

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 33

Москва  
Новокузнецк  
2014

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 33 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянецв (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2014. – 186 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания».

Ил. 60, табл. 34, библиогр. назв. 173.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Юсфин Ю.С., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РЭА (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянецв М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., ОАО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ  
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Волынкина Е.П.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РЭА, СибГИУ, г. Новокузнецк
Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Громов В.Е.	д-р физ.-мат. наук, проф., д.ч. Международной академии энерго-информационных наук, СибГИУ, г. Новокузнецк
Дегтярь В.А.	д-р хим. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Коновалов С.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Павлович Л.Б.	д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Перетяцько В.Н.	д-р техн. наук, проф., чл.-корр. Академии инженер- ных наук, СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк

## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	7
<i>В.М. Павловец, А.В. Герасимук</i>	
Особенности движения влажного зародыша на тарели окомкователя в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.....	8
<i>В.М. Павловец, А.В. Герасимук</i>	
Методика расчёта давления воздушно-шихтовой струи в технологии получения железорудных окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.....	17
<i>Н.А. Козырев, Д.В. Бойков, А.А. Уманский</i>	
Исследование влияния технологических параметров внепечной обработки рельсовой стали в электросталеплавильном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» на качество рельсового проката.....	25
<i>Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Д.В. Бойков</i>	
Анализ технологической и технико-экономической эффективности использования новых видов ферросплавов для раскисления рельсовой стали.....	32
<i>М.В. Темлянец, Е.М. Запольская, В.В. Стерлигов, Е.Н. Темлянцева, В.А. Дегтярь</i>	
Повышение энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок металлургических ковшей.....	38
<i>Г.В. Галевский, М.Я. Минцис</i>	
Анализ распределения тока в алюминиевом электролизере с анодом Содерберга С-8БМ.....	45
<i>В.Б. Деев, К.В. Пономарева, О.Г. Приходько, А.С. Юдин</i>	
Получение высококачественных герметичных отливок способом литья по газифицируемым моделям.....	51
<i>М.В. Темлянец, К.С. Слажнева, А.Ю. Дзюба, А.А. Уманский, Н.В. Темлянец</i>	
Высокотемпературное окисление и обезуглероживание рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА.....	55
<i>А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.А. Уманский</i>	
Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки.....	64
<i>А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.А. Уманский</i>	
Исследование энергосиловых параметров прокатки в клетях универсального рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с целью совершенствования режимов прокатки.....	72
<i>А.С. Симачёв, М.В. Темлянец, К.В. Волков, Е.В. Полевой, А.В. Головатенко</i>	
Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76ХФ78.....	
<i>М.В. Филиппова, В.Н. Перетяцько, А.А. Федоров, А.С. Климов</i>	
Выдавливание крестовины из шаровой заготовки.....	83

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	89
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, О.А. Полях</i>	
Техногенный микрокремнезем: основные характеристики и свойства, получение, металлургическое опробование и применение.....	90
<i>А.Е. Аникин, О.А. Полях, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Исследование физико-химических характеристик пылевидного микрокремнезема производства кремния и железо-кремнистых сплавов.....	104
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ .....	114
<i>О.В. Олесюк, С.В. Коновалов, Д.А. Романов, К.Ю. Бондаренко, В.Я. Целлермаер</i>	
Влияние электронно-пучковой обработки на формирование электровзрывных износо- и электроэрозионностойких покрытий.....	115
<i>И.А. Комиссарова, Н.Г. Ярополова, С.В. Коновалов, Д.В. Загуляев, В.Е. Громов</i>	
Влияние контактных воздействий на нанотвердость металлов.....	125
<i>А.М. Анасов, А.А. Анасов</i>	
Диагностика непровара в процессе сварки .....	132
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	141
<i>С.Г. Галевский</i>	
Использование премии за риск при оценке текущей стоимости будущих денежных потоков .....	142
<i>Л.В. Думова, К.Б. Фокин</i>	
Практические аспекты оценки эффективности системы корпоративной социальной ответственности промышленных предприятий .....	146
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	152
<i>О.А. Полях, Г.В. Галевский, Л.Б. Павлович, Р.Я. Шарафутдинов, С.В. Морин</i>	
Повышение квалификации специалистов коксохимического производства как основное направление развития и сохранения профессиональных компетенций .....	153
<i>Н.Е. Анохина</i>	
Особенности преподавания дисциплины «Трудовое право» студентам по направлению подготовки 034700: «Кадровое делопроизводство и архивирование документов».....	159
ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ.....	163
<i>С.Г. Коротков, Е.П. Волюнкина, М.В. Темлянцев, Г.В. Галевский</i>	
К 80-ти летию кафедры теплоэнергетики и экологии СибГИУ.....	164
<i>В.В. Васильев</i>	
Кафедра физической химии и теории металлургических процессов СибГИУ: становление, руководители, педагогические и научные достижения. К 75-летию юбилею .....	177
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ .....	184

## ПРЕДИСЛОВИЕ

33-й выпуск сборника научных трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» содержит статьи российских ученых, посвященные решению различных научно-технических проблем современной металлургии и материаловедения. Теоретические и прикладные исследования выполнены авторскими коллективами сотрудников Сибирского государственного индустриального университета, Национального исследовательского технического университета «МИСиС», Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Юргинского технологического института (филиала) НИ ТПУ, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск), ООО «НПП Вектор машиностроения» (г. Новокузнецк).

В традиционных разделах сборника научных трудов представлены результаты исследований в областях повышения качества железорудного сырья и отливок из алюминиевых сплавов, высокотемпературной пластичности и сопротивления деформации рельсовой стали, влияния электронно-пучковой обработки на формирование покрытий, получения и применения техногенного микрокремнезема, диагностики непроваров при сварке.

Редакционная коллегия благодарит авторов за предоставленные материалы и приглашает принять участие в очередном 34-м выпуске сборника научных трудов, посвященном 85-летию Сибирского государственного индустриального университета.

**МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ  
И СПЛАВОВ**

В.М. Павловец, А.В. Герасимук

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЛАЖНОГО ЗАРОДЫША НА ТАРЕЛИ ОКОМКОВАТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ, ОСНОВАННОЙ НА ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ

В работе проанализированы силы, действующие на кубический зародыш, условия его движения на шихтовом гарнисаже и определены параметры работы окомкователя.

This paper analyzes the forces acting on the rooting embryo, the conditions of its motion for charge skull and the parameters of pelletizer.

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает две основные стадии: формирование зародышей по форме, близкой к кубу, и создание оболочки окатышей доокомкованием их в рабочей зоне окомкователя [1, 2]. Для доокомкования зародышей необходима организация режима переката, который для зародышей кубической формы должен быть реализован на окомкователе с определёнными параметрами работы: углом наклона тарели к горизонту и её частотой вращения. Стабильность режима переката обеспечивается отсутствием скольжения зародыша по шихтовому гарнисажу (ШГ) в процессе работы окомкователя. Поэтому наряду с указанными параметрами можно использовать дополнительный фактор, влияющий на стабильность режима переката и доокомкования зародышей, в качестве которого может быть принят коэффициент трения зародышей о шихтовый гарнисаж. На коэффициент трения можно воздействовать путём изменения влажности и плотности шихты гарнисажа окомкователя.

Целью работы является анализ сил, действующих на кубический зародыш, условий его движения на шихтовом гарнисаже и определение параметров работы окомкователя.

В процессе вращения окомкователя зародыш удерживается на ШГ силами трения и, в общем случае, может подняться на определённую высоту, определяемую углом  $\theta$ , находясь на некотором расстоянии от борта тарели (рисунок 1).

На зародыш, находящийся в состоянии покоя на движущемся шихтовом гарнисаже, действуют силы, побуждающие его к движению (проекция силы тяжести  $F_{ТУ}$  на плоскость ШГ и центробежная сила  $F_{Ц}$ ), и сила, оказывающая сопротивление движению (сила трения  $F_{ТР}$ ). Разновидностью силы трения является сила трения покоя  $F_{ТР.П}$ , которая действует от момента прило-

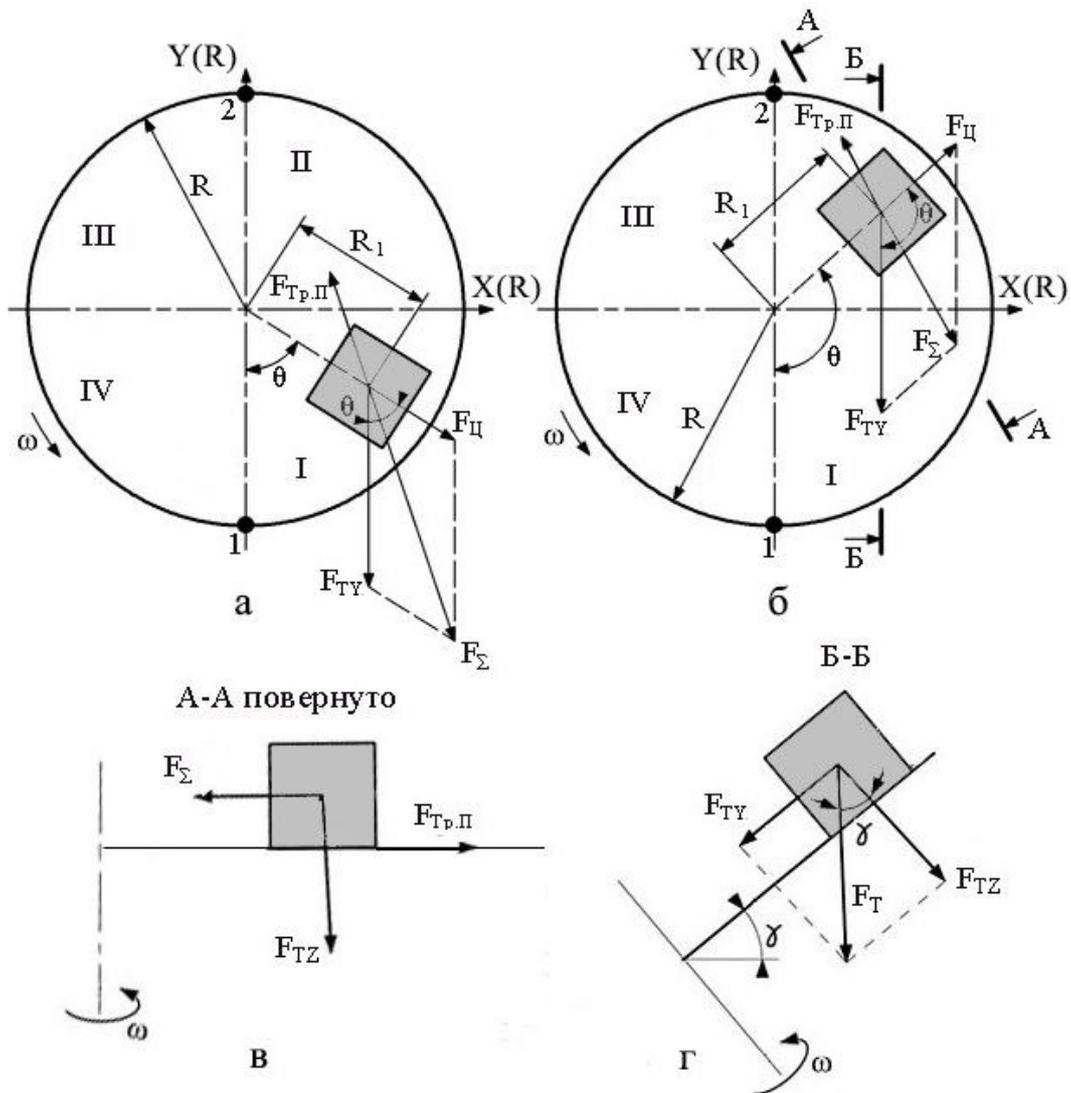


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на зародыш в квадранте I (а), II (б) в разрезе А-А (в) и Б-Б (г). I, II, III, IV – номера квадрантов тарели

жения сил, побуждающих к движению, до начала скольжения зародыша по ШГ. В процессе скольжения, сила трения покоя  $F_{Тр.П}$  переходит в силу трения скольжения  $F_{Тр.Ск}$ . Граничный случай, когда скольжение зародыша по ШГ ещё не началось, и все силы скомпенсированы (их векторная сумма равна нулю), можно представить в виде векторного равенства:

$$\vec{F}_{Тр.П} = \vec{F}_{ТГ} + \vec{F}_{Ц} \quad (1)$$

Правая часть равенства (1) представляет собой суммарную силу, побуждающую зародыш к движению в направлении борта тарели:

$$\vec{F}_{\Sigma} = \vec{F}_{ТГ} + \vec{F}_{Ц} \quad (2)$$

Сила трения действует на зародыш в направлении противоположном его движению (или наиболее вероятного движения, когда тело ещё покоится) и направлена против вектора суммарной силы  $F_{\Sigma}$  (рисунок 1).

Представим векторное равенство (1) в скалярном виде. Для этого просуммируем векторы в правой части по правилу параллелограмма, в котором суммарная сила  $F_{\Sigma}$  является диагональю параллелограмма:

$$F_{\text{тр.п}} = \sqrt{F_{\text{TY}}^2 + F_{\text{Ц}}^2 + 2F_{\text{TY}} \cdot F_{\text{Ц}} \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

Проекции силы тяжести, действующей на зародыш в направлениях координат Y и Z,  $F_{\text{TY}}$  и  $F_{\text{TZ}}$  определяются по выражениям:

$$F_{\text{TY}} = mg \cdot \cos(90^\circ - \gamma) = mg \cdot \sin\gamma, \quad (4)$$

$$F_{\text{TZ}} = mg \cdot \sin(90^\circ - \gamma) = mg \cdot \cos\gamma, \quad (5)$$

где  $m$  – масса зародыша, кг;  $\gamma$  – угол наклона тарели к горизонту, градус;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Центробежная сила  $F_{\text{Ц}}$  определяется по формуле:

$$F_{\text{Ц}} = m\omega^2 R_1 = m(\pi n/30)^2 R_1, \quad (6)$$

где  $n$  – частота вращения, об/мин;  $\omega$  – угловая частота вращения, рад/с;  $R_1$  – расстояние от оси тарели до центра зародыша, м;

Сила трения покоя зародыша о ШГ определяется по выражению:

$$F_{\text{тр.п}} = \mu_{\text{п}} F_{\text{TZ}} = mg \cdot \cos\gamma. \quad (7)$$

Из рисунка 1 видно, суммарная сила  $F_{\Sigma}$ , действующая на зародыш в квадрантах I и II – различна. Она максимальная в нижней точке (в точке 1) траектории движения зародыша, так как сила тяжести и центробежная сила сонаправлены, и минимальная в верхней точке траектории движения (в точке 2), где сила тяжести и центробежная сила противоположны. Однако, преобладающее направление действия этой силы – сверху вниз. График изменения суммарной силы  $F_{\Sigma}$  в зависимости от расположения зародыша на тарели окомкователя (угол поворота зародыша вокруг оси тарели  $\theta$ ) представляет собой косинусоиду, в которой восходящая ветвь соответствует квадрантам III-IV холостой зоны тарели (рисунок 2).

