 4. Изменение вертикальных смещений от величины нагружения по маркам 2 и 5 в рядах 3, 4, 9, 10 (модель 1)

Результаты обработки фотоснимков

Модель	Ряд	Марка	Смещения марок, мм, при нагружении, кН									
			0	5,69	11,14	14,24	16,54	20,1	21,39	23,08	25,12	26,16
1	3	3-2	0	0,49	0,69	1,12	1,07	1,61	1,20	2,40	2,85	4,55
		3-5	0	0,45	0,61	0,92	0,80	1,03	0,67	1,36	1,40	2,05
	4	4-2	0	0,55	0,67	1,19	1,32	1,83	1,45	2,80	3,35	5,07
		4-5	0	0,52	0,67	1,06	0,93	1,16	0,89	1,48	1,61	2,20
	9	9-2	0	0,43	0,66	1,45	1,74	2,64	2,38	4,38	5,19	7,38
		9-5	0	0,52	0,85	2,04	2,71	3,82	3,86	6,4	7,61	11,12
	10	10-2	0	0,69	0,91	1,96	2,22	3,11	2,9	4,96	5,8	8,19
		10-5	0	0,71	1,05	2,23	2,81	3,92	4,04	6,41	7,68	11,11
2	3	3-2	0	0,32	0,03	0,57	0,85	1,15	1,04	1,28	1,53	1,91
		3-5	0	0,34	0,15	0,52	0,59	0,73	0,57	0,59	0,76	0,87
	4	4-2	0	0,36	0,03	0,63	0,87	1,21	1,08	1,30	1,56	2,09
		4-5	0	0,33	0,07	0,52	0,51	0,63	0,50	0,48	0,65	0,69
	9	9-2	0	0,38	0,02	0,67	0,99	1,51	1,39	1,68	1,9	2,44
		9-5	0	0,32	0,15	1,2	1,84	2,84	3,03	3,83	4,32	5,51
	10	10-2	0	0,4	0,2	0,89	1,31	1,86	1,92	2,27	2,49	3,03
		10-5	0	0,36	0,26	1,24	1,81	2,69	2,9	3,69	4,19	5,29

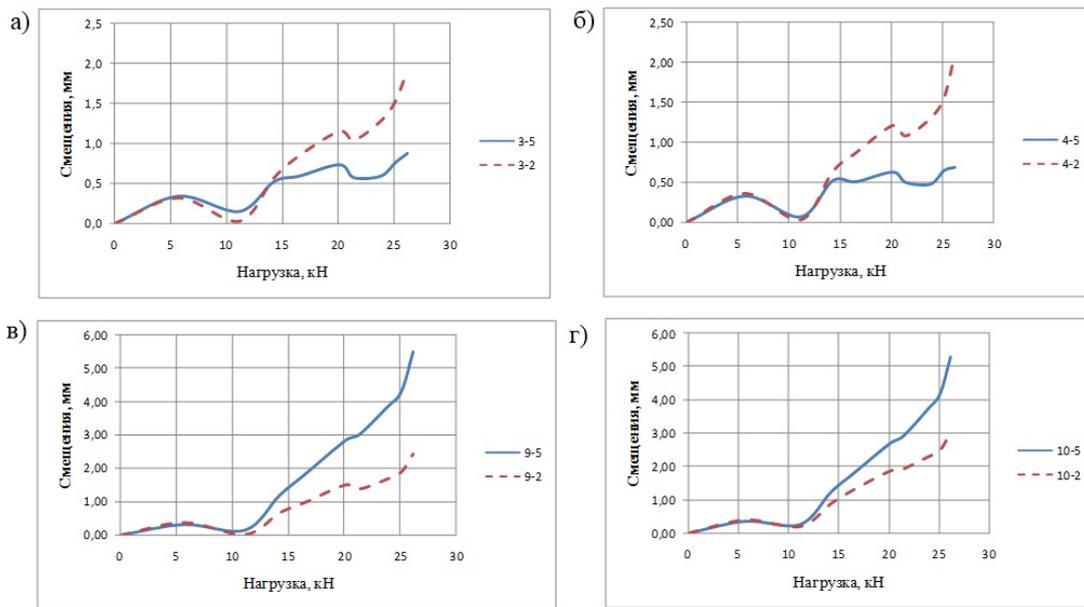


Рис. 5. Изменение вертикальных смещений в зависимости от величины нагружения по маркам 2 и 5 в рядах 3, 4, 9, 10 (модель 2)

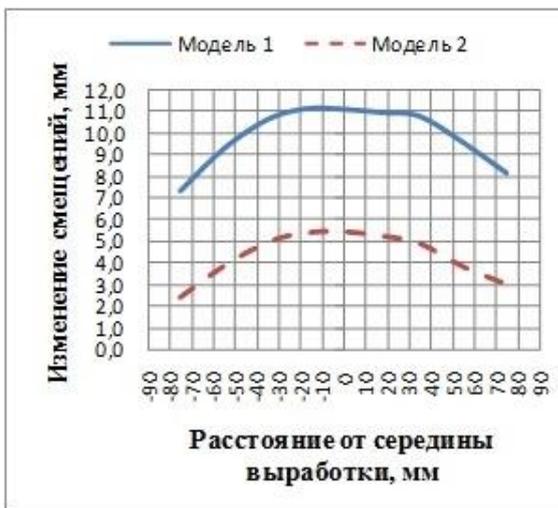


Рис. 6. Зависимости изменения смещений марок в ряду 9 кровли выработки:
 — модель 1; - - - - - модель 2



Рис. 7. Зависимости изменения смещений марок в ряду 4 почвы выработки:
 — модель 1; - - - - - модель 2

3. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. «Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга» / С.В. Риб, Д.М. Борзых, В.Н. Фрянов. Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, 2014. № 20629. Дата регистрации 09.12.2014.
4. Басов В.В., Риб С.В. Подбор эквивалентного материала для физического моделирования геомеханических процессов в окрестности подготовительных выработок угольных

шахт // Вестник СибГИУ. 2016. № 4 (18). С. 32 – 35.

5. Риб С.В. Лабораторный стенд для определения деформаций горных пород в окрестности выработки на пластах сложного строения. – В кн.: Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Вып. 3. / Под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. С. 155 – 157.

© 2017 г. С.В. Риб, В.В. Басов
 Поступила 16 ноября 2017 г.

УДК 621.01

А.С. Фомин, С.В. Киселев, А.В. Олексенко

Сибирский государственный индустриальный университет

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ЯНСЕНА*

В настоящее время одним из быстроразвивающихся направлений робототехники является разработка шагающих механизмов и роботов. Такие работы были начаты еще Леонардо да Винчи: в период 1495 – 1497 гг. он спроектировал и изготовил механическую лошадь, которая посредством установленных внутри ее каркаса механических передач могла совершать шагающие движения [1]. Далее в этом направлении важные результаты были получены П.Л. Чебышевым, в 1850 г. им разработана стопоходящая машина [2]. Позже, в 1893 г. Л.А. Рэгг разработал механическую лошадь, в которой в качестве приводов использованы педали так что, всадник мог управлять лошадью, сидя в седле. Движение педалей через рычаги и шестерни передавалось на ноги лошади, которые совершали стопоходящие движения [3]. Эта разработка была запатентована в США [4].

Во второй половине XX века Д. Шигли разработал несколько типов роботов, основанных на плоских механизмах [5]. После этого, в 1968 г. Р. Мошер (General Electric) разработал четырехногую шагающую машину под названием «General Electric Quadruped» [6]. В 1980 г. Ш. Хироуз и Й. Уметани разработали четырехногий шагающий робот, в котором ноги выполнены в виде механизма пантографа [7, 8]. Этот робот в 2008 г. был модернизирован и в настоящее время применяется в качестве машины для сверления отверстий с целью укрепления крутых склонов для предотвращения оползней. В 1990 г. голландский художник и скульптор Т. Янсен создал одноподвижный механизм, реализующий шагающее движение [9]. При объединении нескольких механизмов в единую конструкцию получают вполне работоспособные механизмы, которые под действием ветра самостоятельно передвигаются по горизонтальной поверхности. Сам Т. Янсен назвал эти конструкции «пляжными животными» (Strandbeest – перевод с нидерл.), так как они

способны передвигаться по песчаным пляжам под воздействием ветра. Из других типов шагающих механизмов стоит отметить системы, разработанные Джо Кланом в 1994 г. [10] и Аmandой Гассэ в 2011 г. [11] на основе плоских кинематических цепей.

В настоящей работе проведен структурный анализ механизма Янсена, а также определена траектория движения его выходного звена.

Структурный анализ механизма Янсена

Одним из преимуществ шагающих роботов, созданных на основе механизма Янсена, является возможность установки единственного привода, что позволяет иметь относительно небольшую массу конструкции при получении разных траекторий движения ноги робота. Для проведения структурного анализа механизма Янсена рассмотрим кинематическую схему (рис. 1).

Ведущее звено выполнено в виде кривошипа 1, передающего движение шатунам 2 и 3, которые, в свою очередь, соединены с трехпарным коромыслом 4 и выходным звеном 7; шатуны 5 и 6 установлены между звеньями 4 и 7. Все подвижные звенья механизма установлены на

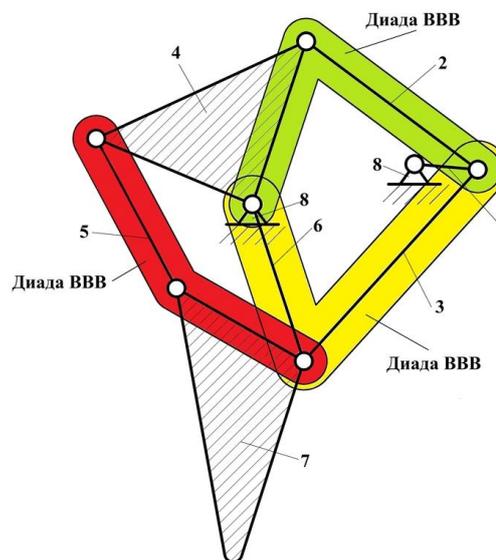


Рис. 1. Кинематическая схема механизма Янсена

* Работа выполнена в рамках стипендии Президента Российской Федерации (код проекта СП-3755.2016.1).

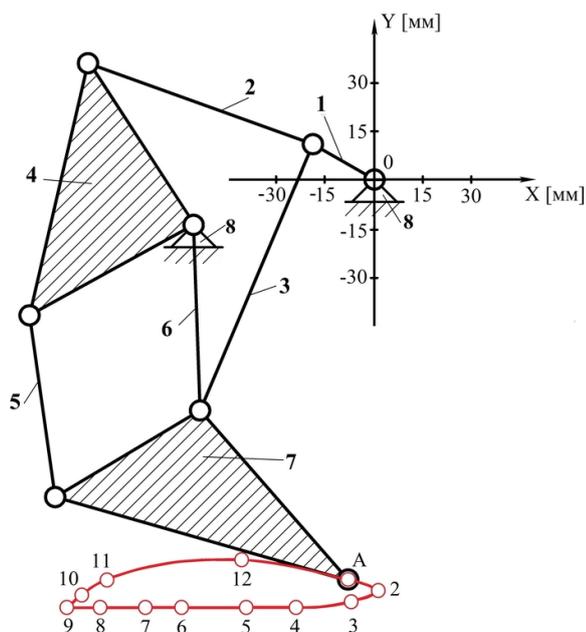


Рис. 2. Траектория движения выходного звена механизма Янсена (обозначения звеньев те же, что и на рис. 1)

неподвижном звене-стойке 8. Все звенья механизма соединяются между собой одноподвижными кинематическими парами пятого класса. В соответствии с формулой П.Л. Чебышева [12, 13] $W = 3n - 2p_5 - p_4$, (где W – подвижность механизма; n – количество подвижных звеньев; p – количество неподвижных пар). Подвижность W механизма при $n = 7$ и $p_5 = 10$ составляет 1. Такой результат гарантирует определенность движения всех звеньев системы при единственном входном движении.

Структурно механизм включает в свой состав ведущее звено, кривошип ($W = 1$) и три группы Ассур, выполненные в виде диад BBB , образованных звеньями 2 – 4, 3 – 6 и 5 – 7, для них $W = 0$. На схеме механизма (рис. 1) выделены указанные группы звеньев нулевой по-

движности. Таким образом, подвижность всего механизма может быть также определена путем сложения подвижностей всех кинематических цепей, входящих в состав механизма, и подвижности ведущего звена.

Анализ траектории движения выходного звена механизма

Обратимся к нахождению траектории движения выходного звена 7 механизма. Определим все положения точки A за полный поворот кривошипа 1. На рис. 2 показана траектория движения этой точки, построенная по 12 положениям, координаты которых приведены в таблице. Полученная траектория представляет собой плоскую кривую, в которой с 4 по 9 положения вертикальная координата y неизменна, то есть в этой области траектория представляет собой прямую линию. В положениях 3 и 10 есть незначительные вертикальные смещения. Это доказывает целесообразность применения этого механизма для создания шагающих систем. При изменении длин звеньев механизма могут быть уменьшены или увеличены как вертикальное, так и горизонтальное смещения выходного звена 7.