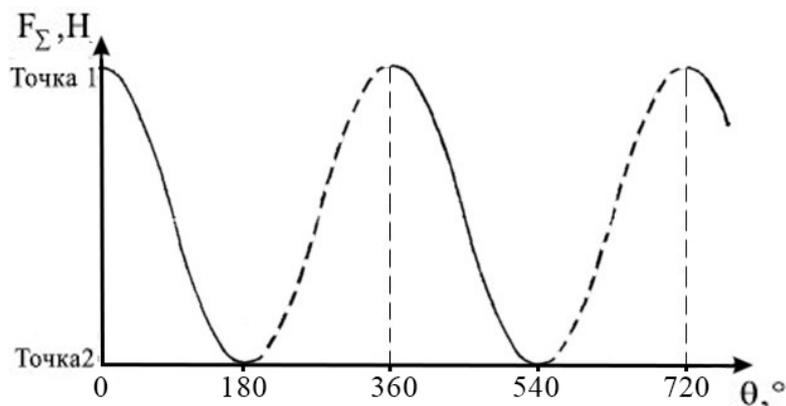


Рисунок 2 – График зависимости суммарной силы  $F_{\Sigma}$  от угла поворота зародыша на тарели. Пунктирная линия соответствует квадрантами III-IV

Расчётные значения центробежной силы  $F_{Ц}$ , действующей на зародыши кубической формы в зависимости от радиуса тарели, массы зародыша, частоты вращения и проекции силы тяжести  $F_{ТУ}$  в зависимости от массы зародыша и угла наклона тарели приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Значения центробежной силы

Радиус тарели, R, м	Масса зародыша, m, г	Центробежная сила при частоте вращения тарели окомкователя, n, об/мин:					
		3	4	5	6	8	10
0,5	3	0,0001	0,0003	0,0004	0,0006	0,0011	0,0016
	5	0,0002	0,0005	0,0007	0,0010	0,0018	0,0026
	10	0,0005	0,0010	0,0013	0,0020	0,0037	0,0053
1,0	3	0,0003	0,0005	0,0008	0,0012	0,0021	0,0033
	5	0,0005	0,0008	0,0013	0,0020	0,0035	0,0055
	10	0,0010	0,0017	0,0027	0,0040	0,0070	0,0110
1,5	3	0,0004	0,0008	0,0012	0,0018	0,0032	0,0049
	5	0,0007	0,0013	0,0020	0,0030	0,0053	0,0081
	10	0,0013	0,0027	0,0040	0,0060	0,0106	0,0163
2,0	3	0,0006	0,0011	0,0016	0,0024	0,0042	0,0066
	5	0,0010	0,0018	0,0027	0,0040	0,0070	0,0110
	10	0,0020	0,0037	0,0053	0,0080	0,0140	0,0220
2,5	3	0,0007	0,0013	0,0021	0,0030	0,0053	0,0082
	5	0,0011	0,0022	0,0035	0,0050	0,0088	0,0137
	10	0,0023	0,0043	0,0070	0,0100	0,0177	0,0273

Таблица 2 – Значения проекции силы тяжести

Сила тяжести $F_{ТУ}$ , Н	Масса зародыша, m, г	Угол наклона тарели, $\gamma$ , градус:							
		30	32	34	36	38	40	42	44
Сила тяжести $F_{ТУ}$ , Н	3	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	0,018	0,018	0,019
	5	0,023	0,025	0,025	0,027	0,028	0,03	0,03	0,032
	10	0,047	0,05	0,05	0,053	0,057	0,06	0,06	0,063

Таким образом, величина угла  $\theta$  зависит от угла наклона тарели, частоты вращения и коэффициента трения зародыша о ШГ. Анализируя равенство (1) и рисунок 2, можно заключить, что в области, расположенной ниже границы, задаваемой углом  $\theta$  будет наблюдаться скольжение зародыша по ШГ, а выше этой границы – область отсутствия скольжения.

Подставим выражения (4), (6), (7) в формулу (3), и выразим из неё угол  $\theta$ :

$$\theta = \arccos \left[ \frac{g^2 \cdot (\mu_{\text{п}}^2 \cdot \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma) - (\pi n / 30)^4 R_1^2}{2g \cdot (\pi n / 30)^2 R_1 \sin \gamma} \right] \quad (8)$$

Результаты расчёта угла  $\theta$  для тарели радиусом 2,5 м при заданных значениях угла наклона тарели, коэффициента трения и частоты вращения тарели приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Величина угла  $\theta$  при различных углах наклона тарели и частоте вращения окомкователя

$\mu_{\text{тр.п}}$	$\gamma$ , градус	Угол $\theta$ , градус, при частоте вращения $n$ , об/мин							
		3	4	5	6	7	8	9	10
0,6	30	39	66	77	84	89	93	97	101
	32	148	120	111	107	106	106	107	109
	34	180	180	154	132	123	119	117	117
	36	180	180	180	180	143	133	127	124
	38	180	180	180	180	180	148	138	132
	40	180	180	180	180	180	180	150	141
	42	180	180	180	180	180	180	174	151
	44	180	180	180	180	180	180	180	165
0,8	30	0	0	0	0	0	0	36	56
	32	0	0	0	0	0	38	57	70
	34	0	0	0	0	44	61	72	81
	36	0	0	32	57	70	78	85	91
	38	55	73	80	86	90	93	96	100
	40	180	134	118	111	108	107	107	108
	42	180	180	180	141	128	121	118	117
	44	180	180	180	180	154	137	130	126
1,0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0	16
	36	0	0	0	0	0	0	12	46
	38	0	0	0	0	0	15	46	61
	40	0	0	0	0	27	51	65	74
	42	0	0	0	45	62	72	80	86
	44	9	58	72	80	85	89	93	96

Значение  $\theta = 0^\circ$  таблицы 3 соответствует случаю, когда скольжение зародыша в направлении суммарной силы  $F_\Sigma$  отсутствует на всей поверхности ШГ и зародыш находится в состоянии покоя относительно тарели. Значение  $\theta = 180^\circ$  соответствует случаю, когда скольжение происходит на всей поверхности ШГ окомкователя в направлении действия суммарной силы  $F_\Sigma$  в сторону борта тарели. Промежуточные значения угла  $\theta$  означают, что в пределах от 0 до  $\theta$ , наблюдается скольжение зародыша в направлении действия суммарной силы  $F$  в сторону борта тарели, а в пределах от  $\theta$  до  $180^\circ$  скольжение отсутствует.

При расположении зародыша у борта вращающейся тарели расстановка сил, действующих на зародыш, меняется и скольжение зародыша в направлении суммарной силы  $F_{\Sigma}$  исключается из-за реакции борта. В связи с этим, можно указать две схемы движения зародыша. Первая схема движения характерна при нахождении зародыша в квадранте I при  $\theta < 90$  градусов, при котором единственной формой движения зародыша будет его перекаат у борта тарели. При этом на него действует сила тяжести, которую целесообразно разложить на две составляющие: силу  $F_{TY}$  – действующую параллельно плоскости тарели и силу  $F_{TZ}$  – действующую перпендикулярно плоскости тарели, центробежная сила  $F_{Ц}$  и сила трения покоя  $F_{Тр.П}$  зародыша о ШГ, действующая в направлении, противоположном силе  $F'_{TY}$ , поскольку в направлении этой силы, вероятно, будет происходить перекаат (рисунок 3, а). Вторая схема движения характерна при нахождении зародыша в квадранте II при  $\theta > 90$  градусов, при котором происходит его перекаат по ШГ тарели (рисунок 3, б).

Для первой схемы перекаат зародыша будет осуществляться по поверхности борта с одновременным скольжением по ШГ, когда угол  $\varphi$ , соответствующий наклону грани  $OO'$  к плоскости горизонта, превысит угол  $\theta$ . При этом угле центр тяжести куба (Ц) переместится за границу опоры куба – грань, на которую он опирается на борту. При этом проекция точки Ц центра масс зародыша на горизонтальную плоскость (точка Ц') выйдет за опорную грань.

Если в силу соответствующих условий зародыш достигнет второго квадранта тарели ( $\theta > 90^\circ$ ) и будет двигаться по второй схеме, то условие устойчивости зародыша на ШГ соответствует углу  $\varphi < 45^\circ$  (рисунок 4, а). Для этой схемы движения  $\varphi = \gamma$ . При углах наклона тарели окомкователя к горизонту более 45 градусов условие устойчивости будет нарушено и зародыш будет перекаатываться по ШГ. Это обусловлено тем, что при наклоне более 45 градусов центр тяжести зародыша (Ц) переместится за границу опоры зародыша – грань, на которую он опирается на ШГ. При этом проекция центра тяжести Ц зародыша на горизонтальную плоскость (точка Ц') (рисунок 4, б) выйдет за опорную грань.

Для определения условий перекаата зародыша рассмотрим схему моментов сил, действующих на зародыш. Для обеих схем движения способствовать перекаату зародыша будет проекция силы  $F_{TY}$  на прямую  $K' - F'_{TY}$ . ( $K'$  – линия, проведённая через центр тяжести Ц и параллельная касательной  $K$  к борту тарели окомкователя), поскольку предполагаемое направление движение в начальной фазе будет вдоль борта тарели.

Проекция силы  $F_{TY}$  определяется по формуле:

$$F'_{TY} = F_{TY} \cdot \cos \vartheta = mg \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta \quad (9)$$

где  $\vartheta$  – угол между силами  $F_{TY}$  и  $F'_{TY}$ .

Сила  $F'_{TY}$  создаёт вращающий момент относительно опорной грани:

$$M_1 = (mg \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta) h_{зп} / 2 \quad (10)$$

где  $h_{зп}$  – высота зародыша.

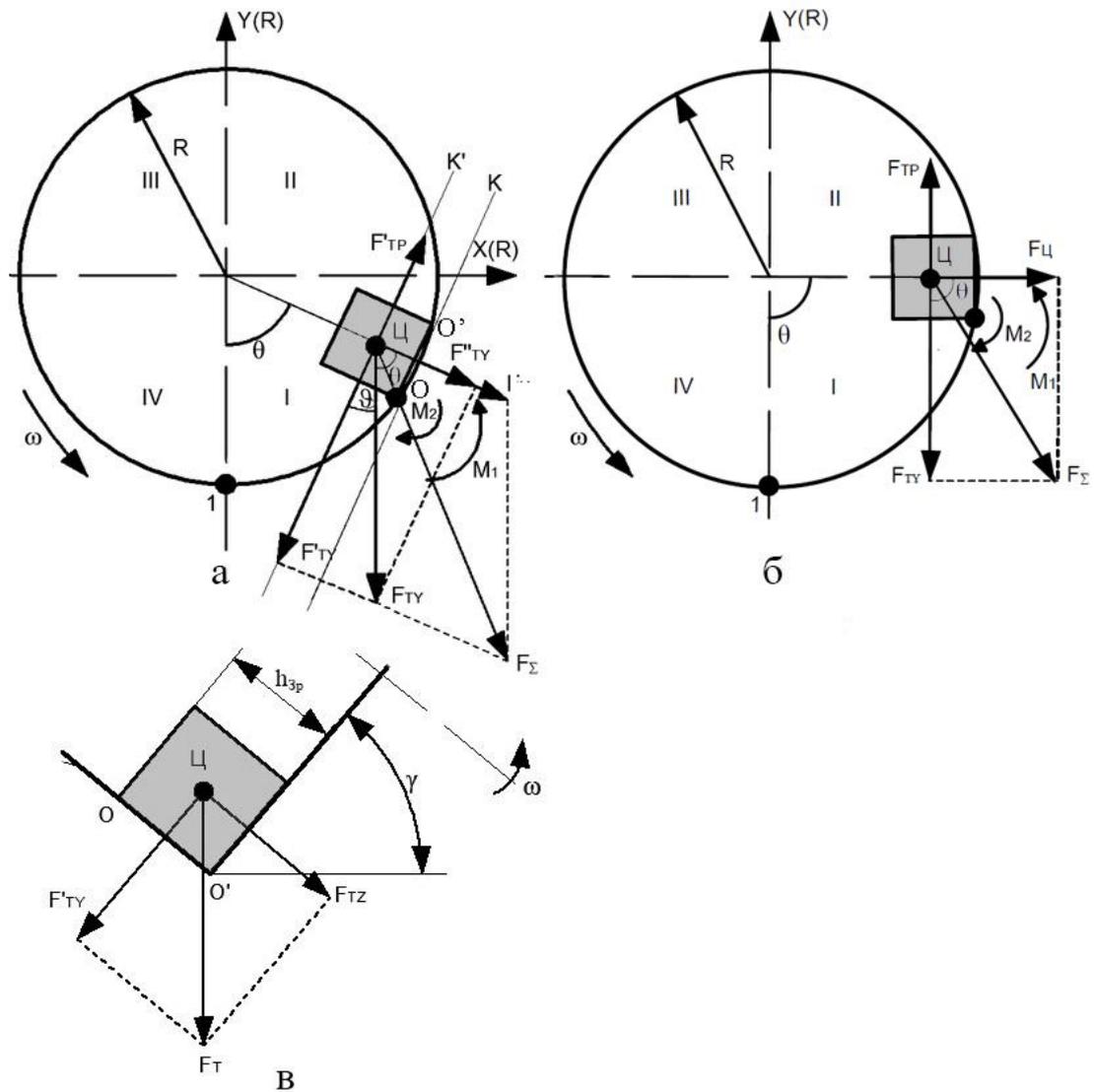
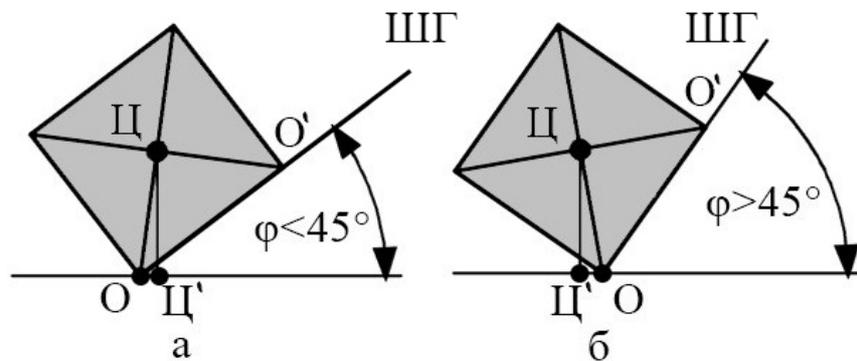


Рисунок 3 – Схема сил и моментов сил, действующих на зародыш, расположенный у борта тарели окомкователя в квадрантах I (а) и II (б), соответственно, и при нахождении зародыша в точке 1 (в)



а, б – положение центра тяжести зародыша при различном наклоне ШГ к горизонту  
 Рисунок 4 – Условие устойчивости зародыша на шихтовом гарнисаже

Центробежная сила и сила трения создают моменты, противоположные по направлению моменту  $M_1$ :

$$M_{F_{Ц}} = m\omega^2 R \cdot h_{зр}/2 = \left[ m(\pi n/30)^2 R \right] \cdot h_{зр}/2, \quad (11)$$

$$M_{F_{Тр.П}} = (\mu_{Тр.П} mg \cdot \cos\gamma) h_{зр}/2. \quad (12)$$

Дополнительный момент, противоположный по направлению моменту  $M_1$ , будет создавать проекция  $F''_{ТГ}$  силы  $F_{ТГ}$ , направленная перпендикулярно борту:

$$F''_{ТГ} = F_{ТГ} \cdot \sin\vartheta = mg \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta. \quad (13)$$

Её момент вычисляется аналогично (10):

$$M_{F''_{ТГ}} = (mg \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta) h_{зр}/2. \quad (14)$$

Сумма моментов сил определяется по выражению:

$$M_2 = M_{F_{Ц}} + M_{F_{Тр.П}} + M_{F''_{ТГ}}. \quad (15)$$

Зародыш начнёт перекачиваться, когда момент  $M_1 > M_2$ . Для определения угла  $\theta$ , на который должна повернуться тарель, чтобы зародыш начал перекачиваться по борту, приравняем эти моменты и составим равенство с учётом формул (10) – (12), (14):

$$(mg \cdot \sin\gamma \cdot \sin\theta) h_{зр}/2 = m\omega^2 R \cdot h_{зр}/2 + (\mu_{Тр.П} mg \cdot \cos\gamma) h_{зр}/2 + (mg \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta) h_{зр}/2. \quad (16)$$

После преобразований получим уравнение:

$$g \cdot \sin\gamma \cdot \sin\theta - \omega^2 R - \mu_{Тр.П} g \cdot \cos\gamma - g \cdot \sin\gamma \cdot \cos\theta = 0. \quad (17)$$

Решая уравнение (17) относительно угла  $\theta$  получим выражение для его расчёта (18):

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctg \left[ \frac{-g\mu_{Тр.П} \cos\gamma - R\omega^2 + \sqrt{-g^2(\mu_{Тр.П}^2 + 2)\cos\gamma - 2Rg\mu_{Тр.П}\omega^2 \cos\gamma - R^2\omega^4 + 2g^2}}{2\sin\gamma} \right].$$

Расчёты угла  $\theta$  для тарели радиусом 2,5 м при заданных значениях коэффициента трения, угла наклона тарели и частоты вращения представлены в таблице 4.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с ростом  $\mu_{Тр.П}$  угол  $\theta$  увеличивается и перекат зародыша возможен в квадранте II. Если возможности воздействия на режим переката с помощью  $\mu_{Тр.П}$  ограничены, то аналогичный эффект даёт увеличение частоты вращения тарели, что хорошо согласуется с опытными данными.