Выводы. В результате проведенного структурного анализа механизма Янсена были определены группы Ассур, входящие в его состав, а также общая подвижность механизма. Определена траектория движения выходного звена механизма, позволяющая определить его максимальные горизонтальное и вертикальное смещения. Полученные данные могут быть использованы при решении дальнейших задач кинематического и динамического анализа, а также при расчетах по оптимизации перемещения выходного звена механизма.

Координаты точки A выходного звена 7 механизма

Положение точки A	Координата, мм	
	x	y
1	-8,15	-124,53
2	1,00	-127,89
3	-7,00	-131,38
4	-24,26	-133,31
5	-39,76	-133,31
6	-59,74	-133,31
7	-70,91	-133,31
8	-85,13	-133,31
9	-95,43	-133,31
10	-93,25	-131,38
11	-82,93	-124,53
12	-41,04	-118,29

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rosheim M.E. In the footsteps of Leonardo // IEEE Robotics and Automation Magazine. 1997. Vol. 4. No. 2. P. 12 – 14.
2. M.H. Raibert. Legged robots // Communications of the ACM. 1986. Vol. 29(6). P. 499 – 514.
3. Song S.M., Waldron K.J. The machine that walk: the adaptive suspension vehicle. – MIT, Cambridge. 2003. – 327 p.
4. US Patent No. 491927. L.A. Rygg // Mechanical horse. 14.02.1893.
5. Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. Theory of Machines and Mechanisms, 4th ed. – Oxford University Press, 2011. – 928 p.
6. Kar D.C. Design of statically stable walking robot: a review // Journal of Field Robotics. 2003. Vol. 20. P. 671 – 686.
7. Hirose S., Kato K. Study on quadruped walking robot in Tokyo institute of technology - past, present and future. – In book: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2000. P. 414 – 419.
8. Hirose S. Super mechano-system: new perspective for versatile robotic system. Experimental robotics. VII. Editors: D. Rus, S. Singh. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. P. 249 – 258.
9. Komoda K., Wagatsuma H. A study of availability and extensibility of Theo Jansen mechanism toward climbing over bumps. – In book: The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2011. P. 3 – 28.
10. Kim H.G., Jung M.S., Shin J.K. Optimal design of Klann-linkage based walking mechanism for amphibious locomotion on water and ground // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2014. Vol. 20. Issue 9. P. 936 – 941.
11. Ghassaei A. The Design and Optimization of a Crank-Based Leg Mechanism. – PhD Thesis. 20 April 2011. 2011. – 168 p.
12. Дворников Л.Т. Основы всеобщей (универсальной) классификации механизмов // Теория механизмов и машин. 2011. Т. 9. № 2. С. 18 – 29.
13. Дворников Л.Т., Фомин А.С. Определение семейства механизмов по числу подвижных звеньев и кинематических пар. – В кн.: Машиностроение. Вып. 20. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. С. 52 – 59.

© 2017 г. А.С. Фомин, С.В. Киселев,
А.В. Олексенко

Поступила 17 ноября 2017 г.

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 697.1

И.В. Зоря, А.Д. Байдалин

Сибирский государственный индустриальный университет

ВОПРОСЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КУЗБАССА

В настоящее время актуальным является уменьшение потребления топлива, тепловой и электрической энергии за счет их наиболее полного и рационального использования во всех сферах деятельности. Решение вопросов использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) – один из главных приоритетов научно-технического поиска в разработке и внедрении современных энергосберегающих технологий.

Перед страной, как и перед всем миром, стоят новые вызовы. Этим и определяется необходимость модернизации экономики, ее инновационное развитие и обеспечение энергоэффективности. Нельзя забывать, что суть и направления модернизации определяются ее конечной целью, которой, при всей важности экономического роста, технического совершенства и конкурентоспособности, является улучшение условий жизни каждого человека уже сегодня и обеспечение благоприятных условий для будущих поколений.

Экономический рост зависит от увеличения загрязнения и деградации среды, истощения природных ресурсов, нарушения баланса биосферы, изменения климата. Все эти причины ведут к ухудшению здоровья человека и ограничивают возможности дальнейшего развития. Это означает, что решение крайне важной задачи повышения благосостояния населения не обеспечивает необходимого качества жизни.

Все вышесказанное определяет необходимость совместного решения вопросов энергосбережения и оптимизации различных выбросов в окружающую среду как по составу, так и по температуре. В рамках решения этой проблемы с целью энергосбережения при отоплении и вентиляции водогрейных котельных, предназначенных для отопления горных выработок, на шахтах Кузбасса разработана схема системы отопления с утилизацией теплоты дымовых газов.

В настоящее время для отопления горных выработок на шахтах Кузбасса используют

следующую схему: в котельных дымовые газы из топок котлов по газоходу поступают в воздухонагревательные установки (ВНУ), где отдают часть теплоты наружному воздуху, нагревая его от расчетной температуры $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ до средней температуры в $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от типа и производительности котлов), после этого дымовые газы выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу, а подогретый воздух поступает на отопление горных выработок. Тепло газов, удаляемых в дымовую трубу, для отопления самих котельных не используется.

В настоящей работе предлагается часть теплоты дымовых газов утилизировать для системы воздушного отопления котельной, для чего в газоходе устанавливается теплоутилизатор (рекуператор), по трубкам которого течет теплоноситель системы теплоснабжения отопительных агрегатов – вода, нагреваемая в теплоутилизаторе от 70 до $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетные условия).

Принципиальное значение имеет место установки теплоутилизатора системы воздушного отопления котельной в газовом тракте. При решении этого вопроса необходимо учитывать температуры дымовых газов после теплоутилизатора и после ВНУ. При установке теплоутилизатора между котлоагрегатом и ВНУ в зависимости от расхода теплоносителя системы теплоснабжения отопительных агрегатов и расхода дымовых газов возможно снижение температуры последних на выходе из теплоутилизатора до значения, достаточного для конденсации водяных паров на теплообменных поверхностях ВНУ, что недопустимо. При установке теплоутилизатора между ВНУ и дымовой трубой возможен аналогичный процесс в теплоутилизаторе.

При возникновении угрозы образования конденсата, приемлемой, на взгляд авторов, является схема, в которой теплоутилизатор установлен параллельно ВНУ. При этом опасности конденсации паров в следующем по хо-

ду движения дымовых газов теплообменном аппарате не возникает (см. рисунок).

При установке теплоутилизатора в газоходе перед ВНУ или параллельно ВНУ необходим расчет обоих теплообменников, так как при установке теплоутилизатора перед ВНУ уменьшается расчетная температура дымовых газов на входе в воздухонагреватель, а при параллельной установке снижается расчетный расход дымовых газов в ВНУ [1].

Конструктивные характеристики теплоутилизатора системы отопления определяются по площади (F) поверхности нагрева по известной формуле

$$F = \frac{Q}{K \Delta t},$$

где Q – количество теплоты, участвующее в теплообмене; K – коэффициент теплопередачи; Δt – температурный напор.

Значение Q , равное тепловой мощности системы отопления, забирающей теплоту дымовых газов, определяется по уравнению теплового баланса теплоутилизатора

$$Q = \varphi (I_p' - I_p'' + \Delta \alpha_p I_b),$$

где φ – коэффициент сохранения теплоты, зависящий от теплопотерь котлоагрегата в окружающую среду; I_p' и I_p'' – энтальпия дымовых газов на входе в теплоутилизатор и на выходе из него; I_b – энтальпия присасываемого в теплоутилизатор воздуха; $\Delta \alpha_p$ – присос воздуха в теплоутилизатор (присосы воздуха учитываются только в случае, когда теплоутилизатор находится на всасывающей стороне дымососа).

Из приведенного уравнения можно найти энтальпию и температуру дымовых газов на выходе из теплоутилизатора в случае, если он установлен в газоходе между котлоагрегатом и ВНУ. В случае установки теплоутилизатора между ВНУ и дымовой трубой или при параллельной установке температуру дымовых газов после него можно принять равной расчетной температуре уходящих газов.

Значение приведенного коэффициента K теплоутилизатора можно определить, пользуясь нормативным методом теплового расчета котельных агрегатов, разработанным ЦКТИ им. И.И. Ползунова и ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского. Для коридорных пучков стальных труб при сжигании твердого топлива, а также для шахматных и коридорных пучков стальных труб при сжигании газа (мазута) значение коэффициента K рассчитывается по формуле

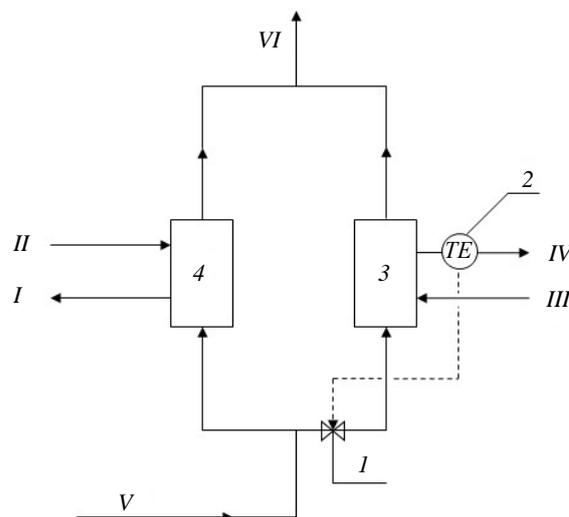


Схема утилизации дымовых газов от водогрейных котельных:

I – регулятор температуры; 2 – датчик температуры; 3 – теплоутилизатор; 4 – воздухонагревательные установки; I – подача нагретого воздуха с температурой $+70$ °С на воздушное отопление горных выработок; II – подача наружного воздуха с температурой -39 °С в воздухонагревательные установки; III – обратный трубопровод системы отопления котельной с температурой теплоносителя $+70$ °С; IV – подающий трубопровод системы отопления котельной с температурой теплоносителя $+95$ °С; V – выход дымовых газов после топок водогрейных котлов; VI – выброс дымовых газов через дымовую трубу

$$K = \psi \xi (\alpha_k + \alpha_n),$$

где ψ – коэффициент тепловой эффективности, зависит от вида топлива, сжигаемого в котле; ξ – коэффициент использования, учитывает уменьшение тепловосприятия поверхности нагрева вследствие неравномерного омывания ее дымовыми газами, частичного протекания дымовых газов мимо нее и образования застойных зон; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к поверхности нагрева; α_n – коэффициент теплоотдачи, учитывает передачу теплоты излучением в конвективных поверхностях нагрева.

Температурный напор Δt определяется для прямотока, перекрестного тока с числом ходов более четырех как среднелогарифмическая разность температур

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}},$$

где Δt_6 и Δt_m – большая и меньшая разности температуры дымовых газов и температуры нагреваемой жидкости в теплоутилизаторе.

Наибольшую трудность в расчете теплоутилизатора представляет собой определение

коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением. Коэффициент α_k зависит от скорости дымовых газов в теплоутилизаторе и направления их движения (продольное, поперечное омывание пучка), вида пучка труб (коридорный, шахматный), их диаметра, числа рядов труб по ходу дымовых газов, расстояния между трубами, геометрии поверхности труб (гладкая, рифленая и т.д.). Коэффициент α_n зависит от температуры дымовых газов, их запыленности и степени черноты, степени загрязнения стенок труб. Эти коэффициенты можно определить непосредственно экспериментальным путем или по эмпирическим зависимостям, приведенным в специальной литературе.

Внесение в предложенную схему элементов автоматизации позволит более рационально распределять греющий теплоноситель в виде дымовых газов между ВНУ и теплоутилизатором. Так как тепловая мощность системы отопления зависит от температуры наружного воздуха, то необходимо с помощью регулятора температуры 1 (см. рисунок) проводить регулирование расхода греющего теплоносителя через теплоутилизатор в зависимости от показаний датчика температуры 2, установленного на подающем трубопроводе системы отопления котельной.

Выводы. Результатом решения задачи утилизации теплоты дымовых газов для воздушного отопления котельных может стать разработка конкретных проектных решений для действующих котельных на шахтах Кузбасса. Использование тепловой энергии дымовых газов для отопления котельных позволит сэкономить только для одной котельной (строительный объем примерно 1500 м^3) за отопительный период 0,2 Гкал энергии или 29 т.у.т./год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зоря И.В., Чапаев Д.Б. Задача утилизации теплоты дымовых газов для отопления котельных. – В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Материалы Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. С. 255 – 257.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е перераб. и доп. – СПб: изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
3. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддтиса. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

© 2017 г. И.В. Зоря, А.Л. Байдалин
Поступила 25 октября 2017 г.