С увеличением угла наклона тарели к горизонту  $\gamma$  напротив – можно снизить величину угла  $\theta$ , если появилась производственная необходимость, и организовать перекачивание зародышей в первом квадранте тарели.

Результаты расчётов позволяют расширить технологические возможности окомкователя и подобрать режим доокомкования зародышей для технологии ЗНД при изменении исходных данных.

Таблица 4 – Результаты расчёта угла  $\theta$

$\mu_{\text{Тр.П}}$	$\gamma$ , градус	Угол $\theta$ , градус, при частоте вращения $n$ , об/мин:							
		3	4	5	6	7	8	9	10
0,6	30	30	133	144	153	160	165	170	180
	34	34	58	73	98	125	145	157	164
	38	30	34	42	56	84	120	145	158
	42	21	23	26	31	39	57	91	130
	46	17	18	20	22	26	32	44	71
	50	15	15	16	18	20	23	29	39
	53	13	14	15	16	17	20	23	29
0,8	30	180	180	180	180	180	180	180	180
	34	169	171	180	180	180	180	180	180
	38	154	159	162	166	169	180	180	180
	42	110	124	137	148	156	162	167	172
	46	47	56	71	94	121	141	153	161
	50	28	30	35	43	57	83	116	141
	53	21	23	25	29	36	47	68	104
1,0	30	180	180	180	180	180	180	180	180
	34	180	180	180	180	180	180	180	180
	38	166	168	170	180	180	180	180	180
	42	148	153	158	162	166	169	180	180
	46	90	105	122	138	149	157	163	168
	50	40	46	56	73	99	126	145	156
	53	27	30	34	41	54	77	109	136

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 6. – С. 9 – 13.
2. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 6. – С. 15 – 20.

В.М. Павловец, А.В. Герасимук

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

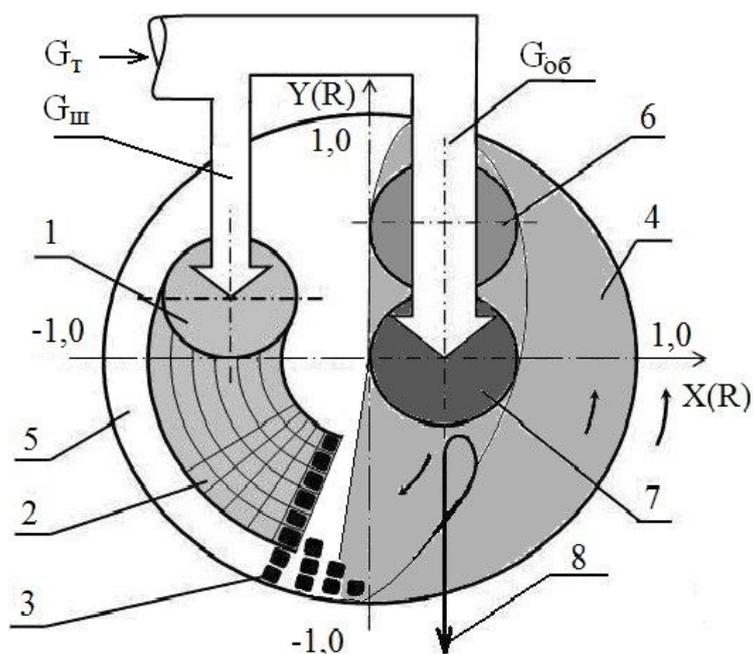
## МЕТОДИКА РАСЧЁТА ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОШИХТОВОЙ СТРУИ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ, ОСНОВАННОЙ НА ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ

Для перспективных технологических схем получения железорудных окатышей методом принудительного зародышеобразования рассчитано давление воздушно-шихтовой струи и построена номограмма для определения параметров струйной обработки.

For Prospective Technological schemes for iron ore pellets by force for nucleation-designed air-pressure jet feedstock and a nomogram.

Технология получения сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает две основные стадии: формование зародышей теплосиловым напылением влажной шихты на гарнисаж холостой зоны тарели и формирование оболочки окатышей доокомкованием зародышей в рабочей зоне окомкователя. Для этого загружаемую шихту расходом  $G_T$  (производительность агрегата) делят на два потока: поток шихты с расходом  $G_{ш}$ , необходимый для принудительного зародышеобразования, и поток шихты с расходом  $G_{об}$ , направляемый к зародышам для формирования оболочки окатышей. Для получения зародышей в струйный аппарат (СА) диаметром  $d_{са}$  загружают влажную шихту расходом  $G_{ш}$ , кг/с. В корпусе СА она ускоряется сжатым воздухом, нагретым до температуры  $t_v$ , °С, который подаётся под давлением  $P_v$ , кПа, через воздушное сопло, расположенное на оси СА. На выходе из СА формируется воздушно-шихтовая струя (ВШС), которая при взаимодействии с шихтовым гарнисажом окомкователя оказывает давление  $P_{вшс}$ , кПа, на влажную шихту (рисунок 1) [1-3].

Это давление ответственно за формообразование влажной шихты и определяет геометрические размеры напылённого слоя шихты (НС). После деления НС на мерные фрагменты формируется зародышевая масса определённой влажности, плотности и прочности, непосредственно зависящих от давления ВШС. Зародыши, полученные по этой технологии, являются шихтовой матрицей для формирования оболочки окатышей традиционным доокомкованием, основанным на перекате зародышевой массы и влажной шихты на поверхности шихтового гарнисажа в рабочей зоне окомкователя.



1 – область напыления (напыленный слой); 2 – область принудительного зародышеобразования; 3 – зародыши; 4, 5 – рабочая и холостая зоны окомкователя; 6, 7 – области увлажнения и доокомкования; 8 – годные окатыши

Рисунок 1 – Схема получения окатышей способом принудительного зародышеобразования

Целью работы является создание методики расчёта давления ВШС, необходимого для реализации технологии принудительного зародышеобразования, и построение номограммы для определения давления ВШС, используя входные параметры струйного процесса.

За основу расчёта взяли известное уравнение, согласно которому среднее давление ВШС, называемое удельной силой удара (далее давление)  $P_{\text{вшс}}$ , Па, на произвольно ориентированную поверхность шихтового гарнисажа определяется по выражению [4]:

$$P_{\text{вшс}} = (\zeta \cdot J \cdot \sin\beta / F) - P_{\text{г}}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – коэффициент потерь импульса;  $J$  – импульс ВШС (сила давления струи), Н;  $F$  – поперечное сечение ВШС в области напыления шихты на шихтовом гарнисаже,  $\text{м}^2$ ;  $\beta$  – угол атаки ВШС к гарнисажу, град;  $P_{\text{г}}$  – геометрическое (Архимедово) давление нагретого воздуха в ВШС, Па.

Импульс ВШС рассчитывали по формуле:

$$J = W_{\text{вшс}} \cdot G_{\text{вшс}}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{вшс}}$  – скорость истечения воздушно-шихтовой струи из сопла струйного аппарата, м/с;  $G_{\text{вшс}}$  – массовый расход воздушно-шихтовой смеси в СА, кг/с.

Скорость истечения воздушно-шихтовой смеси из струйного аппарата с цилиндрической камерой смешения рассчитали на основе закона сохранения импульса [5]:

$$W_{\text{вшс}} = \varphi \cdot (G_{\text{в}} \cdot W_{\text{в}} + G_{\text{ш}} \cdot W_{\text{ш}} + \int \text{Pdf}) / (G_{\text{в}} + G_{\text{ш}}), \quad (3)$$

где  $\varphi$  – коэффициент потерь давления воздушношихтовой смеси в корпусе СА из-за трения [5];  $G_{\text{в}}$ ,  $G_{\text{ш}}$  – массовые расходы воздуха и шихты, кг/с; Их суммированием определяли  $G_{\text{вшс}}$ ;  $W_{\text{в}}$ ,  $W_{\text{ш}}$  – скорости истечения воздуха из воздушного сопла и шихты из приёмного бункера СА, соответственно, м/с;  $\int \text{Pdf}$  – интеграл импульса по боковой поверхности СА. Для цилиндрической камеры смешения  $\int \text{Pdf} = 0$  [5].

Учитывая, что  $G_{\text{в}} = G_{\text{ш}} / \mu$ , где  $\mu$  – отношение массового расхода шихты к массовому расходу воздуха в воздушношихтовой смеси (массовая концентрация) [4], получим:

$$W_{\text{вшс}} = \varphi \cdot (W_{\text{в}} + W_{\text{ш}} \cdot \mu) / (1 + \mu). \quad (4)$$

В расчётах приняли, что скорость истечения шихты в приёмном патрубке СА не превышала 0,5 м/с.

Скорость истечения воздуха из воздушного сопла СА определяли по уравнению Сен-Венана [5]:

$$W_{\text{в}} = \Omega \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_{\text{в}} \left[ 1 - (P_0 / P_{\text{в}})^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \quad (5)$$

где  $\Omega$  – коэффициент скорости. Для канала конической сходящейся формы с односторонним углом конусности, равным  $6^\circ$ , величина  $\Omega = 0,96$ ; Для канала цилиндрической формы  $\Omega = 0,82$  [5];  $\kappa$  – показатель адиабаты (для влажного воздуха  $\kappa = 1,32$  [5];  $R$  – удельная газовая постоянная (для воздуха  $R = 287$  Дж/(кг·К));  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха на выходе из сопла, К.  $T_{\text{в}} = t_{\text{в}} + 273$ ;  $P_0$  – давление окружающей среды, кПа.  $P_0 = 101,325$  кПа;  $P_{\text{в}}$  – давление воздуха на выходе из сопла, кПа.

Давление  $P_{\text{в}}$  и температура воздуха  $t_{\text{в}}$  являются основными входными параметрами струйного процесса.

Коэффициент потерь  $\varphi$  учли в расчёте через вычисление потерь скорости воздушношихтовой смеси в корпусе СА:

$$\Delta W_{\text{вшс}} = W_{\text{вшс}}^0 \sqrt{0,5 \cdot \lambda_{\text{в}} (1 + \varphi_0 \cdot \mu) \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{вшс}}} \cdot \frac{L_{\text{са}}}{d_{\text{са}}^0}}, \quad (6)$$

где  $W_{\text{вшс}}^0$  – скорость воздушношихтовой смеси без учёта потерь на трение, м/с;  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент гидравлического трения воздуха о стенки СА;  $\varphi_0$  – эмпирический коэффициент, учитывающий концентрацию ( $\mu$ ) дисперсной фазы в воздушношихтовом потоке [4];  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{вшс}}$  – плотность воздушношихтовой смеси в корпусе СА;  $L_{\text{са}}$ ,  $d_{\text{са}}^0$  – длина и диаметр корпуса СА, м.  $L_{\text{са}} / d_{\text{са}}^0 = 5$ .

Коэффициент гидравлического трения воздуха о стенки СА определяли по формуле А.Д. Альтшуля [4]:

$$\lambda_{\text{в}} = 0,11 \{ (k / d_{\text{са}}^0) + (68 / \text{Re}) \}^{0,25}, \quad (7)$$

где  $k$  – шероховатость металлической стенки СА, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса.

Плотность воздушношихтовой смеси в корпусе СА определяли по выражению:

$$\rho_{\text{вшс}} = (G_{\text{ш}} + G_{\text{в}}) / (V_{\text{в}} + V_{\text{ш}}), \quad (8)$$

где  $V_{\text{ш}}$  – объемный расход шихты, м<sup>3</sup>/с. Его определяли экспериментально по времени истечения шихты из загрузочного бункера известного объема.

С учётом параметра  $\mu$  формула (8) приобретает следующий вид:

$$\rho_{\text{вшс}} = (\mu G_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} + \rho_{\text{в}} G_{\text{ш}}) / \mu \cdot (G_{\text{ш}} + G_{\text{ш}} / \mu). \quad (9)$$

Расход шихты задавали от 0,036 кг/с до 6,036 кг/с с шагом в 0,5 кг/с.

Поперечное сечение ВШС  $F$ , м<sup>2</sup>, в области напыления шихты на гарнисаж окомкователя определяли по уравнению:

$$F = \pi \{d_{\text{сa}} + 2L \cdot \text{tg}(\alpha / 2)\}^2 / 4, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – угол раскрытия струи, градусы;  $d_{\text{сa}}$  – диаметр выходного сечения сопла СА, м;  $L$  – расстояние от среза сопла СА до шихтового гарнисажа окомкователя, м.

В расчётах давления ВШС и построения номограммы использовали безразмерное расстояние струи  $L/d_{\text{сa}}$ .

Угол раскрытия струи вычисляли по эмпирическому выражению:

$$\alpha = 10^{-4} \cdot \mu^2 - 0,1156 \cdot \mu + 20,118. \quad (11)$$

В расчётах учитывали, что пропускная способность СА по расходу шихты зависела от диаметра сопла струйного аппарата и находилась в следующем соотношении:

$$G_{\text{ш}} = 0,036 \text{ кг/с} - d_{\text{сa}} = 0,02 \text{ м}; \quad G_{\text{ш}} = 0,63 \text{ кг/с} - d_{\text{сa}} = 0,06 \text{ м};$$

$$G_{\text{ш}} = 1,53 \text{ кг/с} - d_{\text{сa}} = 0,10 \text{ м}; \quad G_{\text{ш}} = 3,036 \text{ кг/с} - d_{\text{сa}} = 0,20 \text{ м};$$

Геометрическое давление нагретого воздуха учитывали в расчётах при встречном совпадении вектора силы ВШС и подъёмной силы воздуха на вертикальной оси ВШС. Его вычисляли по формуле:

$$P_{\text{г}} = L_1 \cdot [\rho_{\text{ос}} - \{ \rho_0 / (1 + \alpha_t \cdot t_{\text{ос}}) \}] + L_2 \cdot [\rho_{\text{ос}} - \{ \rho_0 / (1 + \alpha_t \cdot t_{\text{с}}) \}] \quad (12)$$

где  $L_1, L_2$  – длины начального и основного участков ВШС, м;

$L_1 = 4,4 \cdot d_{\text{сa}}; L_2 = L - L_1; \rho_{\text{ос}}$  – плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{\text{с}}$  – среднemasсовая температура воздуха в ВШС, °С;  $t_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды, °С.

Индекс 0 в параметрах формулы (12) соответствует нормальным физическим условиям.