И.Н. Ганиев¹, У.Ш. Якубов¹, М.М. Сангов², А.Х. Хакимов³

¹Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан

²Таджикский государственный педагогический университет в Раштском районе

³Таджикский технический университет им. М.С. Осими

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА АЖ5К10, МОДИФИЦИРОВАННОГО СТРОНЦИЕМ, В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

Лигатуры алюминия со стронцием нашли широкое применение в литейном производстве для модифицирования структуры литейных алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов). Преимущества стронция как модификатора перед натрием заключаются в сохранении эффекта модифицирования в течение длительного времени и после многократных переплавов, тогда как сплавы, модифицированные натрием, сохраняют модифицированную структуру в течение 30 – 40 мин [1].

Целью работы является изучение модифицирующего влияния добавок стронция на анодное поведение сплава АЖ5К10. Этот сплав был синтезирован на основе некондиционного алюминия с содержанием 5 % (по массе) железа, который извлекался непосредственно из одного из электролизеров алюминиевой компании ГУП ТАЛКО. Далее металл подвергался легированию 10 %-ым кремнием для улучшения его литейно-технологических свойств и подвергался модифицированию лигатурой Al + 10 % Sr.

Таким образом, сплав АЖ5К10 по предварительным данным рассматривается как анодный материал для протекторной защиты стальных конструкций от коррозии, что может способствовать промышленному применению некондиционного алюминия, который в лучшем случае используется для раскисления и дегазации стали или же для разбавления сортового металла.

Согласно диаграмме состояния системы Al – Fe – Si, по последним данным, в равновесии с алюминиевым твердым раствором в этой системе находятся две тройные фазы Fe₂SiAl₈ (α) и FeSiAl₅ (β). Третья фаза FeSi₂Al₄ (γ) присутствует в сплавах, богатых кремнием, и четвертая фаза FeSiAl₃ (δ) кристаллизуется в сплавах, богатых железом и кремнием. При более высоком содержании железа и кремния имеет место кристаллизация многих других тройных фаз

(рис.1) [2]. Не рассматривая кристаллическую структуру тройных фаз в системе Al – Fe – Si, следует отметить, что с алюминиевым твердым раствором в равновесии находятся тройные фазы Fe₂SiAl₈ (α) и FeSiAl₅ (β) (рис. 1). Изучаемый сплав по химическому составу располагается внутри тройной области α – Al + Si + FeSiAl₅. Установлено, что фаза FeSiAl₅ (25,6 % Fe и 12,8 % Si) кристаллизуется в виде китайских иероглифов или виде пластин. Ее область гомогенности находится в пределах 25 – 30 % Fe и 12 – 15 % Si. Фаза FeSiAl₅ имеет моноклинную решетку с параметрами $a = b = 6,12 \text{ \AA}$ и $c = 41,5 \text{ \AA}$; $\alpha = 91^\circ$; $\delta = 3,3 \div 3,35 \text{ г/см}^3$; твердость $HV = 5800 \text{ МН/м}^2$ [2].

Согласно проекции поверхности ликвидуса системы Al – Fe – Si в области до 6 % Fe и 12 % Si имеются пять областей первичной кристаллизации: α-твердый раствор на основе алюминия, FeAl₃, тройные фазы Fe₂SiAl₈, FeSiAl₅. Выбранный нами сплав АЖ5К10 имеет температуру плавления 727 °С по данным работы [2] и 670 °С по данным работы [3] и попадает в область первичной кристаллизации Fe₂SiAl₈. Имеет место протекание двух перитектических реакций: $\text{Ж} + \text{FeAl}_3 = \alpha - \text{Al} + \text{Fe}_2\text{SiAl}_8$ при 630 °С и $\text{Ж} + \text{Fe}_2\text{SiAl}_8 = \alpha - \text{Al} + \text{FeSiAl}_5$ при 612 °С. В точке тройной эвтектики завершается кристаллизация сплава АЖ5К10 по реакции $\text{Ж} = \alpha - \text{Al} + \text{Si} + \text{FeSiAl}_5$ при 576 °С.

Сплавы со стронцием получали в шахтной лабораторной печи СШОЛ при температуре 850 °С путем добавления лигатуры алюминия с 10 % стронция к сплаву АЖ5К10. Из полученных сплавов в металлический кокиль отливали цилиндрические стержни диам. 10 и длиной 140 мм для исследования электрохимических свойств, торцевая часть которых служила рабочим электродом. Контроль состава сплавов проводили взвешиванием шихты и полученных сплавов. Исследованию подвергались сплавы, масса которых отличалась от массы шихты не более чем на 1 % (отн.).

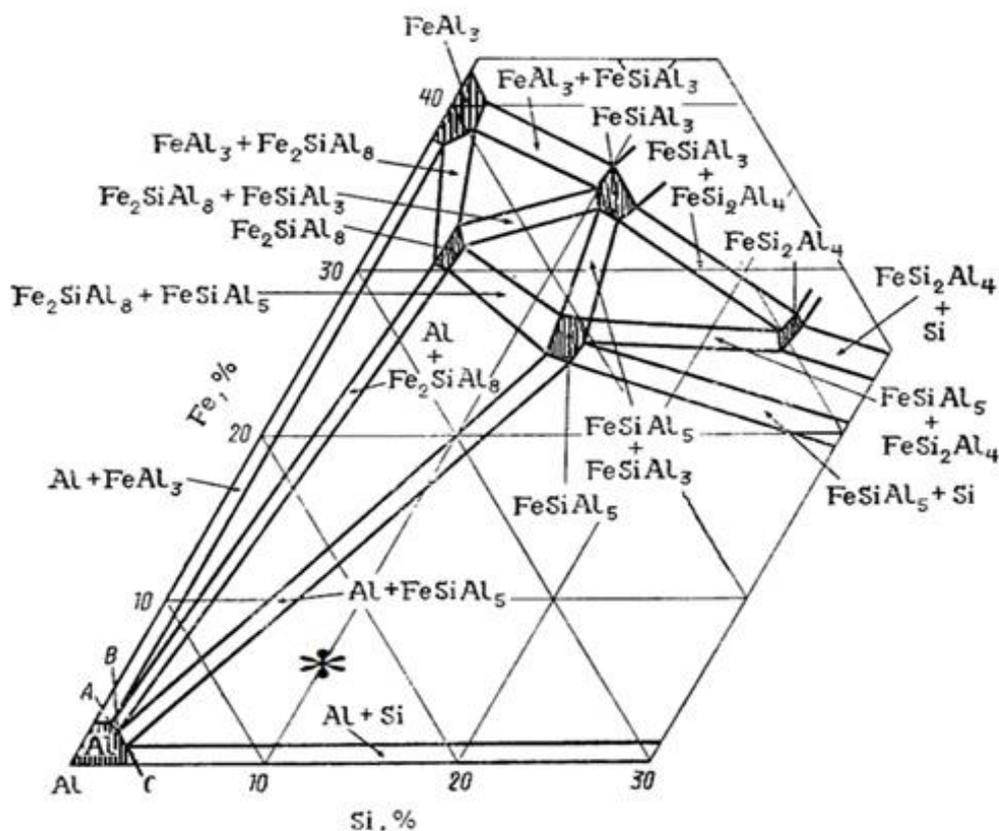


Рис. 1. Фазовое равновесие в алюминиевом угле системы Al – Fe – Si. Звездочкой отмечен фазовый и химический составы (% по массе) сплава АЖ5К10 на диаграмме

Образцы сплавов зачищали наждачной бумагой, последовательно переходя от крупной к мелкой (№ 2 – 00), а затем промывали дистиллированной водой, полировали на влажной фильтрованной бумаге и сушили на воздухе. Режим подготовки рабочей поверхности выбрали на основании серии предварительных экспериментов на чистых металлах исходя из соображений наилучшей воспроизводимости результатов.

Исследования проводили согласно рекомендациям ГОСТ 9.017 – 74 в среде электролита NaCl (заменителя морской воды) с целью определения влияния хлорид-иона на коррозионно-электрохимическое поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием.

Электрохимические исследования полученных сплавов проводили на потенциостате ПИ-50-1.1 с программатором ПР-8 и самозаписью на ЛКД-4. Температуру раствора поддерживали постоянной на уровне 20 °С с помощью термостата МЛШ-8. Воспроизводимость результатов на электродах одного и того же состава была в пределах ±10 мВ. Измерения осуществляли в условиях естественной конвекции электролита в воздушной атмосфере. Исследования проводили по методикам, описанным в работах [4 – 10].

Для электрохимических исследований образцы поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении их в исследуемый раствор ($E_{св.кор}$ – потенциал свободной коррозии, или стационарный), до значения потенциала, при котором происходит резкое возрастание плотности тока (рис. 2, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рис. 2, кривые II и III) до значения потенциала –1,2 В, в результате чего происходило растворение пленки оксида. Наконец, образцы повторно поляризовали в положительном направлении (рис. 2, кривая IV), при этом при переходе от катодного к анодному ходу фиксировался потенциал начала пассивации ($E_{н.п}$). По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

$E_{ст}$, или $E_{св.к}$ – стационарный потенциал, или потенциал свободной коррозии;

$E_{рп}$ – потенциал репассивации, определяемый графическим способом как первый изгиб на обратном ходе анодной кривой;

$E'_{по}$ – потенциал питтингообразования (или потенциал пробоя) до катодной поляризации;

$E_{по}$ – потенциал питтингообразования после катодной поляризации;

$E_{кор}$ – потенциал коррозии;

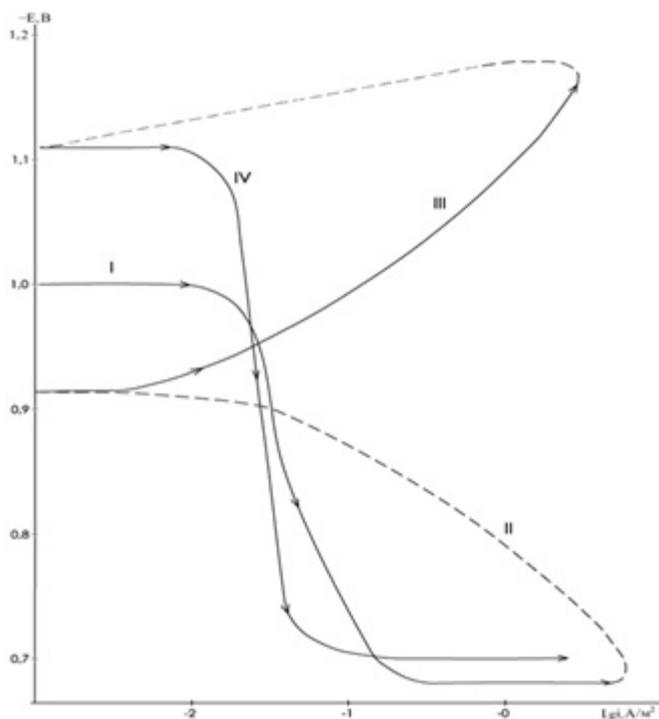


Рис. 2. Полная поляризационная (2 мВ/с) кривая сплава АЖ5К10 в среде электролита 3 %-го NaCl

$E_{н.п}$ – потенциал начала пассивации;
 $E_{п.п}$ – потенциал полной пассивации;
 $i_{кор}$ – плотность тока коррозии.

На основании этих параметров рассчитывали следующие величины:

$\Delta E_{пас}$ – ширина пассивной области, $\Delta E_{пас} = E_{п.п} - E'_{по}$;

$\Delta E_{по}$ – характеристика питтингостойкости, $\Delta E_{по} = E_{по} - E_{св.к.}$

Основной показатель коррозионной стойкости – скорость коррозии (K) сплавов – рассчитывался по формуле $K = i_{кор}k$, где $k = 0,335$ г/(А·ч) для алюминия [11 – 15].

Как видно из рис. 3, модифицирование стронцием способствует смещению потенциала свободной коррозии исходного сплава АЖ5К10 в положительную область. Такая тенденция имеет место во всех трех изученных средах электролита NaCl. Чем больше добавки модифицирующего элемента (стронция), тем положительнее потенциал свободной коррозии ($E_{св.кор}$).