Среднemasсовую температуру воздуха в ВШС определяли по следующей формуле:

$$t_{\text{с}} = (t_{\text{в}} - t_{\text{ос}}) \cdot [0,7 / \{0,159 \cdot (L_{\text{с}} / d_{\text{сa}}) + 0,29\}] + t_{\text{ос}}, \quad (13)$$

где  $L_{\text{с}}$  – расстояние от среза сопла СА до точки нахождения среднemasсовой температуры воздуха в ВШС, м.

Оно определяется по аналогии с известным выражением, позволяющем определить центр масс сложной фигуры [6]:

$$L_{\text{с}} = (A_1 \cdot L_{\text{с1}} + A_2 \cdot L_{\text{с2}}) / A, \quad (14)$$

где  $L_{\text{с1}}$  – расстояние от среза сопла до точки нахождения среднemasсовой температуры начального участка струи, м;  $L_{\text{с2}}$  – расстояние от начала основного участка струи до точки среднemasсовой температуры этого участка, м;  $A_1$  – площадь осевого сечения начального участка (по оси  $L$ ), м<sup>2</sup>;  $A_2$  – площадь

осевого сечения основного участка (по оси L), м<sup>2</sup>; A – площадь осевого сечения всей ВШС (по оси L), м<sup>2</sup>.

Площади A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A определяли по следующим формулам:

$$A_1 = 0,5 \cdot (d_{ca} + D_1) \cdot L_1; A_2 = 0,5 \cdot (D + D_1) \cdot L_2; A = 0,5 \cdot (d_{ca} + D) \cdot L; \quad (16)$$

где D<sub>1</sub>, D – диаметры струи на расстоянии L<sub>1</sub> и L от среза сопла, м. Их можно определить, используя формулу (10). L<sub>c1</sub> определяется по аналогии с известным выражением, позволяющем определить центр масс равнобедренной трапеции [6]:

$$L_{c1} = (d_{ca} + 2D_1)L_1 / [3(d_{ca} + D_1)]. \quad (17)$$

L<sub>c2</sub> определяется по аналогии с известным выражением, позволяющем определить центр масс плоской фигуры переменной плотности [7]:

$$L_{c2} = \left( \iint_S X \cdot \rho(X, Y) dS \right) / \left( \iint_S \rho(X, Y) dS \right), \quad (18)$$

где X, Y – текущие координаты ВШС по осям L и D; ρ(X, Y) – функциональная зависимость плотности воздуха от температуры на текущих координатах, кг/м<sup>3</sup>. Она имеет следующий вид:

$$\rho(X, Y) = \frac{\rho_0}{1 + \alpha \cdot \left[ (t_B - t_{oc}) \cdot \left( \frac{0,7}{0,159 \cdot \frac{X}{d_{ca}} + 0,29} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot Y}{D} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + t_{oc} \right]}. \quad (19)$$

С учётом формулы (19) формула (18) примет вид:

$$L_{c2} = \frac{\iint_{L_1 a}^{L b} \frac{X \cdot \rho_0}{1 + \alpha \cdot \left[ (t_B - t_{oc}) \cdot \left( \frac{0,7}{0,159 \cdot \frac{X}{d_{ca}} + 0,29} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot Y}{D} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + t_{oc} \right]} dXdY}{\iint_{L_1 a}^{L b} \frac{\rho_0}{1 + \alpha \cdot \left[ (t_B - t_{oc}) \cdot \left( \frac{0,7}{0,159 \cdot \frac{X}{d_{ca}} + 0,29} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{2 \cdot Y}{D} \right)^{\frac{3}{2}} \right] + t_{oc} \right]} dXdY}. \quad (20)$$

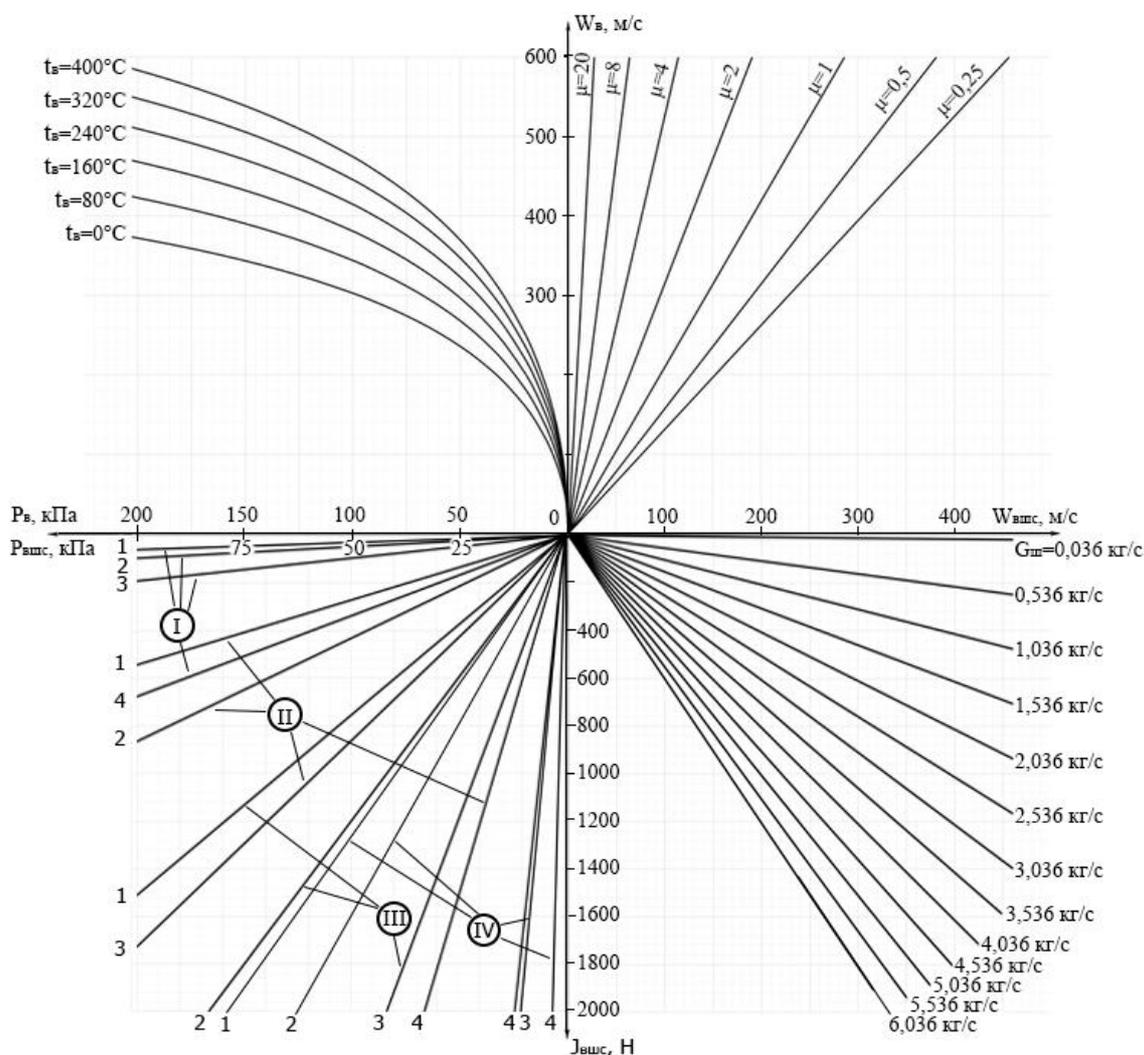
где R=D/2 – наибольший радиус струи, м; a, b – пределы интегрирования; b = R + R<sub>1</sub> + (C-L<sub>1</sub>) · tg(α / 2); a = R – R<sub>1</sub> – (C – L<sub>1</sub>) · tg(α / 2);

В формулах (18-22) X и Y соответствуют текущим значениям L и D.

Расчёты выполняли с использованием программы Microsoft Exel 2013 и пакетов программ компьютерной алгебры RTC MathCAD Prime 3.0 и Maple 17. Результаты расчётов в виде номограммы, позволяющей определить давление ВШС по входным параметрам струйного процесса (P<sub>B</sub>, t<sub>B</sub>, μ, G<sub>ш</sub>, d<sub>ca</sub>, L/d<sub>ca</sub>) при β=90°, показаны на рисунке 2.

Особенностью номограммы является то, что струйные аппараты с различными d<sub>ca</sub> при постоянном значении L/d<sub>ca</sub> позволяют генерировать давление

ВШС в достаточно узких пределах. При  $L/d_{ca} > 10$  и уменьшении угла атаки струи давление ВШС резко падает, что предполагает изменение пределов шкалы давления и построения новой номограммы.



Диаметр СА: I – 0,02 м, II – 0,06 м, III – 0,1 м, IV – 0,2 м

Безразмерное расстояние ( $L/d_{ca}$ ): 1 – 1; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 10.

Рисунок 2 – Номограмма для выбора давления ВШС и диаметра СА при заданных параметрах струйного процесса

Методика определения ВШС по полученной номограмме требует знания основных входных параметров струйного процесса:  $P_v$ ,  $t_s$ ,  $\mu$ ,  $G_{shc}$ ,  $d_{ca}$ ,  $L/d_{ca}$  по которым последовательно вычисляются  $W_v$ ,  $W_{vshc}$ ,  $J_{vshc}$ ,  $P_{vshc}$ . Пример зависимости показателей струйного процесса ( $K$  – коэффициент напыления шихты, %) и параметров напылённого слоя шихты ( $d/d_{ca}$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\Pi$  – относительный диаметр, высота, плотность, прочность НС на его оси, соответственно) от  $P_{vshc}$  в технологии получения окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании, приведён на рисунке 3.

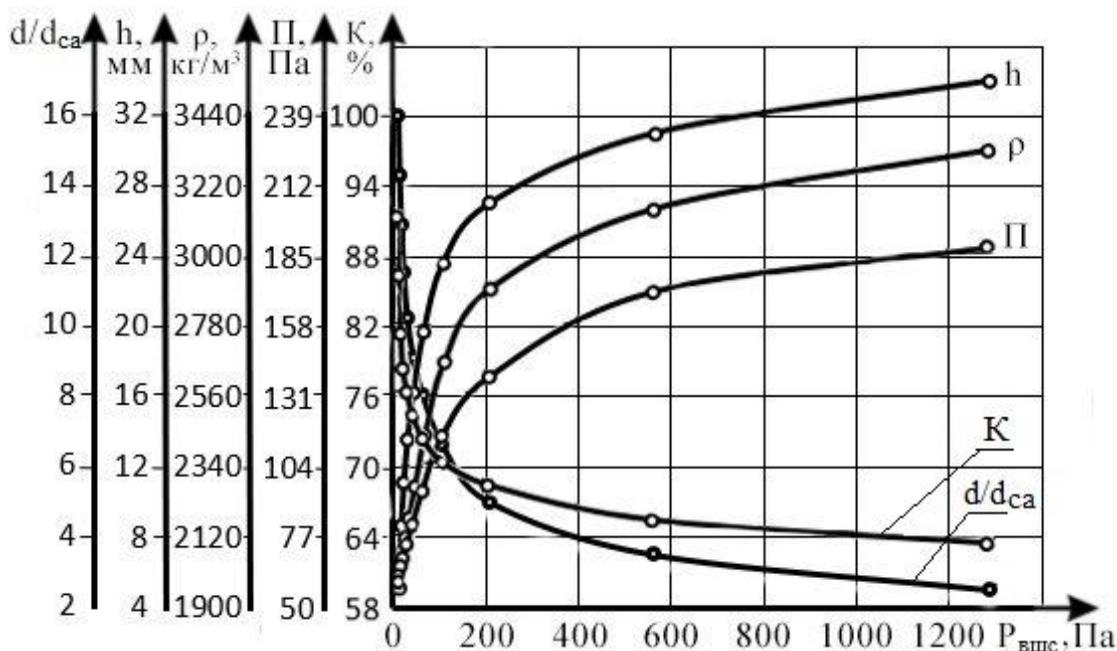


Рисунок 3 – Зависимость показателей струйного процесса и параметров напылённого слоя шихты от давления ВШС

Экспериментальные данные для расчёта  $P_{вщс}$  получены в лабораторных условиях при  $P_b = 20$  кПа,  $t_b = 18$  °С,  $\mu = 7$ ,  $G_{ш} = 0,07$  кг/с,  $d_{ca} = 0,02$  м. Причём, главным параметром, влияющим на  $P_{вщс}$  в указанных опытах, является изменение величины  $L/d_{ca}$  от 2,5 до 50. Уравнения регрессии, полученные по экспериментальным данным, представлены ниже:

$$d/d_{ca} = 54 \cdot (P_{вщс} + 4,5)^{-0,45}, R^2 = 0,996; h = - [0,0635 / (P_{вщс} + 66)^{0,077}] \cdot \ln(P_{вщс} - 8)^{-17} - 11, R^2 = 0,992; \rho = 307,37 \cdot \ln P_{вщс} + 1173, R^2 = 0,987; \Pi = 29,937 \cdot \ln P_{вщс} - 26,119, R^2 = 0,987; K = 200 \cdot (P_{вщс} - 6)^{-1,4} + 74,2, R^2 = 0,996.$$

Как было установлено, величина рабочего давления  $P_{вщс}$  зависит от заданной регламентированной структуры окатышей и существенно влияет на показатели струйного процесса ( $K, \%$ ) и параметры напылённого слоя шихты. В частности, повышая давление ВШС свыше 1219 кПа ( $L/d_{ca} < 2,5$ ) можно повысить прочность НС до 200 кПа, плотность НС до  $3400 \text{ кг/м}^3$ , а высоту НС увеличить с 4 до 32 мм. При этом относительный диаметр НС ( $d/d_{ca}$ ) уменьшается с 16 до 3, а коэффициент напыления снижается с 91 до 68 %. Если предполагается получать окатыши с зародышевым центром, у которого плотность меньше плотности окатышей ( $\rho_{зр} < \rho_{ок}$ ,  $\rho_o = 3200 \text{ кг/м}^3$ ), то рабочее давление для вышеуказанных исходных данных должно быть менее 600 Па. Недостатком этого режима напыления может быть относительно малое влагоудаление  $\Delta W$  из зародышей при формировании напылённого слоя шихты, например,  $\Delta W < 0,5-1,0 \%$  (абс.). Для получения окатышей с регламентированными свойствами, плотность зародышей которых выше плотности окатышей ( $\rho_{зр} > \rho_{ок}$ ), то рабочее давление ВШС должно превышать 600 Па. В этом режиме напыления, напротив, можно получить относительно высокое влагоудаление  $\Delta W$  ( $\Delta W > 0,5-1,0 \%$  (абс.)) из зародышей при формировании НС, но в этом случае следует учитывать нерациональную форму НС. Это связано с

тем, что относительный диаметр НС очень низкий ( $d/d_{ca} < 3$ ), а его высота, напротив, чрезмерно высокая ( $h > 30$  мм). Этими обстоятельствами, в решающей степени, объясняется уменьшение коэффициента напыления шихты с 91 до 68 %. Рациональный профиль напылённого слоя шихты должен, в первую очередь, опираться на оптимальную высоту напылённого слоя, которая, по данным предыдущих исследований, должна составлять 5,6 - 10,4 мм. Эта высота напылённого слоя шихты при заданных значениях  $G_{ш}$  и  $L/d_{ca}$  ориентирует нас на определённое значение  $d/d_{ca}$ . Дальнейшее проектирование режима напыления требует анализа плотности и прочности НС, что, в свою очередь, предполагает корректировку этих параметров путём подбора  $\mu$  и  $R_v$ . Последний параметр можно использовать в совокупности с повышенной температурой воздуха, однако, в этом случае, выходные параметры технологии изменяются. В частности, коэффициент напыления, геометрические размеры НС снижаются, но плотность и прочность НС существенно возрастают. Это, в свою очередь, требует либо поправочных коэффициентов, либо экспериментальных связей между  $R_{вшс}$  и параметрами технологии, которые могут составить предмет дальнейших исследований.

Таким образом, в результате разработанной методики расчёта давления воздушно-шихтовой струи и информации, полученной на основе выполненных расчётов, построен комплекс номограмм, позволяющих выбрать необходимое давление ВШС по входным параметрам струйного процесса, напылённого слоя шихты и характеристикам зародышевой массы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – №4. – С. 3 – 6.

2. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразования / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – №6. – С. 9 – 13.

3. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования / В.М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – №6. – С. 15 – 20.

4. Альтшуль А.Д. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие / А.Д. Альтшуль [и др.]. – М: Стройиздат, 1977. – 255 с.

5. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

6. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Часть 1 / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1966. – 429 с.

7. Демидович Б.П. Краткий курс высшей математики. Учебное пособие для вузов / Б.П. Демидович, В.А. Кудрявцев. – М.: Астрель; АСТ, 2001. – 656 с.

Н.А. Козырев, Д.В. Бойков, А.А. Уманский

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ЦЕХЕ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» НА КАЧЕСТВО РЕЛЬСОВОГО ПРОКАТА

В условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования влияния технологических параметров внепечной обработки рельсовой стали на содержание кислорода в расплаве. Установлено, что использование режимов обработки рельсовой стали на агрегате «ковш-печь» с увеличенной продолжительностью продувки инертными газами приводит к уменьшению количества оксидных неметаллических включений и, при этом, не происходит ухудшения качества рельсового проката по другим контролируемым параметрам.

In terms of the electric steelmaking plant «EVRAZ ZSMK» studied the effects of technological parameters of rail steel ladle treatment on the oxygen content in the melt. It has been established that the use of treatment regimes on the unit rail steel "ladle furnace" with increased duration of the purge inert gases reduces the amount of oxide non-metallic inclusions and, thus, there is no deterioration of rail steel by other controllable parameters.

Проблема повышения эксплуатационной стойкости рельсов является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед производителями рельсового проката. При этом большинство исследователей сходятся во мнении, что наиболее значимое влияние на эксплуатационную стойкость рельсов оказывает загрязненность стали хрупкоразрушенными оксидными неметаллическими включениями [1-3]. Такие дефекты представляют наибольшую опасность с точки зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов.

Таким образом, проблема снижения концентрации хрупкоразрушенных оксидных включений в рельсовом металле является на сегодняшний день актуальной.

Концентрация хрупкоразрушенных оксидных неметаллических включений в рельсах напрямую определяется общим содержанием кислорода в стали. Ранее проведенными исследованиями [4, 5] установлено, что морфология образующихся оксидных включений в значительной степени определяется концентрацией кислорода. Так при содержании кислорода в готовых рельсах

менее 25 ppm встречаются в основном строчки хрупкоразрушенных алюминатов кальция ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) – рисунок 1, максимальная длина которых включений не превышает 10 мкм.



Рисунок 1 – Алюминаты кальция,  $\times 500$

При концентрации кислорода на уровне 40 ppm количество хрупкоразрушенных оксидных включений заметно уменьшается и возрастает доля деформируемых силикатов ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ) – рисунок 2, длина которых составляет от 0,12 до 0,30 мм. При дальнейшем увеличении содержания кислорода неметаллические включения представлены в основном силикатами длиной от 0,25 до 0,53 мм.



Рисунок 2 – Силикаты,  $\times 100$

С целью определения характера и степени влияния технологических параметров производства и обработки стали на содержание общего кислорода в рельсовом прокате в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнено исследование методом пассивного эксперимента. Объектом исследования явилась случайная выборка из 190 плавов рельсовой стали марки Э76Ф текущего производства.

Технология производства рельсовой стали в электросталеплавильном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» включает в себя выплавку в дуговых сталеплавильных печах емкостью 100 т каждая с последующей внепечной обработкой на агрегатах «ковш-печь» (АКП) и вакуумматоре камерного типа и разливку на блюмовой МНЛЗ.

Анализировали влияние следующих технологических параметров:

- содержание углерода в стали перед выпуском из печи;
- содержание кремния в стали в первой пробе на АКП;
- расход коксовой мелочи при раскислении стали на выпуске;
- расход силикомарганца при раскислении стали на выпуске;
- продолжительность продувки инертным газом при обработке на АКП;
- продолжительность обработки стали на вакууматоре.

Использовали методику парного регрессионного анализа, сущность которой заключается в следующем:

Уравнение прямой регрессии, выражающее взаимосвязь переменных имеет общий вид:

$$Y = a \cdot X + b, \quad (1)$$

где  $X$  и  $Y$  – независимая и зависимая переменные соответственно;  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$a = r_{XY} \cdot \frac{S_Y}{S_X}; \quad b = \bar{Y} - a \cdot \bar{X} \quad (2)$$

где  $r_{XY}$  – парный коэффициент корреляции между переменными;  $S_Y$ ,  $S_X$  – средние квадратические отклонения переменных;  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$  – средние арифметические значения переменных.

Парный коэффициент корреляции определяется из выражения:

$$r_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{S_X \cdot S_Y}; \quad (3)$$

где  $n$  – количество наблюдений в выборке.

При нелинейной взаимосвязи между переменными в зависимости от вида нелинейной функции используют различные методы расчета коэффициентов уравнения регрессии.

Для полинома второго порядка  $Y = b + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2$  расчет коэффициентов уравнения регрессии производится путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Y_i = n \cdot a + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i + c \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot X_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n X_i^3 \\ \sum_{i=1}^n Y_i \cdot X_i^2 = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n X_i^4 \end{cases} \quad (4)$$

Для решения приведенной системы уравнений используют метод Крамера, согласно которому:

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta}; \quad b = \frac{\Delta b}{\Delta}; \quad c = \frac{\Delta c}{\Delta}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – определитель системы;  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  – определители, полученные путем замены соответствующего столбца на столбец свободных членов.

Проверка надежности полученных уравнений регрессии производится путем сравнения коэффициентов корреляции (детерминации) с критическими значениями согласно табличных данных.

Надежность методики применительно к металлургическим процессам подтверждена ранее проведенными работами [6, 7].

Проведенным анализом установлено значимое влияние на содержание общего кислорода в металле длительности продувки металла на установке «ковш-печь» (рисунок 3) и расхода силикомарганца при раскислении стали на выпуске из печи (рисунок 4).

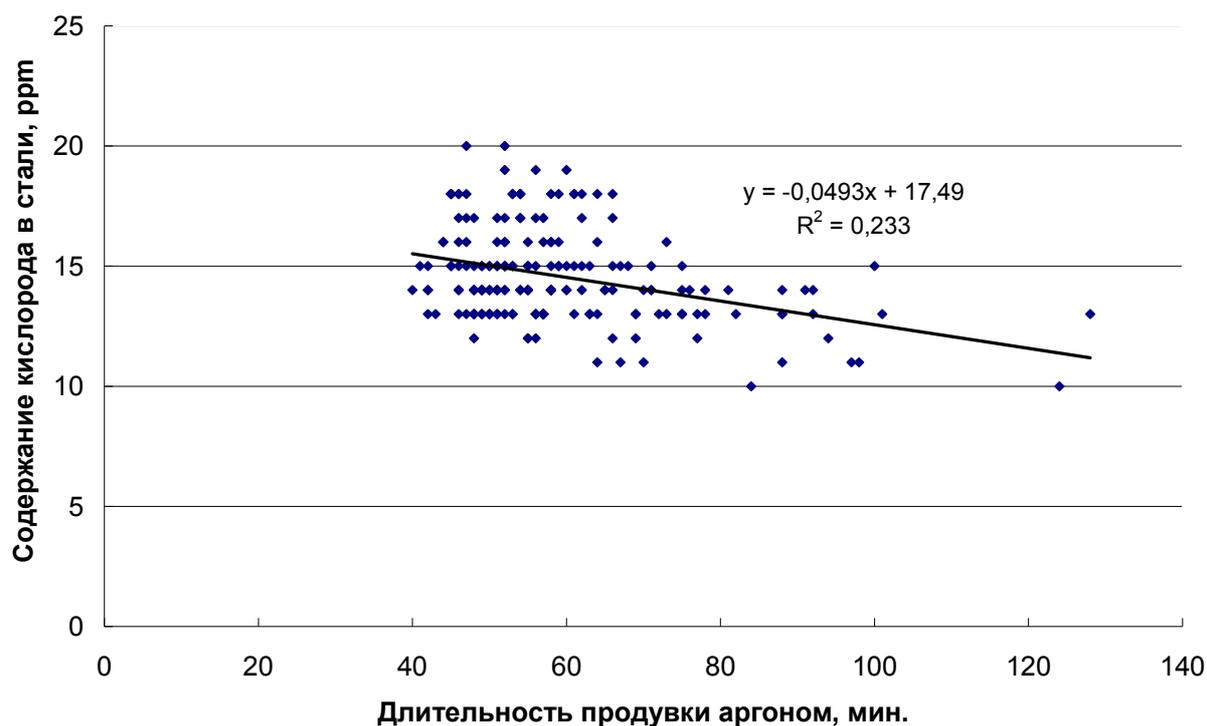


Рисунок 3 – Влияние длительности продувки аргоном на АКП на содержание кислорода в рельсовой стали

Остальные анализируемые параметры по полученным данным не оказывают значимого влияния на параметр оптимизации.

По полученным данным при увеличении длительности продувки стали на АКП наблюдается снижение концентрации общего кислорода в металле. Поскольку общее содержание кислорода в стали складывается из растворенного в металле кислорода и кислорода, связанного в неметаллические включения, то, очевидно, полученная зависимость (рисунок 3) обусловлена снижением именно количества оксидных неметаллических включений.

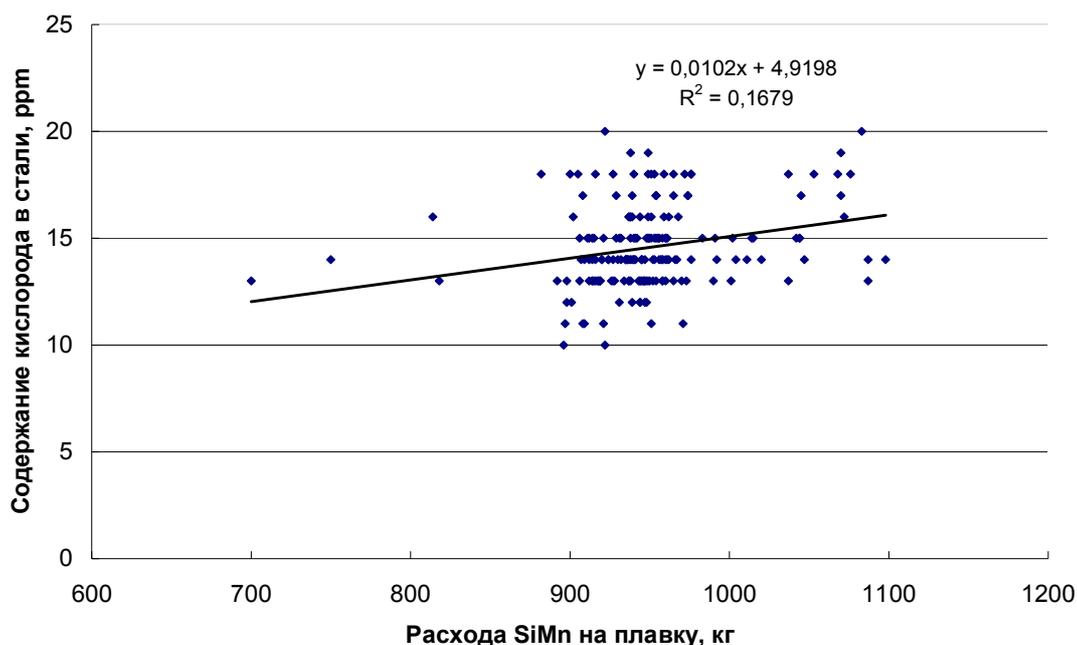


Рисунок 4 – Влияние расхода силикомарганца на выпуске из печи на содержание кислорода в рельсовой стали

При продувке стали в ковше инертными газами происходит перенос неметаллических включений в жидкий шлак газовыми пузырьками с последующей ассимиляцией включений шлаком. Процесс переноса включений пузырьками газа обусловлен общим свойством не смачиваемых жидкостью твердых частиц прилипать к находящимся в жидкости пузырькам газа – флотацией. При этом степень флотируемости зависит от размера частиц – при увеличении размеров включений степень флотируемости возрастает.

С точки зрения термодинамики процесса перехода неметаллических включений из металла в шлак лимитирующим звеном, определяющим эффективность очистки стали от включений, является стадия отрыва их от границы металл-шлак. Переход неметаллических включений с межфазной границы в шлак сопровождается повышением энергии Гиббса в системе металл-включение-шлак и поэтому является термодинамически невозможным. Однако в реальных условиях этот процесс протекает за счет действия различных факторов кинетического характера. Поэтому для повышения эффективности удаления НВ из стали необходимо осуществлять интенсивное обновление слоев шлака, приграничных к металлу, за счет кинетических факторов, в частности, перемешивания, продувки металла инертным газом.

Отсутствие взаимосвязи между содержанием кислорода в стали и параметрами, характеризующими окисленность расплава (содержание углерода на выпуске из печи и содержание кремния в первой ковшевой пробе на АКП) обусловлено, изменением порядка присадки раскислителей. В настоящее время присадка коксовой мелочи осуществляют после присадки силикомарганца, то есть в раскисленный металл. Доказательством данного предположения является тот факт, что увеличение в процессе выпуска металла из печи присадок

силикомарганца приводит к увеличению содержания кислорода в готовой стали (рисунок 3).

Отсутствие зависимости содержания кислорода в стали от основности шлака в процессе обработки на АКП обусловлено достаточно узким интервалом изменения значений.

Таким образом, в ходе исследований выявлено положительное влияние увеличения длительности продувки инертным газом при обработке на АКП на загрязненность стали оксидными неметаллическими включениями.

Для определения технико-экономической эффективности увеличения длительности продувки аргоном на АКП проведена серия из 15 опытных плавов, на которых продолжительность продувки составляла не менее 100 мин. В качестве базы для сравнительного анализа использованы 19 плавов текущего производства, произведенных в этот же период.

По полученным данным (таблица 1) увеличение средней длительности продувки металла на агрегате «ковш-печь» с 63 мин. до 122 мин. привело к увеличению удельного расхода электроэнергии на АКП в среднем на 27,3 кВт×ч/т (с 64,9 кВт×ч/т до 92,2 кВт×ч/т стали) или на 42 % в относительном выражении. Удельный расход аргона при этом увеличился на 0,32 м<sup>3</sup>/т (с 0,24 м<sup>3</sup>/т до 0,46 м<sup>3</sup>/т) или на 92 % в относительном выражении.