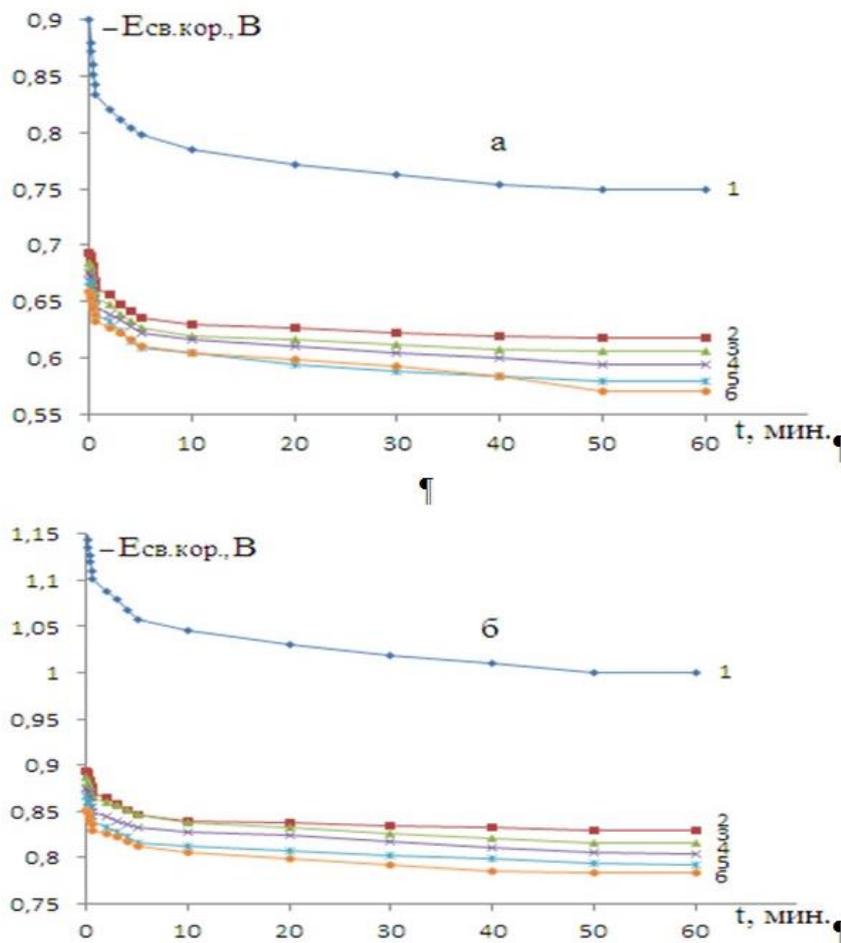


Рис. 3. Изменение потенциала свободной коррозии (х.с.э.) сплава АЖ5К10 (1), содержащего стронций, % (по массе): 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5), 1,0(6), в среде электролита 0,03 % (а) и 3 %-го (б) NaCl

**Коррозионно-электрохимические характеристики сплава АЖ5К10,
модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl**

Среда NaCl, % (по массе)	Sr, % (по массе)	Электрохимические потенциалы (х.с.э.), В				Скорость коррозии	
		$-E_{св.к.}$	$-E_{кор}$	$-E_{п.о}$	$-E_{рп}$	$i_{кор} \cdot 10^{-2}, \text{А/м}^2$	$K \cdot 10^{-2}, \text{г/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})}$
0,03	–	0,750	0,994	0,645	0,738	3,7	12,39
	0,01	0,618	0,958	0,486	0,518	3,5	11,72
	0,05	0,606	0,946	0,478	0,507	3,3	11,05
	0,10	0,594	0,934	0,468	0,499	3,0	10,05
	0,50	0,580	0,920	0,456	0,482	2,8	9,38
	1,00	0,570	0,908	0,444	0,464	2,6	8,71
0,30	–	0,950	1,060	0,660	0,780	4,6	15,42
	0,01	0,764	0,984	0,558	0,640	4,4	14,74
	0,05	0,758	0,978	0,544	0,632	4,2	14,07
	0,10	0,752	0,962	0,532	0,620	3,9	13,06
	0,50	0,746	0,946	0,524	0,610	3,7	12,39
	1,00	0,738	0,932	0,512	0,588	3,4	11,30
3,00	–	1,000	1,110	0,700	0,900	5,8	19,43
	0,01	0,830	1,008	0,620	0,696	5,6	18,76
	0,05	0,816	0,996	0,606	0,690	5,3	17,76
	0,10	0,804	0,980	0,592	0,680	5,0	16,75
	0,50	0,792	0,968	0,584	0,666	4,8	16,08
	1,00	0,784	0,952	0,572	0,646	4,6	15,41

Судя по значениям потенциала свободной коррозии в зависимости от времени выдержки в среде электролита NaCl, следует отметить, что в целом динамика формирования защитного оксидного слоя завершается к 40 – 50 мин. Из таблицы следует, что с ростом концентрации хлорид-иона имеет место смещение потенциала свободной коррозии в отрицательную область значений. При этом потенциалы питтингообразования и репассивации имеют тенденцию к смещению в положительную область значений.

Скорость коррозии как основной электрохимический показатель коррозии сплавов в зависимости от содержания стронция уменьшается во всех исследованных средах электролита NaCl, а от концентрации хлорид-иона растет (см. таблицу).

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов системы АЖ5К10 – стронций представлены на рис. 4. Кривые, относящиеся к сплавам, модифицированным стронцием, располагаются левее кривых исходного сплава АЖ5К10 во всех исследованных средах. Это свидетельствует о снижении скорости анодной коррозии сплавов при модифицировании их стронцием.

Можно сделать следующие выводы.

Применение алюминиевых сплавов как конструкционных материалов во многом обусловлено их стойкостью против коррозии и как анодных материалов с отрицательным рабо-

чим потенциалом по отношению к железу и его сплавов.

Сплавы алюминия относятся к материалам с большой химической активностью, которые легко вступают в соединение с кислородом. В результате такого процесса на их поверхности мгновенно образуются тонкие оксидные пленки, толщина которых в естественных условиях достигает 0,01 – 0,02 мкм и может быть увеличена путем химического или анодного оксидирования до 5 или 50 мкм соответственно.

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов в различных агрессивных средах во многом зависит от стойкости в этих средах оксидной пленки, а также от химического состава сплава, вида термической обработки поверхности детали. Известно, что на коррозионную стойкость алюминиево-кремниевых сплавов отрицательно влияют добавки железа, никеля, олова, свинца и других примесей [16].

Исследованный нами базовый сплав АЖ5К10 согласно рис. 1 характеризуется следующим фазовым составом: α – алюминиевый твердый раствор + выделение фазы FeSiAl_5 + двойной эвтектики $\alpha - \text{Al} + \text{Si}$, а также тройная эвтектика $\alpha - \text{Al} + \text{Si} + \text{FeSiAl}_5$. Коррозионная стойкость сплава такого фазового состава определяется не только его химическим составом, но характером кристаллизации указанных фаз, т.е формой их выделения. Как известно, модификацией (измельчением) двойной и тройной эвтектик в структуре сплава можно значительно изменить как механические свой

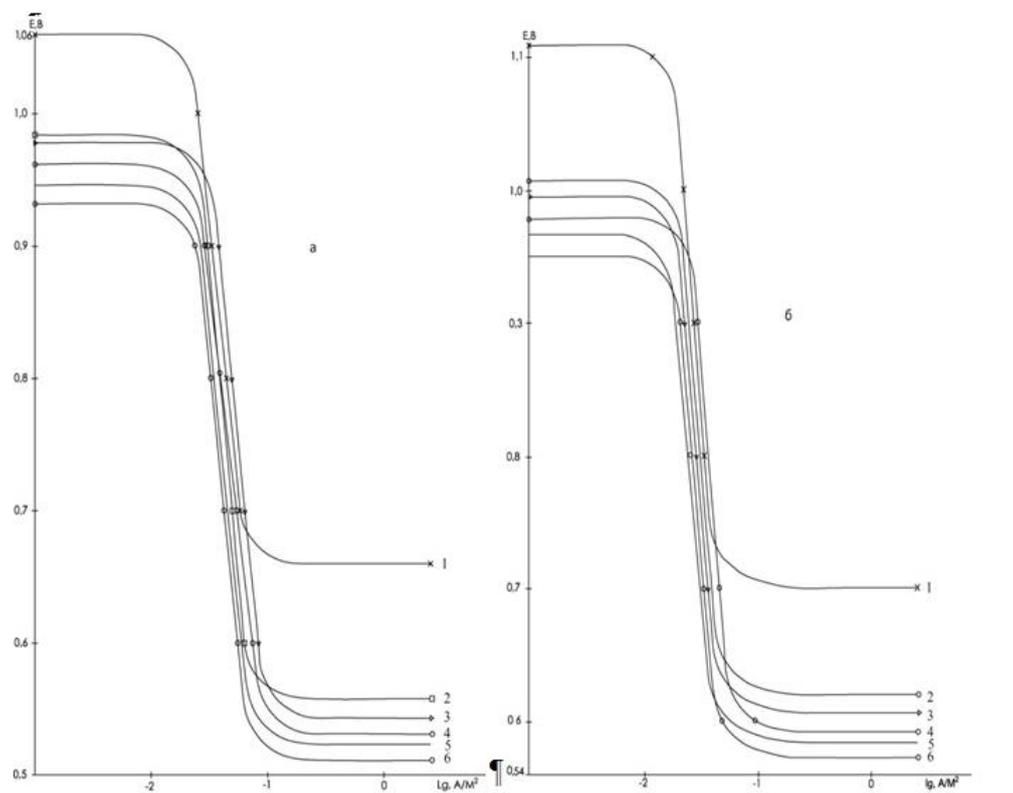


Рис. 4. Потенциодинамические (2 мВ/с) анодные поляризационные кривые сплава АЖ5К10 (I), содержащего стронций, % (по массе): 0,01(2), 0,05(3), 0,1(4), 0,5(5), 1,0(6), в среде электролита 0,3 % (а) и 3 %-го (б) NaCl

ства, так и коррозионную стойкость. Модифицирование сплава АЖ5К10 стронцием позволило на 70 – 80 % повысить коррозионную устойчивость (см. таблицу), что объясняется его модифицирующим действием на микроструктуру алюминиево-кремниевой эвтектики. При этом происходит сильное измельчение частиц кремния в эвтектиках и их сфероидизация, которые в последующем вызывают улучшение физико-химических свойств исходного сплава АЖ5К10 [17].

Повышение качества алюминиевых протекторов неразрывно связано с разработкой новых марок литейных сплавов и прогрессивных технологических процессов плавки и литья, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей производства и применение литых протекторов. Качество протекторов зависит также от химического состава и структуры литого металла. Модифицирование сплава АЖ5К10 стронцием измельчает структуру сплава и обеспечивает равномерность фазового состава по объему литого протектора.

Известно, что чем больше разность потенциала между защищаемой металлической конструкцией и рабочим потенциалом протектора, тем выше степень защиты от коррозии. В среде электролита 3 %-го NaCl потенциал свободной коррозии сплава АЖ5К10 со стронцием

колеблется от 1,0 до 0,784 В, что в паре с железом (сталью), потенциал которого 0,440 В, вполне может обеспечить надежную защиту стальных конструкций, так как разница потенциалов составляет 0,350 – 0,560 В.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модифицирование силуминов стронцием / И.Н. Ганиев, П.А. Пархутик, А.В. Вахобов, И.Ю. Куприянова. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
3. Дриц М.Е. Алюминиевые сплавы. Свойства, обработка, применение. – М.: Металлургия, 1979. – 679 с.
4. Красноярский В.В., Сайдалиев Н.Р. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах // Защита от коррозии и окружающей среды. 1991. Вып. 3. С. 14 – 19.
5. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И., Irene Calliari. Потенциодинамическое исследование сплава Al+6%Li с иттрием в среде электролита NaCl // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 95 – 100.

6. Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джураева М.Ш. Сравнительное исследование анодного поведения сплава АЖ2,18, модифицированного литием, бериллием и магнием, в среде электролита NaCl // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 45 – 53.
7. Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. Потенциодинамическое исследование сплава АЖ 4.5, легированного свинцом, в среде электролита NaCl // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 2 (45). С. 64 – 68.
8. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И., Igene Calliari. Влияние лантана на анодное поведение сплава Al + 6 % Li // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 1 (44). С. 49 – 53.
9. Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. Стационарные потенциалы и анодное поведение сплава АЖ 4.5, легированного висмутом // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 38. С. 8 – 12.
10. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И. Влияние празеодима на анодное поведение сплава Al + 6 % Li в нейтральной среде // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 38. С. 3 – 7.
11. Джайлоев Дж. Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. Анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe, легированного кальцием, в среде электролита NaCl // Изв. вуз. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 12. С. 38 – 42.
12. Обидов З.Р., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б. Коррозионно-электрохимические и физико-химические свойства сплава Al + 2,18 % Fe, легированного индием // Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83. № 2. С. 264 – 267.
13. Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Анодное поведение и окисление сплава Al + 2,18 % Fe, легированного таллием // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. № 11. С. 1781 – 1784.
14. Обидов З.Р., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Ганиева Н.И. Коррозия сплава Al + 2,18 % Fe, легированного галлием // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47. № 5. С. 541 – 544.
15. Амонов И.Т., Обидов З.Р., Ганиев И.Н. Сплавы алюминия с железом, РЗМ и элементами подгруппы галлия. – Издательский дом. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 256 с.
16. Постников Н.С. Коррозионностойкие алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1976. – 301 с.
17. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. – М.: Металлургия. 1977. – 272 с.

© 2017 г. И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов,
М.М. Сангов, А.Х. Хахимов
Поступила 4 ноября 2017 г.

ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕДАГОГИКА

УДК 378.31:005.591.6

*Е.В. Протопопов, А.В. Феоктистов, М.В. Темлянец,
О.В. Гордеева, М.Б. Васильева*

Сибирский государственный индустриальный университет

ПРОЕКТНОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИНТЕГРАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВО РЕГИОНА (ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТНОГО ОБУЧЕНИЯ В СИБГИУ)

Оценка роли высшей школы требует поиска качественно новых параметров в характеристике ее образовательного пространства, в том числе устанавливающих соответствие используемых образовательных технологий вызовам инновационного, технологического и социального развития регионов и России в целом. Очевидно, что эффективность образовательной модели вуза заключается в повышении уровня подготовки выпускника, способного успешно выполнять профессиональные задачи в условиях социально-экономических и политических преобразований [1].

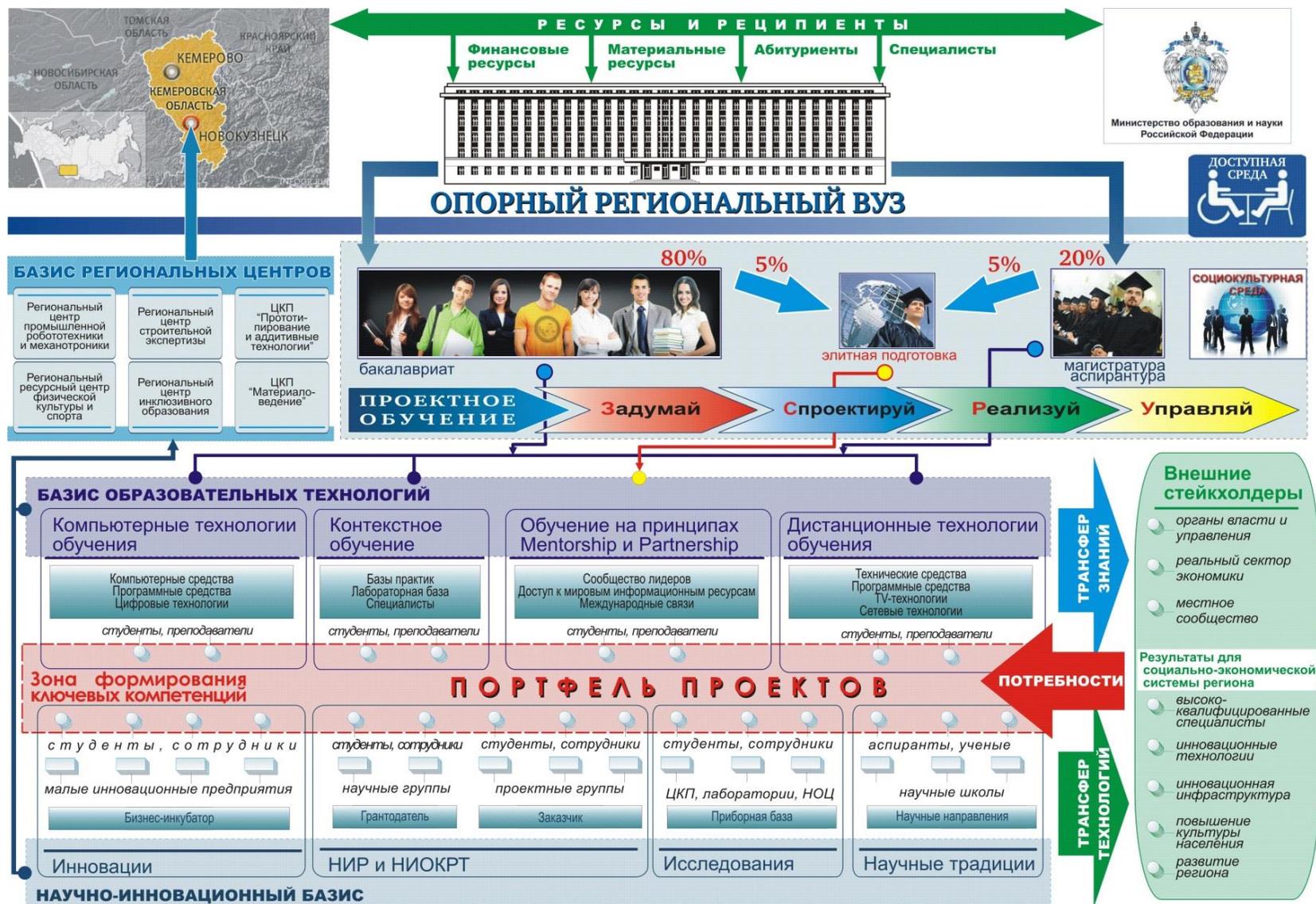
Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ) целенаправленно разрабатывает и реализует идею образовательного интегратора инновационного развития Сибирского региона, что требует решения комплекса задач: во-первых, направленных на научно-технологическое развитие вуза; во-вторых, обеспечивающих устойчивое взаимодействие вуза с органами власти, кластерами, промышленностью региона; в-третьих, позволяющих внедрить в учебный процесс современные образовательные технологии. С учетом поставленных задач по итогам Методического совета СибГИУ в январе 2016 г. было принято решение о новом подходе в организации образовательного процесса. Технологической основой для формирования образовательной модели вуза – вуза как центра создания инноваций – была выбрана технология проектного обучения.

Отмечая инновационный характер технологии проектного обучения, необходимо уточнить, что сами идеи проектного обучения не отличаются новизной и оригинальностью, поскольку уже давно получили полное всестороннее описание в научной литературе, а содержание и формы данной технологии были многократно апробированы и оценены с точки зрения педагогических условий реализации [2

– 4]. Вместе с тем вопросы применения технологии проектного обучения как средства для инновационных преобразований образовательного процесса не стали предметом отдельных педагогических исследований, и сам инструментарий по ее использованию с учетом требований федеральных государственных образовательных стандартов в настоящее время не охарактеризован. Более того, установлено, что «образовательная технология как система может иметь различные состояния, когда значения ее параметров могут существенно меняться в зависимости от цели и условий применения» [5], при этом «под влиянием различных условий любая смоделированная образовательная технология из всех возможных своих состояний практически может принимать их ограниченное число для успешного выполнения именно своих функций, это ограничение связано с главным ее предназначением» [5].

Следовательно, модель проектного обучения как совокупность логически выстроенных этапов формирования компетенций применительно к отдельной основной образовательной программе или группе основных образовательных программ в многопрофильном вузе в полной мере можно считать инновационной.

Процесс внедрения проектного обучения в СибГИУ потребовал предварительного этапа, на котором проводились методические советы, обсуждалась концепция проектно-ориентированной образовательной деятельности (см. рисунок). В ходе дискуссий определялись особенности сложившейся образовательной среды университета как фактора, стимулирующего инновационные преобразования [5]: уточнялась роль проектных технологий в профессиональной подготовке обучающегося, обосновывались возможность и эффективность их использования в СибГИУ, выявляя



Концепция проектно-ориентированной образовательной деятельности СибГИУ

лись критерии оценки результатов проектной деятельности, разрабатывались отдельные элементы основных образовательных программ, направленных на реализацию новой технологии.

В феврале 2016 г. на базе СибГИУ был проведен форум работодателей юга Кузбасса, по итогам которого определились требования работодателей к качеству подготовки выпускников вуза в аспекте образовательных возможностей технологии проектной деятельности.

В результате данного этапа определились условия для внедрения проектного обучения в СибГИУ, при выборе которых учитывались следующие инновационные идеи:

1. Проектное обучение расширяет и трансформирует сферы ответственности университета, что способствует эффективному решению ключевых задач развития регионального университета [6]. Данная образовательная технология является тем механизмом, который обеспечивает интеграцию образовательной деятельности СибГИУ в экономику и социальную сферу региона.

2. Проектное обучение создает интерактивную образовательную среду, ведущим элементом которой является имитационное проигрывание различных ситуаций, форм и образцов профессиональной деятельности. Такие формы способствуют профессиональному становлению и профессиональному самоопределению обучающихся, что повышает качество его подготовки [7].

3. Технология проектного обучения позволяет разработать качественно новую структурно-функциональную модель формирования компетенций обучающихся многопрофильного вуза.

4. Подготовка новых учебно-методических продуктов как результатов внедрения инновационной образовательной технологии дает возможность для улучшения образовательного процесса в СибГИУ. Практический опыт преподавателей по внедрению образовательных инноваций создает предпосылки для инициации других педагогических инноваций.

Рассмотрим особенности каждой из представленной инновационной позиции.

Как показывает практика реализации требований образовательных стандартов, сегодня назрела необходимость в трансформации сфер ответственности университета. Внедрение проектной деятельности дает возможность вывести СибГИУ на принципиально новые позиции на рынке образовательных услуг, в том числе на позицию центральной дискуссионной площадки, фокусирующей обсуждение и генерирование решений ключевых проблем

развития города и региона. Иначе говоря, проектная деятельность как образовательная технология выступает инструментом для позиционирования СибГИУ как регионального многопрофильного вуза, на базе которого формируются точки роста и условия эволюционного развития экономики, социума и культурной среды Кузбасса. Очевидно, использование технологии проектного обучения преобразует СибГИУ в инновационную площадку для аккумуляции профессионально-ориентированных проектов, что обеспечивает:

- вовлеченность профессорско-преподавательского коллектива в решение насущных проблем региональной экономики;
- популяризацию научных разработок вуза и позиционирование университета как сообщества востребованных социумом экспертов;
- информационную открытость вуза, укрепление связей между университетом и работодателями.

Перечислим ожидаемые результаты с точки зрения перспектив развития СибГИУ как регионального университета.

1. Формирование центра притяжения талантливой молодежи и генерация лидеров изменения экосреды региона на основе создания территории опережающего развития молодежного творчества.

2. Развитие системы непрерывного образования на основе реализации проектно-ориентированных образовательных программ для всех категорий населения региона.

3. Развитие университета как центра сетевой структуры комплексной интеграции наукоемких и межотраслевых инноваций.

4. Проектирование позитивного имиджа университета в региональном социуме и расширение территории и сфер его влияния.

5. Модернизация системы управления университетом на основе инновационных методов и инструментов кластерного и отраслевого развития.

Другой не менее важный эффект проектного обучения заключается в создании условий для профессионального становления и профессионального самоопределения обучающегося вуза. Проблема профессионального становления выпускника вуза решается в русле задач, направленных на построение контекстного профессионального образования, то есть образования, ориентированного не на передачу готовых знаний, а на обучение находить эти знания и применять их в случаях, имитирующих реальные профессиональные ситуации. Основная цель обновления профессионального образования заключается в том, чтобы найти

пути формирования у будущего специалиста деятельностной позиции [8].

Проектное обучение как личностно-ориентированная технология способствует процессу профессионального становления и активизирует профессиональное самоопределение обучающегося. Подтвердить сказанное позволяет сама специфика процесса профессионального становления: его принято рассматривать через интеграцию познавательных и профессиональных мотивов. Данный процесс предполагает определенные этапы, стадии, каждая из которых характеризуется специфическими психофизиологическими и социально-психологическими особенностями, обеспечивающими успешное осуществление профессиональной деятельности.

В контексте образовательной среды вуза проектная деятельность формирует профессиональную мотивацию личности, то есть стимулирует потребности, отношения, интересы и побуждает личность к изучению и освоению будущей профессиональной деятельности. Наряду с научной (познавательной) стороной решения проектного задания всегда присутствуют эмоционально-ценностная (личностная) и творческая стороны. Именно эмоционально-ценностный и творческий компоненты проектной деятельности определяют, насколько значим для обучающегося результат и каковы возможности в его достижении.

Управление обучением через проектную деятельность позволяет преобразовать учебную ситуацию в ситуацию личностного развития обучающегося. При этом учебный проект выступает в качестве средства профессионально-личностного развития, а проектная деятельность способствует приобретению личностного опыта и соответствующих профессиональных компетенций. Проектное обучение является механизмом, регулирующим профессиональную направленность обучающегося, так как способствует становлению и развитию профессионального самосознания, проявлению у обучающегося чувства причастности к определенной профессии, стремления к повышению профессиональной компетентности, формированию особой системы профессиональных ценностей. Благодаря новизне, реалистичности, жизнеспособности, а также возможности для оценки поставленных целей со стороны профессионального сообщества проектно-му обучению присваивается статус педагогической категории, работающей на формирование профессиональной компетентности специалиста технического профиля [9].

Проектность образования направлена на формирование проектной культуры обучающихся, то есть профессионально значимого качества специалиста, включающее ценностное отношение к проектной деятельности, владение проектными знаниями и умениями на индивидуально-творческом уровне, стремление к преобразованию действительности и совершенствованию своих проектных способностей [10, 11].

Следовательно, выполнение учебных проектов наполняет профессиональным смыслом процесс обучения в вузе, помогает познавать будущую профессиональную сферу деятельности в целостности, в динамике, тем самым формирует готовность к будущей профессиональной деятельности.

Согласно третьей инновационной идее по реализации проектного обучения, данная технология позволяет разработать качественно новую структурно-функциональную модель формирования компетенций обучающихся многопрофильного вуза. Она преобразует процесс обучения в процесс управления деятельностью по приобретению (формированию) компетенций. В этом аспекте преимущества проектного обучения как модели реализации компетентностного подхода очевидны:

1. Делает главным системообразующим фактором учебной деятельности не столько компонент получения знаний, сколько компонент приобретения различных способов деятельности для решения поставленных образовательных задач.