Таблица 1 – Сравнительный анализ показателей плавов при различной длительности обработки на АКП

Наименование показателя	Опытные плавки (15 плавов)			Текущее производство (19 плавов)		
	min	max	сред.	min	max	сред.
1. Длительность продувки аргоном на АКП, мин	103	146	<b>122,4</b>	52	72	<b>63,0</b>
2. Длительность продувки азотом на АКП, мин	0	25	<b>5,5</b>	0	0	<b>0</b>
3. Суммарная длительность продувки на АКП, мин.	103	146	<b>126,4</b>	52	72	<b>63,0</b>
4. Расход аргона на продувку; м <sup>3</sup> /час, м <sup>3</sup> /т	15,9 0,27	43,2 0,72	<b>27,9</b> <b>0,46</b>	16,7 0,13	30,8 0,32	<b>26,1</b> <b>0,24</b>
5. Расход азота на продувку; м <sup>3</sup> /час, м <sup>3</sup> /т	0 0,07	38,61 0,142	<b>7,37</b> <b>0,10</b>	0 0	0 0	<b>0</b> <b>0</b>
6. Температура, °С; в начале обработки на АКП в конце обработки на АКП	1512 1614	1599 1623	<b>1549,1</b> <b>1619,5</b>	1496 1616	1611 1630	<b>1545,2</b> <b>1620,4</b>
7. Удельный расход электроэнергии на АКП, кВт·час/т	77,1	106,0	<b>92,2</b>	55,1	73,7	<b>64,94</b>
8. Присажено феррованадия азотированного, кг/т.	1,32	1,50	<b>1,44</b>	1,37	1,53	<b>1,44</b>

При этом качество рельсового проката опытных плавов удовлетворяет требованиям Регламента и нормативной документации по следующим параметрам:

- содержанию химических элементов;
- содержанию кислорода и водорода;
- качеству макроструктуры, загрязненности неметаллическими включениями;
- уровню механических свойств в состоянии после прокатки.

*Вывод.* В условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования влияния технологических параметров внепечной обработки рельсовой стали на содержание кислорода в расплаве. Установлено, что увеличение длительности продувки стали при обработке на агрегате «ковш-печь» с 63 до 122 мин. приводит к уменьшению количества оксидных неметаллических включений и, при этом, не происходит ухудшения качества рельсового проката по другим контролируемым параметрам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / А.А. Дерябин, А.В. Добужская // *Сталь*. – 2000. – № 11. – С. 38-43.
2. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте / А.А. Дерябин, В.А. Рабовский, Е.А. Шур // *Сталь*. – 2000. – № 11. – С. 82-85.
3. Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений / Б.В. Линчевский, С.Н. Варгпатрикова, В.Я. Дашевский, В.И. Кашин, Н.Н. Макарова // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 5. – С. 14-18.
4. Новая технология производства рельсовой стали / Н.А. Козырев, Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, Д.В. Бойков // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2012. – № 2. – С. 25-29.
5. Возможности улучшения качества рельсовой стали / Н.А. Козырев, Д.В. Бойков // *Электрометаллургия*. – 2012. – № 1. – С. 30-33.
6. Кадыков В.Н. Применение статистических моделей для оптимизации технологии производства заготовок из слитков / В.Н. Кадыков, А.А. Уманский // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2008. – № 6. – С. 20-22.
7. Кузнецов И.С. Влияние технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных сталей / И.С. Кузнецов, А.Е. Прахов, А.А. Уманский, Ю.Т. Рубцов // *Сталь*. – 2008. – № 4. – С. 43-45.

Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Д.В. Бойков

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ФЕРРОСПЛАВОВ ДЛЯ РАСКИСЛЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

Проведены опытно-промышленные испытания новой технологии раскисления рельсовой стали с использованием ферросплава FeMnSi30HP, имеющего пониженное содержание алюминия. Установлено, что использование новой технологии раскисления стали позволяет снизить содержание алюминия в рельсах на 8 ppm; увеличить степень сквозного усвоения при выплавке и внепечной обработке стали: углерода – на 4 %, кремния – на 13 %. При этом механические свойства готовых рельсов находятся на уровне плавов текущего производства и соответствуют требованиям нормативной документации, макроструктура рельсов соответствуют требованиям нормативной документации. Подтверждена экономическая эффективность от использования ферросплава марки FeMnSi30HP в текущих ценах.

Conducted pilot tests of the new technology of rail steel deoxidation using ferroalloy FeMnSi30HP, having a reduced content of aluminum. Found that the use of new technology to reduce steel deoxidation aluminum content in the rails 8 ppm; increase the degree of pass-through assimilation and the smelting furnace steel processing: carbon – 4 % silicon – 13 %. In this case, the mechanical properties of the finished rails are at the level of current production batches and meet regulatory requirements, macrostructure rails meet the requirements of regulatory documents. Confirmed the cost-effectiveness of the use of ferroalloy brand FeMnSi30HP at current prices.

Известно, что технология раскисления стали, а именно состав используемых раскислителей и порядок их ввода в сталь, оказывает определяющее влияние на морфологию образующихся неметаллических включений. Выбор оптимального состава раскислителей особенно важен при производстве качественных сталей и сталей специального назначения, в том числе рельсовых сталей. Так, например, при использовании для раскисления рельсовых сталей алюминия образуются тугоплавкие глобулярные неметаллические включения, оказывающие резко негативное влияние на контактно-усталостную стойкость рельсов [1-4].

Хрупкоразрушенные оксидные включения, представляющие собой в основном сложные окислы (алюминаты, силикаты, шпинели), при деформации способны вытягиваться в строчки, однако при достижении некоторого предельного значения степени деформации разрушаются. Образование контактно-усталостных дефектов рельсов происходит по следующей схеме (рисунок 1): в начальный момент в зоне скопления хрупкоразрушенных оксидных включений возникает продольная наклонная трещина, развитие которой приводит к отслоению металла – выкрашиванию металла на боковой выкружке головки (рисунок 1 а); затем данный дефект преобразуется в поперечные трещины (рисунок 1 б).

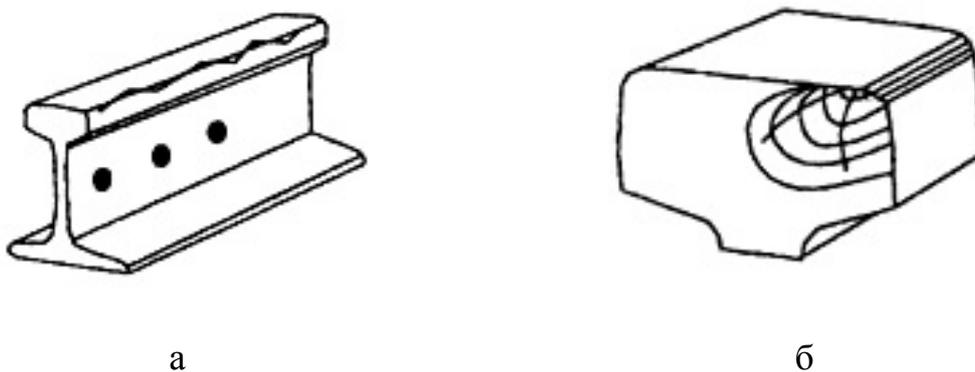


Рисунок 1 – Схема образования контактно-усталостных дефектов железнодорожных рельсов: а – начальный этап; б – конечный этап

По причине резко негативного влияния указанных неметаллических включений на эксплуатационную стойкость рельсов действующей нормативной документацией, распространяющейся на производство рельсового проката различных категорий, предусмотрена жесткая регламентация содержания хрупкоразрушенных оксидных включений (не более 10 ppm).

В связи с вышесказанным при производстве рельсовых сталей алюминий для раскисления не применяется, однако при этом проблема загрязненности металла хрупкоразрушенными включениями полностью не решена – алюминий в качестве побочного элемента вносится ферросплавами (ферросилиций, феррованадий).

Одним из путей решения указанной проблемы является использование новых видов ферросплавов с пониженным содержанием алюминия. При этом в связи с высокой стоимостью ферросплавов, расходы на которые занимают значительную долю в себестоимости производства рельсовой стали, необходимо учитывать и технико-экономическую эффективность перехода на новую технологию раскисления стали.

В электросталеплавильном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в настоящее время для раскисления рельсовой стали используются силикомарганец марки MnC18 и ферросилиций марки ФС65. С целью совершенствования технологии производства рельсовой стали была проведена серия опытно-промышленных плавов, при раскислении которых использовался силикомар-

ганец марки FeMnSi30HP производства ОАО «СГМК Ферросплав» взамен традиционно используемого силикомарганца марки MnC18 и ферросилиция марки ФС65. Химический состав ферросплавов согласно требований ГОСТ 4756-91 и ГОСТ 1415-93 представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав ферросплавов различных марок

Марка ферро-сплава	Массовая доля элементов в сплаве, %				
	Mn	Si	C	P	Al*
FeMnSi30HP (ГОСТ 4756-91)	более 57 до 67 включительно	более 28 до 35 включительно	не более 0,10	не более 0,20	-
MnC18 (ГОСТ 4756-91)	более 65 до 75 включительно	более 15 до 20 включительно	не более 0,35	не более 0,03	-
ФС65 (ГОСТ 1415-93)	не более 0,4	более 63 до 68 включительно	не более 0,1	не более 0,02	не более 2,5
*содержание Al в ГОСТ 4756-91 не оговаривается					

Кроме того, по результатам проведенного входного контроля установлено, что содержание алюминия в ферросплаве марки FeMnSi30HP составило 0,2 %.

На первом этапе с использованием указанного ферросплава провели 5 плавков рельсовой стали марки Э76Ф (категория Т1 – рельсы термоупрочненные). Выплавку, внепечную обработку и разливку металла опытных плавков производили в соответствии с требованиями действующей нормативной документации. Для сравнения были выбраны технологические параметры 27 плавков, выплавленных непосредственно до и после проведения опытных плавков.

По результатам проведенного промышленного эксперимента установлено следующее:

1. Среднее содержание кремния в металле опытных плавков перед обработкой на вакууматоре составило 0,319 % против 0,316 % на плавках сравнения;

2. Степень сквозного усвоения углерода и кремния в среднем увеличилась на 4 % и 13 % соответственно, что достигнуто за счет более глубокого раскисления металла в процессе выпуска из печи, обусловленного введением большего количества кремния. Так, на выпуске металла из печи усвоение углерода возросло почти в два раза и составило 49,67 % на опытных плавках против 24,60 % на плавках сравнения. Усвоение кремния увеличилось в 1,1 раза (93,60 % против 88,09 %).

3. Среднее содержание алюминия в металле опытных ниже по отношению к сравнительным плавкам на 0,0008 % (на 8 ppm) – 0,0022 % и 0,0029 % соответственно.

На втором этапе с целью подтверждения полученных результатов и комплексной оценки технико-экономической эффективности использования

ферросплава FeMnSi30HP проведена серия опытно-промышленных плавов, в том числе 62 плавки стали марки Э76Ф (категория Т1) и 19 плавов стали марки Э76Ф (шифр НЭ – рельсы низкотемпературной надежности).

Оценка механических свойств и макроструктуры рельсов, полученных при использовании опытной технологии, показала, что служебные характеристики металла соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685-2000 и ТУ 0921-118-01124328-2003 и находятся на уровне плавов текущего производства (таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Механические свойства горячекатаных рельсов

Параметр	Механические свойства при растяжении горячекатаных рельсов				Твёрдость на поверхности головки, НВ
	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$	$\Psi$	
	Н/мм <sup>2</sup>		%		
Средние значения на опытных плавках (категория Т1)	601,4	1085,0	11,26	17,04	326,9
Средние значения за 2012 г. (категория Т1)	628,5	1086,8	10,72	17,79	328,3
Средние значения на опытных плавках (категория НЭ)	665,0	1095,0	11,50	17,00	317,0
Средние значения за 2012 г. (категория НЭ)	691,4	1128,6	9,82	15,87	336,8
Требования ГОСТ Р 51685-2000	-	не менее		-	-
		900	5,0		

Расчет экономической эффективности провели исходя из фактически полученного расхода ферросплавов на опытных плавках при текущем уровне цен на ферросплавы. Расход ферросплавов при использовании опытной и существующей технологии раскисления рельсовой стали представлен в таблице 4.

Пониженный расход ферросилиция на опытных плавках получен в связи с тем, что содержание кремния ферросплаве FeMnSi30HP выше по сравнению с силикомарганцем МнС18. Также следует отметить, что применение незначительного количества силикомарганца марки МнС18 на опытных плавках (0,10-0,11 кг/т) было вызвано необходимостью корректировки массовой доли марганца в металле в процессе обработки на установке вакуумирования.

Таблица 3 – Механические свойства термоупроченных рельсов

Параметр	Механические свойства при растяжении рельсов			
	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\Psi$
	Н/мм <sup>2</sup>		%	
Средние значения на опытных плавках (категория Т1)	942,5	1270,0	11,25	32,0
Средние значения за 2012 г. (категория Т1)	920,4	1271,3	12,6	35,8
Средние значения на опытных плавках (категория НЭ)	920	1270	11	30
Средние значения за 2012 г. (категория НЭ)	911,6	1271,3	12,8	39,4
Требования ГОСТ Р 51685-2000	не менее			
	800	1180	8	25

Таблица 4 – Расход ферросплавов при производстве стали Э76Ф

Наименование ферросплава	Расход ферросплавов, кг/т		Отклонение, кг/т
	опытная технология	существующая технология	
категория Т1			
Силикомарганец МнС18	0,11	10,13	- 10,02
Ферросилиций ФС65	0,30	2,55	- 2,25
Силикомарганец FeMnSi30HP	12,16	0	+ 12,16
категория НЭ			
Силикомарганец МнС18	0,10	10,28	- 10,18
Ферросилиций ФС65	0,29	2,48	- 2,19
Силикомарганец FeMnSi30HP	11,76	0	+ 11,76

По полученным расчетным данным экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP для раскисления рельсовой стали Э76Ф составила: для категории Т1 – 13,99 руб/т стали; для категории – 32,64 руб/ т стали.

Таким образом, в результате проведенных в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» опытно-промышленных испытаний новой технологии раскисления рельсовой стали марки Э76Ф установлено:

- Использование ферросплава марки FeMnSi30HP взамен традиционно используемого силикомарганца марки МнС18 позволяет снизить содержание алюминия в рельсах на 8 ppm, увеличить степень сквозного усвоения углерода и кремния (на 4 % и 13 % соответственно);

- При использовании опытной технологии раскисления стали механические свойства готовых рельсов находятся на уровне плавок текущего производства и соответствуют требованиям нормативной документации, макроструктура рельсов соответствует требованиям нормативной документации;
- Экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP для раскисления рельсовой стали Э76Ф составила в текущих ценах: для категории Т1 – 13,99 руб/т стали; для категории – 32,64 руб/ т стали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерябин А.А. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали / А.А. Дерябин, А.В. Добужская // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 38-43.
2. Дерябин А.А. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте / А.А. Дерябин, В.А. Рабовский, Е.А. Шур // Сталь. – 2000. – № 11. – С. 82-85.
3. Исследование структуры и параметров металлургического качества рельсовых сталей различных производителей / К.В. Григорович, А.С. Трушникова, А.М. Арсенкин, С.С. Шibaев, А.К. Гарбер // Повышение качества и эксплуатационной стойкости рельсов и рельсовых скреплений (по материалам Рельсовой комиссии 2006 г.): Сборник докладов. – Новосибирск: Изд-во СГУПСa, 2007. – С. 81-95.
4. Исследование структуры и металлургического качества рельсовых сталей разных производителей / К.В. Григорович, А.С. Трушникова, А.М. Арсенкин, С.С. Шibaев, А.К. Гарбер // Металлы. – 2006. – № 5. – С. 1-16.

УДК 669.046:536.7

М.В. Темлянцев, Е.М. Запольская, В.В. Стерлигов, Е.Н. Темлянцева,  
В.А. Дегтярь

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕНДОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОВШЕЙ

*Работа выполнена согласно заданию на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России (НИР № 1622)*

Проведен критический обзор и анализ основных направлений повышения тепловой эффективности стендов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Для оценки тепловой эффективности работы стенда получен параметр (удельный расход условного топлива на тонну транспортируемой стали), характеризующий экономичность его работы и отражающий удельные затраты топлива на разогрев, отнесенные к единице массы стали, транспортируемой в ковше. На основе этого параметра стенды классифицированы на три группы. Предложен новый тип теплоизоляции.