2. Направлена на организацию мотивированной самостоятельной деятельности обучающихся, основной целью которой является решение проблемы (теоретической или практической), полученное в форме продукта. Ожидаемым конечным результатом такой модернизации образовательного процесса является высокая самостоятельность будущих выпускников, умение организовать собственную профессиональную деятельность и искать новые инструменты для реализации профессиональных возможностей.

3. Является личностно-деятельностной технологией, поскольку включает обучающихся в творческую учебно-познавательную деятельность как субъектов своего личностного и профессионального развития.

4. Имитирует индивидуальную или коллективную профессиональную деятельность. Эффективность в формировании компетенций достигается за счет приближения учебного процесса к практической профессиональной деятельности. Основной образовательный ре-

зультат, который получает обучающийся в ходе проектной деятельности, – это приобретение, закрепление или развитие практически значимых знаний и умений (компетенций), необходимых в выбранной профессиональной деятельности, и опыт самоорганизации.

5. Способствует реструктуризации взаимодействия преподавателя и обучающегося, требует принципиально иную готовность преподавателя и обучающихся к своим новым ролям, заданным компетентностным подходом.

6. Предусматривает использование различных форм, методов и приемов, направленных на развитие творческой, исследовательской и аналитической деятельности обучающихся.

7. Встраиваясь в учебную деятельность, кардинально меняет практически все составные части учебного процесса за счет расширения самостоятельной работы обучающихся, внедрения современных форм ее организации и контроля качества.

Между тем несмотря на перечисленные преимущества, проектное обучение не нашло пока достаточного теоретического обоснования и практического внедрения в рамках компетентностного подхода в высшей школе. Модернизация образовательных стандартов высшего образования, изменение содержания образовательных программ напрямую не затронули формы педагогического взаимодействия. По нашим наблюдениям, в системе высшего образования по-прежнему преобладает традиционная система обучения, которая, как известно, носит репродуктивный или когнитивно-информационный характер и не способствует реализации компетентностного подхода процесса подготовки обучающихся, установленного федеральным государственным стандартом высшего образования.

Причины, по которым не используются инновационные технологии, носят объективный характер: в структуре содержания обучения прописаны результаты в форме освоения компетенций выпускника, но при этом не указывается системно организованная деятельность обучающегося, необходимая для их формирования на конкретном уровне. Таким образом, одни и те же образовательные результаты могут быть достигнуты различными способами. Кроме того, формирование одной компетенции может происходить на протяжении изучения нескольких дисциплин (модулям), то есть носить интегративный и междисциплинарный характер.

На наш взгляд, отсутствие системы и неопределенность методического инструментария в достижении результатов обучения приводят к

тому, что содержание дисциплин зачастую разрабатывается формально. Внедрение технологии проектного обучения позволяет обеспечить системный подход к процессу формирования компетенций, поскольку его модель предусматривает новые единицы содержания и структурные компоненты образовательного процесса, соотносимые с логикой осуществления проектной деятельности, в том числе поэтапным оцениванием достижений и результатов.

И наконец, обратимся к идее, которая завершает представленный выше перечень инноваций, необходимых для реализации проектного обучения. Как уже отмечалось, подготовка новых учебно-методических продуктов и других результатов внедрения инновационной образовательной технологии дает возможность для улучшения образовательного процесса в СибГИУ.

С учетом названных инновационных идей преподавателями СибГИУ была разработана концепция проектно-ориентированного обучения и определена последовательность целенаправленных организационных изменений учебного процесса, выявлены характеристики новых компетенций, планируемые уровни их сформированности, создан «портфель проектов».

С 2016 г. в учебный план основных образовательных программ введен модуль «Проектная деятельность», который относится к обязательным дисциплинам вариативной части. Данный модуль образует определенную структурную целостность основной образовательной программы, является «сквозным», так как логически накладывается на содержание других дисциплин и направлен на формирование у обучающихся «универсальных» компетенций (ориентировочной основы действия), связанных с подготовкой проекта. Цели и задачи дисциплин модуля «Проектная деятельность» соотносятся с конкретным практическим результатом – выполнением различных видов проектов. Для презентации результатов деятельности обучающихся в календарном графике учебного процесса предусмотрены недели защиты проектов.

Такая «сквозная» направленность соответствует деятельностной парадигме компетентностного подхода, способствует преодолению фрагментарности, цементирует образовательный процесс и стимулирует построение индивидуальной образовательной траектории обучающегося. Так как компетенции, связанные с проектной деятельностью, формируются в ходе всего образовательного процесса, установлены формы контроля уровня освоения на каждом этапе, а затем и для определения и

фиксации конечного уровня их освоения в рамках итоговой государственной аттестации.

Особое внимание уделено методическим параметрам дисциплины «Проектная деятельность», перечню формируемых компетенций, общей трудоемкости дисциплины, формам контроля. Поскольку данная дисциплина начинается на первом курсе и выполняет пропедевтическую функцию были определены тематические границы лекций, разработаны интерактивные формы проведения практических занятий, а также формы самостоятельной работы, соответствующие уровню подготовленности обучающихся первого курса.

Таким образом, модель проектного обучения получила отражение в следующих документах, регламентирующих образовательную деятельность вуза:

- описаниях основных образовательных программ;
- учебных планах и рабочих программ дисциплин модуля «Проектная деятельность»;
- фондах оценочных средств;
- методических указаниях для преподавателей и рекомендациях для самостоятельной работы обучающихся.

Учебно-методические материалы прошли апробацию в ходе педагогических экспериментов, участниками которых выступили сами преподаватели. Выявленные методические трудности позволили подготовить методические указания к проведению практических занятий. Результатом коллективной работы стал учебно-методический комплекс дисциплины первого курса «Проектная деятельность», которая введена в учебные планы всех основных образовательных программ СибГИУ и в настоящее время успешно реализуется.

Проектное обучение включено как структурно-образовательный компонент во все основные образовательные программы вуза, в реализацию инновационной образовательной технологии вовлечен весь коллектив профессорско-преподавательского состава СибГИУ. Для диссеминации опыта по внедрению проектного обучения в вузе используются различные способы презентации результатов инновационной образовательной деятельности: в форумах и конференциях, конкурсах. Кроме того, в СибГИУ создан «Акселератор учебных проектов», представляющий собой форму корпоративной системы повышения квалификации профессорско-преподавательского состава в области проектных технологий обучения. Такая форма взаимодействия способствует ускоренному полноценному погружению преподавателя в проектную деятельность как участ-

ника реализации реального междисциплинарного проекта. Информация о ходе реализации каждого проекта публикуется на сайте университета и в социальных сетях.

Результаты проектной деятельности обучающихся и преподавателей используются в специально организованных событиях. Так, по итогам изучения «Проектной деятельности» в первом семестре студентами-первокурсниками были самостоятельно подготовлены проекты – видеосюжеты на тему «Моя будущая профессия». Для выбора лучшего проекта было организовано открытое голосование, которое проводилось в режиме онлайн на сайте СибГИУ.

В настоящее время оценка результативности внедрения проектного обучения не проводилась. Промежуточными итогами являются следующие:

1. Оптимизировано содержание основных образовательных программ, выявлена преемственность проектной деятельности в рамках образовательных программ разных уровней – бакалавриата, магистратуры, специалитета и аспирантуры.
2. Созданы механизмы для осуществления межпредметной интеграции образовательного процесса.
3. Разработаны инновационные образовательные продукты (унифицированный учебно-методический комплекс по дисциплине «Проектная деятельность», создан «Портфель проектов»).
4. Повысился индекс инновационной активности педагогического коллектива по использованию инновационных образовательных технологий.
5. Созданы возможности для использования разнообразных форм организации самостоятельной работы обучающихся.
6. Повысилась степень удовлетворенности участников образовательного процесса.
7. Обеспечена открытость образовательного процесса, формируются новые механизмы по взаимодействию вуза и работодателя.
8. Появилась возможность для позиционирования СибГИУ как инновационного вуза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лощилова М.А., Добрычева И.В. Взаимодействие вузов и социальных партнеров в обеспечении качества подготовки выпускников технического вуза // Профессиональное образование и занятость молодежи: XXI век. Проблема опережающей подготовки кадров для российской экономики (региональный аспект). Материалы Меж-

- дународной научно-практической конференции – Кемерово: Кузбасский региональный институт развития профессионального образования, 2016. С. 38 – 41.
2. Миэринь Л.А., Быкова Н.Н., Зарукина Е.В. Современные образовательные технологии в вузе: учеб.- метод. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2015. – 169 с.
 3. Блохин А.Л. Метод проектов как личностно-ориентированная педагогическая технология: дис. канд. пед. наук. Ростов н/Д., 2005. – 154 с.
 4. Емельянова Н.В. Проектная деятельность студентов в учебном процессе // Вестник высшей школы. 2011. № 3. С. 82 – 84.
 5. Бордовская Н.В. Современные образовательные технологии: учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2016. – 432 с.
 6. Степанова С.Н. Трансформация «идеи университета» в эволюционирующем образовательном пространстве. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2012. – 128 с.
 7. Хитринцева А.В. Интерактивная образовательная среда вуза как основа проектирования профессионально-образовательного процесса // Академический журнал Западной Сибири. – Тюмень: Изд-во М-центр, 2010. С. 6 – 7.
 8. Багдасарьян Н.Г., Гаврилина Е.А. Еще раз о компетенциях выпускников инженерных программ, или Концепт культуры в компетенциях инженеров // Высшее образование в России. 2010. № 6. С. 23 – 26.
 9. Цыгулева М.В. Опыт реализации проектной методики для формирования профессиональной компетентности специалиста // Вестник Томского гос. пед. ун-та. 2010. Вып.10. С. 56 – 62.
 10. Марков А.П. Проектная культура специалиста как условие его профессиональной успешности // Вестник Казанского гос. ун-та. 2003. Вып 1. С. 56 – 60.
 11. Стенина Т.Л. Становление проектной культуры студентов / Под ред. Лебедева Л.Д. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 243 с.

© 2017 г. *Е.В. Протопопов, А.В. Феоктистов, М.В. Темлянцев, О.В. Гордеева, М.Б. Васильева*
Поступила 18 ноября 2017 г.

К ЮБИЛЕЮ РОЖИХИНОЙ ИРИНЫ ДМИТРИЕВНЫ



17 декабря 2017 года доктор технических наук, профессор кафедры металлургии черных металлов ФБГОУ ВО «Сибирский индустриальный университет» Ирина Дмитриевна Рожихина отметила свой юбилей.

Вся профессиональная деятельность Рожихиной И.Д. связана с металлургией электросталей и ферросплавов и с родным вузом, где она прошла все ступени преподавательской квалификации. В 1971 г. окончила с отличием Сибирский металлургический институт по специальности «Металлургия черных металлов» и была принята ассистентом на кафедру электрометаллургии стали и ферросплавов; после защиты в 1980 г. кандидатской диссертации была избрана на должность доцента этой кафедры. В 2007 г., после защиты докторской диссертации, была избрана на должность профессора кафедры, а в 2013 г. И.Д. Рожихиной присвоено ученое звание профессора.

За период работы в высшей школе Ирина Дмитриевна проявила себя как талантливый педагог, она Почетный работник высшего и профессионального образования Российской Федерации, является одним из ведущих профессоров университета, ее лекции отличает

сочетание высокого теоретического уровня с ясной формой изложения, она является автором 10 учебных пособий с грифом УМО по образованию в области металлургии. Дипломные проекты и работы, выполненные под ее руководством, неоднократно отмечены Почетными грамотами и Дипломами за участие в конкурсах дипломных проектов и работ в области металлургии. И.Д. Рожихина принимала активное участие в становлении кафедры металлургии черных металлов в Юргинском технологическом институте – филиале Томского политехнического университета.

И.Д. Рожихина является членом диссертационного совета Д.212.252.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальностям 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов, 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Ирина Дмитриевна постоянно поддерживает связь с выпускниками кафедры, работающими на ферросплавном и других заводах г. Новокузнецка, участвуя в конкурсных комиссиях научно-технических конференций молодых специалистов, передает свои знания при повышении квалификации инженеров-электрометаллургов.

Основным направлением научной деятельности является разработка теоретических и технологических основ производства ферросплавов, в частности, марганцевых сплавов с пониженным содержанием фосфора и углерода, получение новых высококачественных марганецсодержащих материалов, а также разработка теоретических основ модифицирования и микролегирования стали ванадием, барием и стронцием. Термодинамические характеристики, полученные Рожихиной И.Д. при экспериментальных и теоретических исследованиях систем Fe-V-Si-C, Fe-V-Si, используются при изучении сплавов на основе ванадия.

Результаты научных исследований И.Д. Рожихиной систематически представляются научной общественности в виде докладов на Международных и Всероссийских конференциях и нашли отражение в более чем в 200 публикациях, в том числе 8 монографиях и 8 изобретениях и патентах, она подготовила четырех кандидатов технических наук.