The critical review and analysis of main directions of increase of thermal efficiency of benches of high-temperature heating of linings of ladles is conducted. For an evaluation of a thermal overall performance of a bench parameter (specific consumption of conditional fuel on ton of steel), describing profitability it of activity and reflecting specific costs of fuel of heating referred to a mass unit of steel in a ladle is obtained. Because of of this parameter the benches are classified on three groups. The new type of a thermal insulation is offered.

Несмотря на интенсивное развитие различных направлений материаловедения и появление новых конструкционных материалов, сталь по-прежнему сохраняет лидирующие позиции. Практически вся выплавляемая сталь проходит через сталеразливочные ковши. В целях снижения скорости охлаждения расплава, вследствие аккумуляции тепла кладкой и уменьшения интенсивности теплового удара, который испытывают огнеупоры при заливке расплава, просушенную футеровку сталеразливочных ковшей подвергают разогреву, который проводят на специальных стендах, обычно отапливаемых природным газом.

В настоящее время на российских и зарубежных металлургических предприятиях широкое распространение получил высокотемпературный разогрев футеровок сталеразливочных ковшей (СРК). Применение высокотемпературного разогрева футеровок обеспечивает повышение их стойкости и срока службы, снижает потери тепла расплавом, что способствует снижению температур стали на выпуске из плавильной печи, общему энерго- и ресурсосбережению [1, 2]. Кроме того, применение такого разогрева футеровок СРК приводит к снижению негативного воздействия термического удара, который возникает при резких изменениях температуры.

Традиционно, основным показателем, характеризующим тепловую эффективность теплового агрегата, является коэффициент  $\eta$  полезного действия. В случае стендов эта величина определяется как отношение тепла, аккумулированного кладкой и кожухом к общему теплу, затраченному на разогрев. В то же время, при оценке тепловой эффективности работы стендов возникает необходимость в показателе, характеризующем экономичность его работы и отражающем удельные затраты топлива на разогрев, отнесенные к единице массы стали, транспортируемой в ковше. При разработке такого параметра за основу принят удельный расход условного топлива, затрачиваемого на тепловую обработку тонны стали, используемый при оценке экономичности и эффективности тепловой работы металлургических печей [3]. Для газовых стендов разогрева в общем случае удельный расход условного топлива на тонну транспортируемой стали может быть определен по соотношению

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{Q}{(E - M_{ш})}, \quad (1)$$

где  $Q_p^H$  – теплота сгорания топлива (природного газа), МДж/м<sup>3</sup>;  $Q$  – суммарный объем газа, затрачиваемого на разогрев, м<sup>3</sup>.

Если разогрев производится при постоянном расходе топлива, то расчет можно производить по следующему уравнению:

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{B\tau}{(E - M_{ш})}, \quad (2)$$

где  $B$  – средний расход топлива за период разогрева, м<sup>3</sup>/ч;  $\tau$  – время разогрева, ч.

Для электростенда параметр  $B_{уд}$  можно рассчитать по соотношению

$$B_{уд} = \frac{10^{-6}}{29,3} \frac{IU\tau}{(E - M_{ш})}, \quad (3)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение в электрической цепи питания нагревателей, В.

Анализ результатов многовариантных расчетов, проведенных в работе [4], показывает, что для стендов разогрева ковшей различной емкости, оборудованных теплоизолированной крышкой, с системой рекуперации тепла и без нее удельный расход условного топлива колеблется в интервале 38,9 до 16,5 кг у.т./т транспортируемой стали. Теоретически необходимый (без различных потерь) для разогрева ковша параметр  $B_{уд}$  составляет примерно 5 кг у.т./т. Разделим полученный интервал на три условных области: 1 – 5 – 20 кг у.т./т (стенды, характеризующиеся высокой тепловой эффективностью), 2 – 20 – 35 кг у.т./т (стенды, характеризующиеся средней тепловой эффективностью) и 3 – более 35 кг у.т./т (стенды, характеризующиеся низкой тепловой эффективностью). На рисунке 1 представлены полученные области тепловой эффективности.

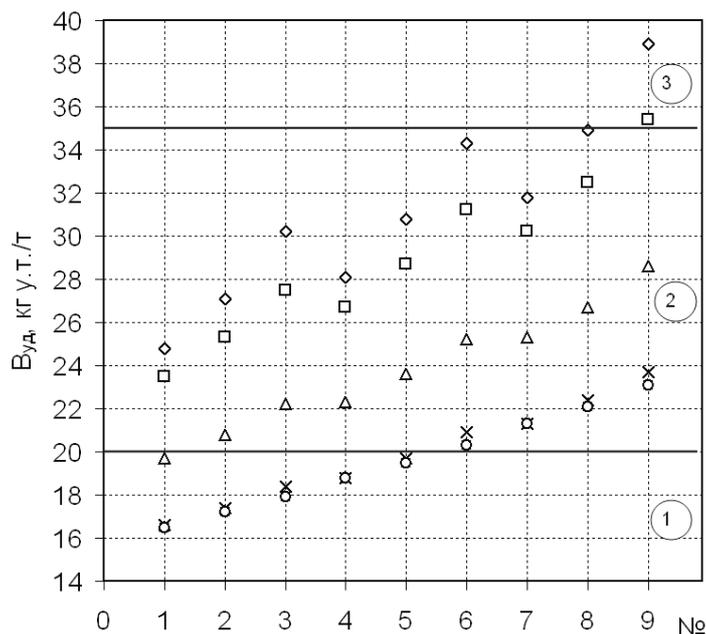


Рисунок 1 – Удельные расходы условного топлива для стендов разогрева ковшей различной ( $\diamond$  – 90 т;  $\square$  – 130 т;  $\Delta$  – 220 т;  $\times$  – 350 т;  $\circ$  – 480 т) емкости и различной конструкции

С целью снижения тепловых потерь через футеровку ковша в ней предусматривают теплоизоляционный слой, расположенный между кожухом и арматурным слоем кладки. Такую теплоизоляцию относят к типу *внутренней*. Для снижения тепловых потерь через футеровку агрегатов можно применять *внешнюю* теплоизоляцию, которую монтируют к наружной поверхности кожуха. К наиболее перспективным видам внешней теплоизоляции относят пеноизоляцию или теплоизоляционную пену, наносимую методом торкретирования.

Применение внешней теплоизоляции для футеровок сталеразливочных ковшей имеет определенные ограничения. В частности, в процессе службы ковша с расплавом температура  $t$  кожуха может возрастать до 350 – 400 °С, что приближается к максимально допустимой температуре службы кожуха, разогрев выше которой может привести к его короблению, потере прочности.

Как известно, внешняя теплоизоляция будет способствовать росту температуры кожуха, повышая ее до недопустимых пределов.

В то же время на стадии разогрева футеровки температура кожуха имеет меньшие (200 – 250 °С) значения. Соответственно на стадии разогрева применение внешней теплоизоляции может быть оправдано. Она позволит снизить тепловые потери через кожух в окружающую среду, сэкономить топливо, затрачиваемое на разогрев, повысить производительность разогрева. Конструктивно реализовать внешнюю теплоизоляцию на стадии разогрева можно на основе применения съемных панелей или теплоотражающих экранов, на стенде сушки и разогрева СРК.

Важной особенностью экранирования кожухов является то, что оно позволяет улучшить прогрев футеровки без изменения ее конструкции и теплового режима работы стенда. Для усиления эффекта от применения внешней теплоизоляции возможно использование экранов с «ворсовой» теплоизоляцией, принцип действия которой рассмотрен в работах [5, 6].

Для исследования влияния экранирования кожуха на тепловую работу стенда использовали лабораторную установку. Основу установки составляет футерованная емкость (геометрическая модель ковша). Футеровка емкости, толщиной 40 мм монолитная из шамотного бетона. В футеровке на разном расстоянии от внутренней поверхности выполняли три сверления диам. 8 мм на глубину 100 мм, в которые устанавливали хромель-алюмелевые термопары для измерения температурного поля по ее сечению. Температуру среды внутри ковша измеряли термопарой. Показания термопар фиксировали многоканальным программным регулятором температур «Термодат 19Е2». Разогрев ковша производили с помощью электрического нагревателя, выполненного из спирали сплава Х23Ю5Т с диаметром проволоки 0,8 мм. Спираль вмонтирована в трубки из кварцевого стекла. Нагреватель установлен в крышку состоящую из рабочей поверхности (лист нержавеющей стали толщиной 1 мм), теплоизоляции (прессованная каолиновая вата толщина 40 мм) и кожуха (лист углеродистой стали толщиной 3 мм). Мощность нагревателя (плотность теплового потока на поверхности футеровки) регулировали лабораторным автотрансформатором АОСН-20-220-75 У4, напряжение и ток измеряли вольтметром и амперметром соответственно. Исследования проводили при трех мощностях 0,72, 0,96 и 1,23 кВт. Нагрев осуществляли при постоянной тепловой мощности нагревателя.

Проведено три серии экспериментов: разогрев ковша без внешней теплоизоляции; разогрев ковша с теплоотражающим экраном; разогрев ковша с теплоотражающим экраном, сконструированным на принципах ворсовой теплоизоляции. В качестве теплоотражающего экрана с «ворсовой» теплоизоляцией использовали емкость из оцинкованной стали, в которую вкручивали шурупы (рисунок 2).



Рисунок 2 – Общий вид отражательного (а) и ворсового (б) экранов

Футерованная емкость не касалась земли, а экран устанавливали вокруг нее на расстоянии 4 см. «Ворс» экрана не касался кожуха ковша. Температуры кожуха емкости и теплоотражающего экрана измеряли инфракрасным бесконтактным пирометром С-300,3 «Фотон», который имеет диапазон измерения температуры от  $-20$  до  $+600$  °С.

По полученным данным проводили расчет теплового КПД установки, %:

$$\eta = \frac{Q_{\text{акк}}^{\phi} + Q_{\text{акк}}^{\text{к}}}{Q_{\text{пр}}} 100,$$

где  $Q_{\text{пр}} = IU\tau$ ;  $Q_{\text{акк}}^{\phi} = m_{\phi}c_{\text{шам}}(\bar{t}_{\phi}^{\text{к}} - t_{\phi}^{\text{н}})$ ,  $Q_{\text{акк}}^{\text{к}} = m_{\text{к}}c_{\text{ст}}(t_{\text{к}}^{\text{к}} - t_{\text{к}}^{\text{н}})$ ;  $m_{\phi} = 9$  и  $m_{\text{к}} = 1,5$  кг – масса футеровки и кожуха;  $c_{\text{шам}}$  и  $c_{\text{ст}}$  – теплоемкость шамота и стали, соответственно, Дж/(кг·К);  $\bar{t}_{\phi}^{\text{к}}$  и  $t_{\phi}^{\text{н}}$  – температура футеровки средняя конечная и начальная, °С;  $t_{\text{к}}^{\text{к}}$  и  $t_{\text{к}}^{\text{н}}$  – температура кожуха конечная и начальная, °С.

На рисунке 3 представлены результаты расчета теплового КПД установки при различных вариантах разогрева.

Анализ полученных экспериментальных данных и результатов расчетов показывает, что оборудование установки разогрева теплоотражающим экраном позволяет повысить КПД примерно на 2 %. При мощности 0,72 кВт температура кожуха ковша составляет 100 – 120 °С, применение «ворсового» экрана дает меньший эффект, чем теплоотражающего, КПД установки повышается всего на 1,2 %. Однако при мощностях 0,98 и 1,23 кВт температура кожуха составляет 140 – 160 и 170 – 200 °С соответственно, а применение ворсового экрана обеспечивает повышение КПД на 3,8 и 5,2 %, в то время как теплоотражающий экран увеличивает КПД всего на 1,8 и 2,3 %, т.е. на величину, почти в 2 раза меньшую.

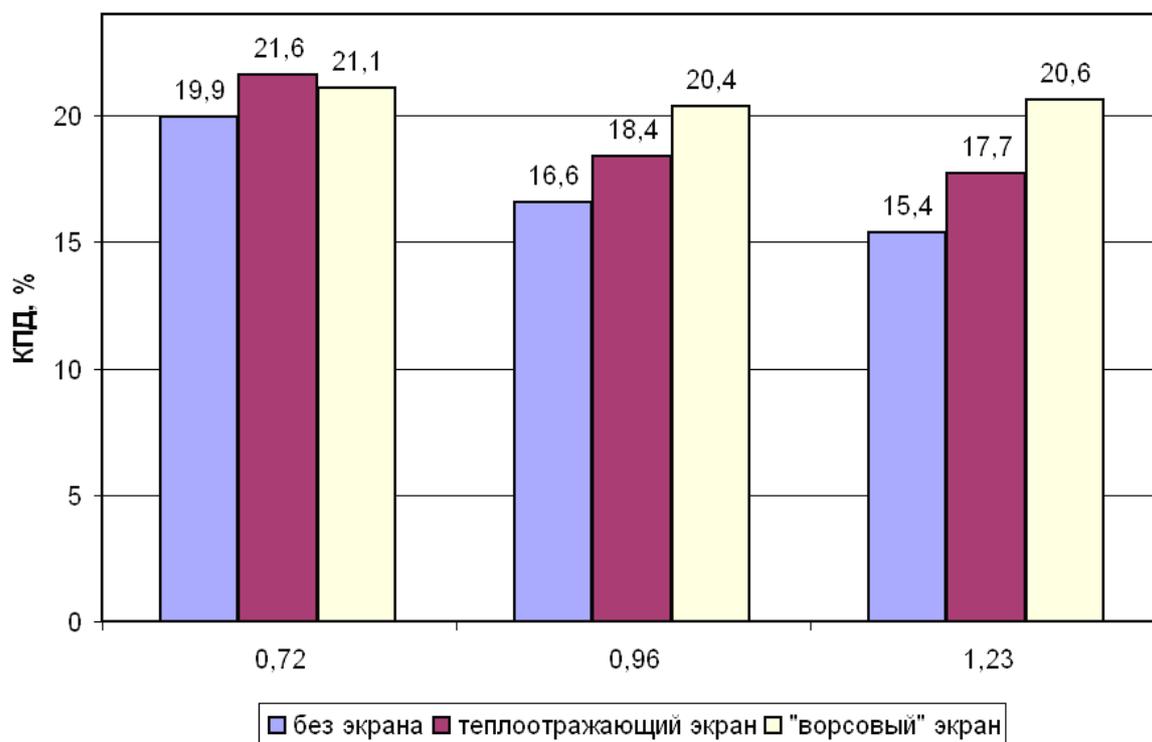


Рисунок 3 – Тепловой КПД установки при различных вариантах разогрева

Характерно, что применение «ворсовой» теплоизоляции позволяет фактически стабилизировать КПД установки, сделать его менее зависимым от

мощности нагревателя, в то время как при разогреве ковша без экрана и с теплоотражающим экраном повышение мощности нагревателя приводит к снижению КПД.

Выводы. Проведен анализ основных направлений повышения тепловой эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Для оценки тепловой эффективности работы стенов получен параметр, характеризующий экономичность его работы и отражающий удельные затраты топлива на разогрев, отнесенные к единице массы стали, транспортируемой в ковше. Предложен и научно обоснован новый тип теплоизоляции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темлянцев М.В., Матвеев М.В. Анализ мероприятий по повышению тепловой эффективности стенов сушки и разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Современная металлургия начала нового тысячелетия: Сборник научных трудов VI международной научно-технической конференции. Ч. 1. – Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 42 – 45.

2. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. 2013. № 15. С. 128 – 134.

3. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии. – М.: Металлургия, 1989. – 462 с.

4. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева // Вестник СибГИУ. 2013. № 2. С. 28 – 32.