И.Д. Рожихина принимала участие в качестве научного руководителя, ответственного исполнителя и исполнителя в научно-

технических работах по заказам предприятий, при грантовой поддержке Минобрнауки России, в рамках федеральных и региональных программ в выполнении научно-исследовательских работ, в том числе «Разработка теоретических и технологических основ получения марганцевых сплавов с пониженным содержанием фосфора и углерода» (грант Министерства образования РФ); «Разработка теоретических и технологических основ ресурсосберегающей технологии производства комплексных сплавов» (программа «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники»); «Разработка энерго- и материалосберегающей технологии раскисления и легирования стали оксидными материалами» (подпрограмма «Производственные технологии»); в качестве ответственного исполнителя принимала участие в двух грантах Минобрнауки РФ («Изучение физико-химических закономерностей процессов получения и применения материалов для легирования и модифицирования сплавов на основе железа и алюминия с использованием нанотехнологий», «Изучение термодинамических и кинетических закономерностей взаимодействия оксидных и металлических расплавов при высокотемпературном синтезе новых сверхчистых материалов») и работы, выполняемой по госконтракту «Исследование физико-химических закономерностей выплавки и обработки металла на агрегате ковш-печь для производства рельсов низкотемпературной надежности», исполнителем НИР «Изучение термодинамических и кинетических закономерностей восстановительных процессов при микролегировании и модифицировании стали

барием и стронцием с использованием природного сырья при внепечной обработке».

По заданию предприятий Ирина Дмитриевна участвовала в выполнении НИР «Исследование возможности выплавки марганцевых сплавов в дуговой сталеплавильной печи», «Организация производства ферросиликомарганца марки МнС17 в объеме 45000 т в год на заводе ООО «СГМК-Ферросплавы», «Исследование металлургических свойств кварцитов Уватского месторождения».

За многолетнюю добросовестную и творческую работу профессор И.Д. Рожихина неоднократно отмечена благодарностями и грамотами различного уровня: Почетной грамотой Министерства образования Российской Федерации; Почетной грамотой Администрации города Новокузнецка; Почетной грамотой Юргинского городского Совета народных депутатов; Почетными грамотами оргкомитета Всероссийского конкурса дипломных проектов и дипломных работ в области металлургии; награждена медалью Кузбасса «За достойное воспитание детей»; медалью «65 лет Кемеровской области»; медалью «За особый вклад в развитие Кузбасса»; медалью II степени «За участие в Развитии Томского политехнического университета»; награждена знаком «Золотая кафедра России».

Редакция журнала, коллеги, ученики и друзья сердечно поздравляют Ирину Дмитриевну с юбилеем, желают ей доброго здоровья, новых творческих успехов в научной и образовательной деятельности.

РЕФЕРАТЫ

УДК 669.539.382:669.17

Перераспределение углерода в структуре рельсовой стали после длительной эксплуатации / Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Мусорина Е.В., Рубанникова Ю.А. // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии проведены исследования фазового состава и дефектной микроструктуры металла на глубину до 10 мм от поверхности катания 100 метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ после пропущенного тоннажа 691,8 млн. т брутто в процессе полигонных испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ». Показано, что эксплуатация рельсов сопровождается множественным преобразованием структуры стали. На микроуровне это проявляется в увеличении скалярной плотности дислокаций, формировании упругопластических полей напряжений и разрушении пластин цементита перлитных колоний. Выявлено, что атомы углерода, покинувшие кристаллическую решетку частиц цементита, располагаются преимущественно на дефектах кристаллической решетки стали (дислокации, границы зерен и субзерен). Табл. 2. Ил. 2. Библ. 33.

Ключевые слова: углерод, цементит, рельсы, эксплуатация, разрушение, структура.

Redistribution of carbon in structure of rail steel after long-term operation / Yur'ev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Musorina E.V., Rubannikova Yu.A. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

X-ray structural analysis and transmission electron diffraction microscopy were used to study phase composition and defect microstructure of metal to a depth of 10 mm from rolling surface of 100 meter differently hardened rails of DT350 grade produced from E76HF steel after 691.8 million tons of gross tonnage passed in field tests conditions at “VNIIZhT” JSC experimental ring. It is shown that rails operation is accompanied by multiple transformation of steel structure. At microlevel, this manifests itself in dislocations scalar density increase, formation of elastoplastic stress fields, and destruction of cement carbide plates of pearlite colonies. It was found that carbon atoms that left crystal lattice of cementite particles are located mainly at defects of steel crystal lattice (dislocations, grain boundaries, and subgrains). Table 2. Fig. 2. Ref. 33.

Keywords: carbon, cement carbide, rails, operation, destruction, structure.

УДК 669.162.12:622

Анализ способов окомкования железорудной шихты в режиме принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Проанализированы условия переката и положение устойчивости зародыша сложной формы на тарели окомкователя. Сформулированы требования к режимным параметрам работы тарельчатого окомкователя (частоте вращения, углу наклона тарели к горизонту) в зависимости от механизма зародышеобразования и условий смятия зародыша в холостой зоне окомкователя. Проведен анализ работоспособности экспериментальных технических схем, позволяющих управлять пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании. Получены опытные данные и результаты наблюдений, необходимые для сравнения способов окомкования и подбора оптимального технического решения. Проведена оценка конструктивных и технологических преимуществ каждой технической схемы. На основе выполненных исследований предложены механизм выравнивания условий формообразования шихты в разных зонах окомкователя и методы сближения условий деформирования зародышей, позволяющие интенсифицировать перекат материалов и рост массы зародышей. Табл. 1. Ил. 2. Библ. 11.

Ключевые слова: принудительное зародышеобразование, окомкование, железорудная шихта, окатыши, зародыши, деформация, экспериментальные схемы.

Analysis of the methods of pelletization of iron ore charge in the regime of forced nucleation / V.M. Pavlovets // Bulletin of SibSIU. – 2017. – No. 4 (22). – P.

The conditions of the roll-over and the stability position of the embryo of complex shape on the pellet of the pelletizer are analyzed. The requirements to the regime parameters of the operation of the plate pelletizer (rotation frequency, the angle of inclination of the plate to the horizon) are formulated, depending on the mechanism of

nucleation and conditions of the embryo crushing in the idle zone of the pelletiser. The efficiency of experimental technical schemes allowing to control plastic deformation of embryos in pellet production technology based on forced nucleation is analyzed. Experimental data and results of observations are obtained to compare the methods of pelletization and selection of the optimal technical solution. The design and technological advantages of each technical scheme were assessed. On the basis of the studies carried out, the concept of equalizing the conditions for the formation of charge in different zones of the pelletizer and the methods for convergence of the conditions for the deformation of embryos are proposed, which make it possible to intensify the rolling of materials and the growth of the mass of the embryos. Table 1. Fig. 2. Ref. 11.

Keywords: forced nucleation, pelletization, jelly-ore charge, pellets, embryos, deformation, experimental schemes.

УДК 669.162.12:622

Организация предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей / В.М. Павловец // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Проанализированы экспериментальные схемы, реализующие методы предварительного влагоудаления железорудных окатышей в рабочем пространстве окомкователя и на участке окомкования, организованные с помощью струйной тепловой обработки. Оценивали сложность экспериментальной схемы, стабильность работы окомковательного оборудования и степень предварительного влагоудаления из окатышей. Обсуждение преимуществ и недостатков каждой схемы в направлении предварительного влагоудаления дало возможность увязать их с достоинствами режима принудительного зародышеобразования. Это позволило наметить пути совершенствования технологии производства окатышей. Результаты экспериментов дают возможность сформулировать подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, предназначенному для тепловой обработки слоя влажных окатышей на стадии окомкования и транспортировки окатышей к обжиговому агрегату. Ил. 1. Табл. 1. Библ. 12.

Ключевые слова: предварительное влагоудаление, окомкование, железорудная шихта, окатыши, зародыши, экспериментальные схемы.

Organization of preliminary moisture removal at the site of pelletization in the production of iron ore pellets / В.М. Pavlovets // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

The experimental schemes realizing the methods of preliminary moisture removal of iron ore pellets in the working space of the pelletizing agent and in the pelletizing area, organized with the help of jet heat treatment, are analyzed. The work assessed the complexity of the experimental scheme, the stability of the operation of the pelletizing equipment and the degree of preliminary moisture removal from the pellets. Discussion of advantages and disadvantages of each scheme in the direction of preliminary moisture removal allowed them to be linked to the advantages of the regime of forced nucleation. This allowed us to outline ways to improve the technology of pellet production. The results of the experiments make it possible to formulate an approach to the pelletized cogenerator as a low-temperature heat engineering unit intended for heat treatment of a layer of wet pellets at the stage of pelletizing and transporting pellets to a calcining aggregate. Fig. 1. Table 1. Ref. 12.

Keywords: preliminary moisture removal, pelletization, iron ore charge, pellets, embryos, experimental schemes.

УДК 669.018.25:519.237

Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V / И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Представлены результаты исследования твердости, износостойкости и микроструктуры наплавленного металла, полученного с использованием порошковых проволок систем Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V и Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V, а также углеродфторсодержащего материала. Выбранные материалы и режим наплавки обеспечивают формирование наплавленных слоев с малой степенью загрязненности неметаллическими включениями. Установлено, что использование порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V более предпочтительно, чем проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V, так как обеспечивает формирование в наплавленном слое равномерной структуры мелкоигольчатого мартенси-

та. Твердость и износостойкость при этом достаточны для эксплуатации деталей горного оборудования. Табл. 2. Библ. 16.

Ключевые слова: порошковая проволока, наплавка, износостойкость, твердость, неметаллические включения, микроструктура.

Wear resistance of metal deposited with flux cored wires of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V systems / I.V. Osetkovskii, N.A. Kozyrev, A.I. Gusev, R.E. Kryukov, M.V. Popova // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – С.

The results of hardness, wear resistance, and microstructure investigation of weld metal obtained using flux cored wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V и Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V systems and carbon-fluorine-containing material are presented. Selected materials and deposition regime ensure generation of fused layers with low degree of contamination with nonmetallic inclusions. It has been established that application of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V flux cored wire is more preferable than wire of Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V system, because it provides development of the uniform structure of fine-neededled martensite in deposited layer. Hardness and wear resistance are thus sufficient for mining equipment parts operation. Table 2. Ref. 16.

Key words: powder wire, surfacing, wear resistance, hardness, nonmetallic inclusions, microstructure.

УДК 669.014

Растворимость кислорода в алюминийсодержащих расплавах Ni – Co и Ni – Co – Cr / А.А. Александров, В.Я. Дашевский // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Проведен термодинамический анализ растворов кислорода в расплавах систем Ni – Co и Ni – Co – Cr, содержащих алюминий. Рассчитаны зависимости растворимости кислорода в изученных расплавах при 1873 К от содержания кобальта и алюминия. Определены содержания алюминия, при которых происходит смена механизма реакции раскисления расплавов Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr. Определены содержания алюминия в точках минимума на кривых растворимости кислорода. Табл. 1. Ил. 1. Библ. 10.

Ключевые слова: система Ni – Co, система Ni – Co – Cr, расплав, кислород, алюминий, термодинамический анализ, параметры взаимодействия.

Effect of aluminum on the oxygen solubility in Ni-Co AND Ni-Co-Cr melts / A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

Thermodynamic analysis of oxygen solutions in aluminum-containing Ni – Co and Ni – Co – Cr melts has been carried out. The dependences of the oxygen solubility on the contents of cobalt and aluminum in the studied melts were calculated at 1873 K. Aluminum contents under which the mechanism of the deoxidation reaction changes were determined for Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr and Ni – 40 % Co – 10 % Cr melts. Aluminum contents in minimum points on the oxygen solubility curves were determined. Table 1. Fig. 1. Ref. 10.

Keywords: Ni – Co system, Ni – Co – Cr system, melts, oxygen, aluminum, thermodynamic analysis, interaction parameters.

УДК 621.785.54

Формирование структуры и свойств локальной зоны упрочнения при плазменной закалке заэвтектоидных сталей / Е.Н. Сафонов // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Исследовано влияние погонной энергии процесса плазменной закалки сталей 9ХС, У10 и 170ХНМ на структуру, глубину и твердость локальной зоны упрочнения. Показано, что по глубине зоны формируется градиентная структура с закономерно меняющимися дисперсностью и микротвердостью. Установлены зависимости, позволяющие управлять структурным состоянием и эксплуатационными свойствами зоны упрочнения, добываясь их оптимального соотношения для различных условий изнашивания. Ил. 4. Библ. 4.

Ключевые слова: плазменная закалка, погонная энергия, заэвтектоидные стали, градиентная структура, износостойкость.

Formation of the structure and properties of the next hardening zone for plasma quenching of hyperelectrode steels / E.N. Safonov // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

The effect of heat input plasma hardening steels process 0,9 C-Cr-Si, 1 C and 1,7 C-Cr-Ni-Mo the structure, the depth of hardening and the hardness of the local area. It is shown that the depth of the zone is formed a graded structure with regularly changing dispersion and microhardness. Dependences, allowing to operate the structural state and performance properties hardening zone, ensuring their optimum ratios for different wear conditions. Fig. 4. Ref. 4.

Keywords: plasma hardening, heat input, hypereutectoid steel, graded structure, wear resistance.

УДК 622.281.424

Совершенствование техники и технологии набрызгбетонирования для расширения сферы применения при чрезвычайных ситуациях / Г.Н. Волченко, В.Г. Челпанов, В.Н. Фрянов // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

В представленной работе предлагаются варианты технологий оперативного строительства и ремонта зданий и сооружений, например, при чрезвычайных ситуациях (пожары, наводнения и др.) на базе инновационной, импортозамещающей, энергоресурсосберегающей техники и технологии обеспыливающего набрызгбетонирования *Termiton*[®]. Табл. 1. Ил. 9. Библ. 12.

Ключевые слова: деформации и разрушения при чрезвычайных ситуациях, строительство и ремонт, бетонное покрытие, сухое, мокрое набрызгбетонирование.

УДК 622.281.424

Improvement of cement throwing technology increasing the scope of its application in emergency situations / G.N. Volchenko, V.G. Chelpanov, V.N. Fryanov // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

Presented paper provides options for buildings and structures operative construction and repair technologies, including emergency situations (fires, floods, etc.), based on innovative, import-substituting, energy-saving cement throwing technology (*Termiton*[®]). Table 1. Fig. 9. Ref. 12.

Keywords: deformation and destruction in emergency situations, construction and repair, concrete coating, dry and wet cement throwing.

УДК 622.831

Физическое моделирование геомеханических процессов в окрестности горной выработки / С.В. Риб, В.В. Басов // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Приведены результаты исследования геомеханических процессов в окрестности подземной горной выработки. На специально разработанном лабораторном стенде проведено физическое моделирование процессов деформирования горных пород на моделях из эквивалентных материалов; испытано две модели. В ходе лабораторных экспериментов сравнивали особенность процесса деформирования пород в окрестности одиночной выработки для пласта простого строения (без породного прослойка) и при наличии в пласте породного прослойка. Деформированное состояние массива оценивали на основании изучения изменений фиксированного расположения реперных марок всех уровней на фотоснимках. Установлено, что наличие породного прослойка с прочностью при сжатии в три раза большей по сравнению с углем приводит к уменьшению смещений пород почвы в выработке на 30 %, а кровли – на 60 %. Табл. 2. Ил. 7. Библ. 5.

Ключевые слова: подготовительная выработка, горные породы, физическое моделирование, эквивалентный материал, угольный пласт, сложное строение, породный прослойк, лабораторный стенд, смещения.

Physical modeling of geomechanical processes in the vicinity of the mine workings / S.V. Rib, V.V. Basov // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

The article presents the results of investigation of geomechanical processes in the vicinity of underground mining. On a specially designed laboratory bench, physical modeling of rock deformation processes on models of

equivalent materials was carried out. Two models were tested. In the course of laboratory experiments, the development of the process of rock deformation in the vicinity of a single production for a simple layer (without a rocky interlayer) and in the presence of a rock interlayer was compared. The deformed state of the array was estimated on the basis of studying changes in the fixed location of reference marks of all levels on photographs. It has been established that the presence of a rocky layer with a strength of 3 times greater in comparison with coal leads to a decrease in the displacement of soil rocks in the production by 30%, and the roof by 60%. Fig. 7. Table 2. Ref. 5.

Keywords: mine working, sedimentary rocks, physical modelling, equivalent material, coal seam, complex structure, rock layers, laboratory stand, displacements.

УДК 621.01

Структурный анализ механизма Янсена / А.С. Фомин, С.В. Киселев, А.В. Олексенко // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Выполнен структурный анализ механизма Янсена, который применяется при создании шагающих машин и роботов. Определена подвижность механизма, выделены группы Ассура, входящие в его состав. Построена траектория движения выходного звена механизма, позволяющая определить его максимальные горизонтальное и вертикальное смещения. Проведенное исследование позволяет перейти к решению дальнейших задач кинематического и динамического анализа, а также может быть использовано при расчетах по оптимизации требуемого перемещения выходного звена механизма. Табл. 1. Ил. 2. Библ. 13.

Ключевые слова: механизм Янсена, шагающий механизм, группа Ассура, степень свободы.

Structural analysis of the Jansen mechanism/ A.S. Fomin, S.V. Kiselev, A.V. Oleksenko // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

The current study provides results of structural analysis of Jansen mechanism, which is widely used for designing of walking machines and robots. The mobility of the mechanism has been defined and Assur groups have been extracted from the structure of mechanism. A trajectory reproduced by end-effector of the mechanism has been found. Using this data, it is possible to determine maximum horizontal and vertical displacements of end-effector. The conducted research allows moving to the further tasks of kinematic and dynamic analysis, and also can be used at calculations on optimization of required movements of the end-effector. Table 1. Fig. 2. Ref. 13.

Keywords: Jansen mechanism, walking mechanism, Assur group, degree of freedom.

УДК 697.1

Вопросы энергосбережения при утилизации тепла дымовых газов котельных на предприятиях угольной промышленности Кузбасса / И.В. Зоря, А.Д. Байдалин // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Разработана и рассчитана схема утилизации тепла дымовых газов от водогрейных котельных с учетом возможной автоматизации работы теплоутилизатора. Рассмотрены вопросы энергосбережения при отоплении котельных на предприятиях угольной промышленности. При разработке вышеуказанной схемы учтена и исключена вероятность образования конденсата на теплообменных поверхностях воздухонагревательных установок. Ил. 1. Библ. 3.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоутилизатор, воздухонагревательные установки, элементы автоматизации, дымовые газы.

Energy saving issues in disposal of smoke gases of boiler in the enterprises of the Kuzbass coal industry / Zorya I.V., Baydalina A.D. // Bulletin of SibSIU. – 2017. – No. 4 (22). – P.

A scheme for the utilization of flue gases from hot water boilers was developed and designed, taking into account the possible automation of the heat recovery. The issues of energy saving during heating of boiler houses at the enterprises of the coal industry are considered. In the development of the above scheme, the probability of condensate formation on the heat exchange surfaces of the air heating plants has been taken into account and eliminated. Fig. 1. Ref. 3.

Keywords: energy saving, heat recovery, air heating units, automation elements, flue gases.

УДК 669.017:620.197

Анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl / И.Н. Ганиев, У.Ш. Якубов, М.М. Сангов, А.Х. Хакимов // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Известно, что технический алюминий с повышенным содержанием железа, кремния и других примесей из-за низких эксплуатационных характеристик не находит применения в промышленности. Поэтому разработка новых составов сплавов на основе такого металла является весьма актуальной задачей. Перспективными составами сплавов на диаграмме алюминий – железо являются эвтектика (α -Al+Al₃Fe) и заэвтектические составы, которые, имея минимальный интервал кристаллизации, содержат железа до 5 % (по массе). Сплав такого состава был дополнительно легирован 10 % (по массе) кремнием и подвергнулся модифицированию стронцием. Цель настоящей работы заключается в установлении влияния стронция как модификатора на коррозионно-электрохимическое поведение модельного сплава АЖ5К10 в среде электролита NaCl. Для достижения поставленной цели потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение сплава АЖ5К10, модифицированного стронцием, в среде электролита NaCl. Показано, что значения потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации сплава АЖ5К10 со стронцием по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите уменьшаются. Увеличение концентрации модифицирующего компонента в указанном сплаве способствует росту значений потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-иона. При этом плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов системы АЖ5К10 – Sr с ростом добавок стронция уменьшается, а хлорид-иона увеличивается. Последняя зависимость характерна для всех сплавов, независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств модифицирующего компонента. Ил. 4. Табл. 1. Библ. 17.

Ключевые слова: сплав АЖ5К10, стронций, потенциостатический метод, электрохимическое поведение, электролит NaCl, потенциал свободной коррозии, потенциал питтингообразования, скорость коррозии.

Anodic behavior of AlFe5K10 alloy, modified strontium in medium electrolyte NaCl / I.N. Ganiev, U.Sh. Yakubov, M.M. Sangov, A.Kh. Khakimov // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

It is known that technical aluminum with a high content of iron, silicon and other impurities, because of low performance characteristics, cannot be used in industry. Therefore, the development of new compositions of alloys based on such a metal is a very urgent task. One of the promising compositions of alloys on the aluminum-iron diagram are the eutectic (α -Al+Al₃Fe), eutectic compositions which, with a minimum crystallization interval, correspond to an iron content of up to 5% by weight. This composition was additionally doped with 10% (by weight) silicon, subjected to modification with strontium. Thus, we take as a model alloy and the purpose of the work is to determine the effect of these additives on the corrosion-electrochemical behavior of the model AlFe5K10 alloy in medium electrolyte NaCl. To achieve this goal, the anodic behavior of the strontium-modified AlFe5K10 alloy in medium electrolyte NaCl was studied in the potentiodynamic mode in the potentiodynamic mode at a potential sweep rate of 2 mV / s. The values of potentials of corrosion, pitting formation and repassivation of the AlFe5K10 alloy with strontium decrease with increasing concentration of the chloride ion in the electrolyte. An increase in the concentration of the alloying component in the AlFe5K10 alloy promotes an increase in the potential for corrosion, pitting and repassivation in all media, regardless of chloride ion concentration. The current density of corrosion and, accordingly, the corrosion rate of the alloys of the system AlFe5K10 - Sr with the increase in additions, strontium decreases, and the concentration of the chloride ion increases. The latter dependence is typical for all alloys, regardless of their composition and features of the physicochemical properties of the modifying component. Fig. 4. Table 1. Ref. 17.

Keywords: AlFe5K10 alloy, strontium, potentiostatic method, electrochemical behavior, electrolyte NaCl, free corrosion potential, pitting potential, corrosion rate.

УДК 378.31:005.591.6

Проектное обучение как инструмент интеграции деятельности вуза в образовательное пространство региона (опыт внедрения технологии проектного обучения в СибГИУ) / Е.В. Протопопов, А.В. Феоктистов, М.В. Темлянцева, О.В. Гордеева, М.Б. Васильева // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 4 (22). – С.

Представлен опыт внедрения инновационных образовательных технологий в вузе. Охарактеризованы идеи формирования новой модели современного образовательного процесса, рассмотрены возможности

и особенности реализации технологии проектного обучения в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» как инструмента инновационных преобразований. Ил. 1. Библ. 11.

Ключевые слова: образовательная технология, инновационная образовательная технология, проектное обучение, проектная культура, интерактивная образовательная среда.

Project-based learning as a tool integration of the activities of the university in the educational space of the region (experience of project-based education technology implementation in SibSIU) / E.V. Protopopov, A.V. Feoktistov, M.V. Temlyantsev, O.V. Gordeeva, M.B. Vasilyeva // Bulletin of SibSIU. – 2017. – № 4 (22). – P.

The article presents the experience of implementation of innovative educational technologies at the University. Characterized by the idea of forming a new model of modern educational process, possibilities and features of realization of technology of project-based learning in "Siberian state industrial University" as an instrument of innovation transformation. Fig. 1. Ref. 11.

Keywords: education technology, innovative education technology, project training, project culture, interactive educational environment.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

Металлургия и материаловедение.

Горное дело и геотехнологии.

Машиностроение и транспорт.

Энергетика и электротехнологии.

Химия и химические технологии.

Архитектура и строительство.

Автоматизация и информационные технологии.

Экология и рациональное природопользование.

Экономика и управление.

Образование и педагогика.

Гуманитарные науки.

Социальные науки.

Краткие сообщения.

Отклики, рецензии, биографии.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения и экспертное заключение.

Кроме того, необходимо разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии).

В редакцию следует направлять два экземпляра текста статьи на бумажном носителе, а также на электронном. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте на e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75x75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи пространственных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного прило-

жения (*.xls, *.vsd и др.). На обратной стороне рисунка должны стоять порядковый номер, соответствующий номеру рисунка в тексте, фамилии авторов, название статьи.

Формулы вписываются четко. Шрифтовое оформление физических величин следующее: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Если формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, следить, чтобы масштаб формул был 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 8 – 10 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, и трех рисунков.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон и E-mail). Необходимо указать с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать не в виде подстрочных сносок, а общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой.

Перечень литературных источников рекомендуется не менее 10. Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.2 – 2003: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация в двух экземплярах объемом не менее 1/2 страницы текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, а также ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, ФИО авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложно-

го рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ и представлены на сайте СибГИУ (www.sibsiu.ru) в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания – Журнал «Вестник СибГИУ»).

Над номером работали

Темлянцев М.В., *главный редактор*

Новычихин А.В., *ответственный секретарь*

Бащенко Л.П., *ведущий редактор*

Неунывахина Д.Т., *ведущий редактор*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Темлянцева Е.Н., *верстка*

Олендаренко Е.В., *менеджер по работе с клиентами*