5. Стерлигов В.В., Плюснина Е.А. Условия стагнации воздушного слоя для теплоизоляции // Вестник СибГИУ. 2014. № 3. С. 44 – 47.

6. Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 30 – 35.

Г.В. Галевский, М.Я. Минцис

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В АЛЮМИНИЕВОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ С АНОДОМ СОДЕРБЕРГА С-8БМ

Проведен анализ распределения тока по отдельным элементам алюминиевого электролизера с анодом Содерберга типа С-8БМ. Предложены конструктивные решения по снижению неравномерности распределения тока во всем электролизере.

The current distribution on individual elements of the aluminum cell with Soderberg anode C-8BM is analyzed. Constructive solutions to reduce the non-uniformity of the current distribution throughout the cell are proposed.

Алюминиевый электролизер является весьма специфичным проводником тока, так как практически по всем его узлам (анод, подина, ошиновка) ток проходит по множеству параллельных ветвей (анодные блоки или штыри, катодные секции, шины), электрическое сопротивление которых в процессе эксплуатации изменяется с разной скоростью.

В отечественной алюминиевой промышленности электролизеры с анодом Содерберга типа С-8Б и С-8БМ, схема ошиновки которых представлена на рисунке 1, составляют более половины всего парка электролизеров.

На рисунке 1 слева приведена схема катодной ошиновки  $n$ -го электролизера, а справа – схема анодной ошиновки  $(n+1)$ -го электролизера. Ток с жидкого алюминия, расположенного на катоде  $n$ -го электролизера, проходит через 30 подовых блоков блюмсов и через блюмсы поступает на 14 шин катодной ошиновки.

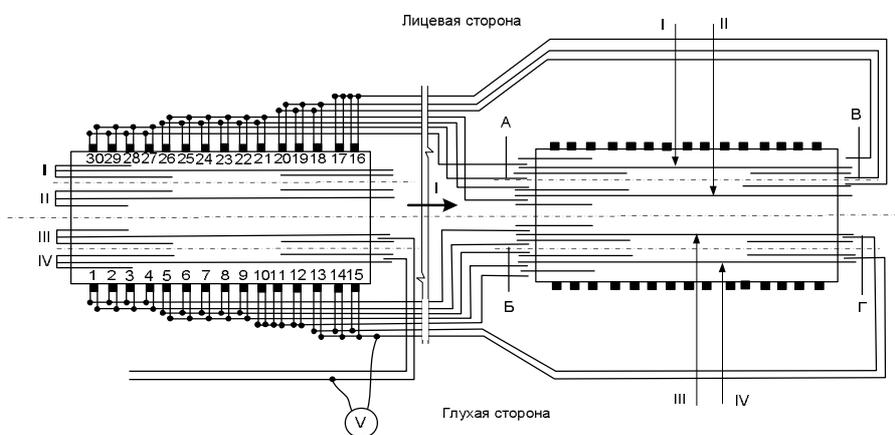


Рисунок 1 – Схема ошиновки электролизера С-8БМ

Потенциал алюминия, благодаря высокой электропроводности, в любой его точке практически одинаков. Действительно, при плотности тока  $j = 0,6 \text{ А/см}^2$  в столбе жидкого алюминия высотой  $l = 40 \text{ см}$ , падение напряжения  $\Delta U_{\text{al}}$  составляет

$$\Delta U_{\text{al}} = I \cdot R = j \cdot \rho \cdot l = 0,6 \cdot 24 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 0,000576 \text{ В} = 0,58 \text{ мВ},$$

где  $I$  – сила тока серии, А;  $\rho$  – удельное электросопротивление алюминия при температуре  $960 \text{ }^\circ\text{С}$  равно  $24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Столь малое падение напряжения в металле позволяет считать алюминий на катоде эквипотенциальным электродом.

Ток с катодной ошиновки поступает на анодную ошиновку  $(n+1)$ -го электролизера. При этом к узлу А подключено 4 шины; к узлу Б – 5 шин; к узлу В – 3 шины и к узлу Г – 2 шины. К каждой ветви анодной ошиновки (I – IV) подключено разное количество шин: к ветвям I и III – по 3 шины, а к ветвям II и IV – по 4 шины. Узлы соединения шин стояков с шинами анодной ошиновки проварены. Но качество сварки в большинстве случаев неудовлетворительно, что приводит к тому, что к каждой ветви анодной ошиновки подключены строго определенные бломсы.

С анодной ошиновки через 72 штыря ток проходит по анодному массиву. Так как штыри установлены на разных горизонтах, ток по штырям не одинаков и изменяется вследствие сгорания анода, а его распределение, при прочих равных условиях, зависит от схемы перестановки штырей. Далее ток проходит через слой электролита и попадает в алюминий электролизера  $(n+1)$ , потенциал которого также эквипотенциален, но он больше, чем у  $n$ -го электролизера, на величину падения напряжения на участке цепи между катодами соседних электролизеров.

При сгорании анода и перестановке штырей электросопротивление токоведущих ветвей изменяется, что приводит к изменению протекающего по ним тока. Для оценки изменений величины тока в ветвях в течение 2,5 недель фиксировались изменения тока в бломсах на электролизере типа С-8БМ [1]. На рисунке 2 по оси X показаны номера бломсов, а по оси Y – сила тока в них, кА.

Из приведенных данных видно, что ток по бломсам распределяется неравномерно, и изменяется от замера к замеру. Так, например, ток по бломсам №№ 4, 6, 8, 21, 27 ниже его среднего значения, а по бломсам №№ 10, 11, 18, 28 – значительно больше. Кроме того, ток в одном и том же бломсе изменяется в несколько раз.

Для оценки степени неравномерности распределения тока по бломсам использован коэффициент неравномерности  $K_n$ , который рассчитывается по формуле:

$$K_n = (1/I_{cp}) \cdot \sqrt{(1/N) \cdot \sum_1^N (I_i - I_{cp})^2},$$

где  $I_{cp}$  – среднее значение тока;  $I_i$  – текущее значение тока в  $i$ -той цепи;  $N$  – количество цепей.

Значение  $K_n$  для токов, представленных на рисунке 2, приведено в таблице 1.

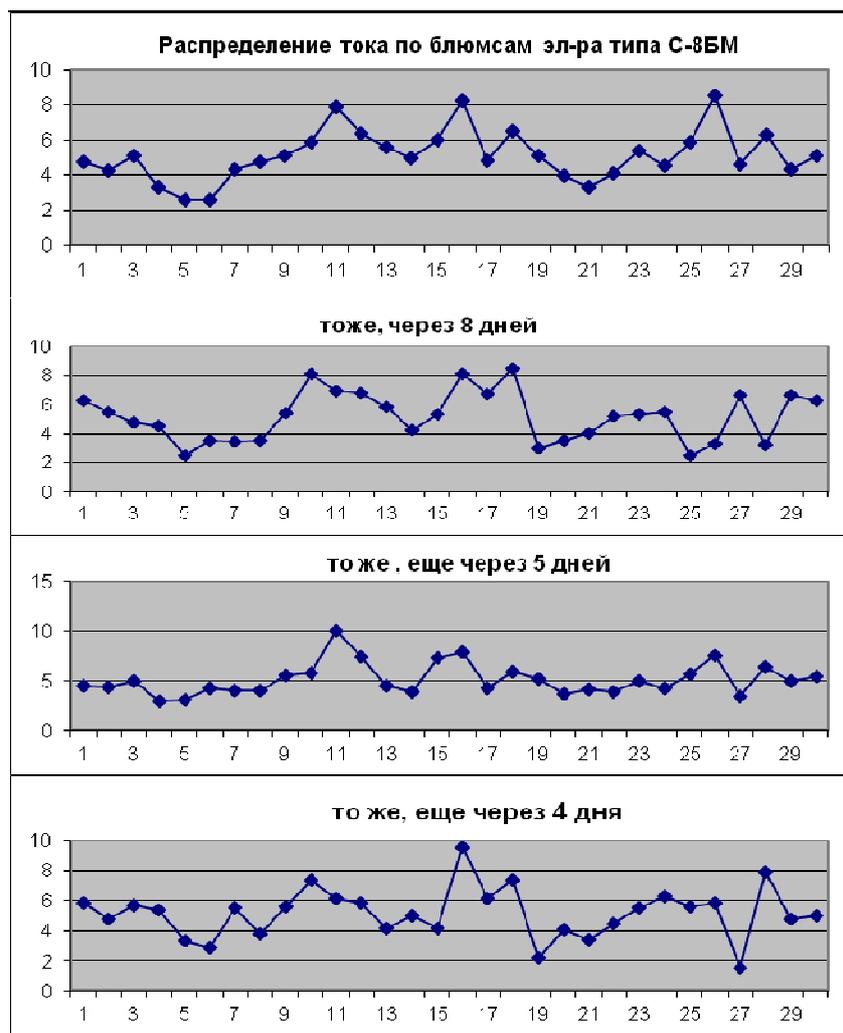


Рисунок 2 – Распределение тока по блокам электролизера типа С-8БМ

Таблица 1 – Расчетное значение  $K_n$

Замер	начало	через 9 дней	через 14 дней	через 18 дней	среднее
$K_n$	0,278	0,325	0,310	0,317	0,308

При проведении исследований [2] было отмечено, что разница в сумме токов, текущих по продольным сторонам катода (2), весьма значительна (таблица 2) и в отдельных случаях достигала 25 кА.

Таблица 2 – Сумма токов по блокам по сторонам катода, кА

Сумма тока в блоках, кА	начало	через 9 дней	через 14 дней	через 18 дней
№№ 1-15,	73,3	76,3	76,9	75,9
№№ 16-30	80,5	78,3	77,8	79,5
Разница	7,2	2,0	0,9	3,6

Причинами столь значительной неравномерности в распределении тока является, по нашему мнению, схема ошиновки электролизера (рисунок 1). Действительно, при перестановке штырей, например, подключенных к ветви I, сопротивление от концов этих штырей до подошвы анода возрастает, в результате чего ток в блоках № 18-20 и 27-30 снижается, но возрастет в остальных ветвях анодной ошиновки и, соответственно, в других блоках. Из-за увеличения результирующего сопротивления анода возрастет потенциал жидкого алюминия (n+1)-го электролизера.

При производстве работ на катоде n-го электролизера (обработка корки, удаление пены, расчистка подины от осадков, анодный эффект и пр.) распределение тока по блокам может измениться, что отразится на распределении тока на аноде (n+1) электролизера. При выполнении на аноде электролизера (n+1) некоторых технологических операций (перестановка штырей, перетяжка анодной рамы, подъем анодного кожуха, изменение МПР, анодный эффект и пр.) изменится распределение тока на этом аноде, что приведет к изменению распределения тока по блокам предыдущего по ходу тока n-го электролизера.

Особенно ухудшается распределение тока между стояками и анодными шинами после проведения капитального ремонта, так как сварка этих узлов ведется в условиях магнитных полей. Качество сварки характеризует перепад напряжения между шинами узла стояк-анодная ошиновка, которое приведено в таблице 3. Перепад напряжения в 1 м шины при плотности тока  $0,4 \text{ А/мм}^2$  составляет около 10 мВ. Средний же перепад напряжения в контактах составил 16,7 мВ, что выше допустимого (5 мВ). При исследовании [2] были обнаружены контакты, перепад напряжения в которых заметно превышал 100 мВ.

Следовательно, основными причинами неравномерного и нестабильного распределения тока по токоведущим частям электролизера являются:

- высокое и неравнозначное сопротивление контакта блок-блок, возникающее при заливке блоков в подовые блоки чугуном или пастой;
- изменение переходного сопротивления контакта алюминий-подина вследствие изменения формы подовой настилы, количества и конфигурации осадка на подине электролизера;
- изменение сопротивления токоведущих частей n-го и (n+1)-го электролизеров на участке, расположенном между катодами этих электролизеров, которые возникают при проведении таких технологических операций, как регулирование междуполюсного расстояния, корректировка состава электролита, выливка металла, расчистка подин от осадков и, особенно, при перестановке штырей.

Таким образом, алюминиевые электролизеры типов С-8Б и С-8БМ с электрической точки зрения, не автономны; иными словами – изменение в распределении тока на одном из них, отражается на другом.

Неравномерность распределения тока по токоведущим элементам электролизеров приводит к ряду негативных последствий. Рассмотрим некоторые из них.

Таблица 3 – Перепад напряжения в контактах стояк – анодная шина, мВ

Стояк	Шина	27.7	28.7	30.7	01.8	02.8	06.8	08.8	11.08	13.08
5-шинный	1	23	22	18	24	14	14	22	15	23
	2	19	24	20	22	15	13	17	15	16
	3	25	11	10	13	10	9	19	9	20
	4	26	6	5	21	13	12	27	12	24
	5	16	7	7	10	17	16	20	20	17
2-шинный	1	21	19	18	21	19	19	19	20	22
	2	22	23	17	15	23	25	19	24	20
3-шинный	1	12	11	10	12	11	7	12	15	10
	2	10	10	6	10	8	6	9	6	8
	3	10	10	7	11	7	7	11	6	8
4-шинный	1	21	16	19	21	23	29	21	27	22
	2	20	14	15	20	20	20	20	20	20
	3	24	13	22	23	29	29	31	28	27
	4	13	14	13	16	20	20	18	23	16

Потери электроэнергии в токоведущих частях электролизера при неравномерном распределении тока в них  $\Delta W_{нр}$ , возрастают по сравнению с потерями при равномерном распределении тока  $\Delta W_p$  и определяются по формуле:

$$\Delta W_{нр} = \Delta W_p \cdot (1 + K_n^2).$$

Если принять, что падение напряжения в подине и катодной и катодной ошиновке при равномерном распределении тока в подовых блоках и шинах равно 300 мВ, то при неравномерном распределении тока ( $K_n = 0,3$ ), падение напряжения возрастет и составит 327 мВ.

Значительно более серьезные последствия влечет за собой неравномерное распределение тока в подине.

Стальные блюмсы обычно монтируются в подовом блоке чугуном или углеродистой пастой. Так как температурный коэффициент расширения блюмса практически в 4 раза больше, чем у углерода, то при нагреве подины в подовой секции развиваются значительные термомеханические напряжения, величина которых зависит и от величины протекающего тока. Эти напряжения могут приводить к образованию трещин в блоке во время обжига и на последующих стадиях работы электролизера, что может разрушить подину ванны или увеличить падение напряжение в подине [3].

По данным компании «MOLTECH» [4], неравномерность распределения тока  $K_n$  для новых подин обычно составляет 0,06 – 0,07, достигая перед отключением 0,3 – 0,4. Выполненные измерения распределения тока по блюмсам на электролизерах НКАЗа [4], и вычисленные значения  $K_n$  приведены в таблице 4. Коэффициент корреляции между возрастом подины и  $K_n$  распределения тока для электролизеров типа С-8БМ составил 0,36, а для электролизеров С-3 – 0,396, что свидетельствует о незначительной связи между этими параметрами, но подтверждает предположение об увеличении значения  $K_n$  при старении электролизеров. Резкое изменение величины тока в подине усугуб-

ляет нарушение целостности подины и приводит к сокращению срока ее службы.

Таблица 4 – Распределение тока в подинах электролизеров

Параметры	Электролизеры С8-БМ							
№ эл-ра	1108	1109	1110	1111	1149	1150	1151	1152
Возраст, мес.	28	9	8	12	19	10	23	35
$K_n$	0,274	0,226	0,259	0,195	0,280	0,334	0,214	0,345
Параметры	Электролизеры С-3 (130 кА)							
№ эл-ра	851	852	853	854	979	980	981	982
Возраст, мес.	18	10	23	5	15	17	19	13
$K_n$	0,434	0,385	0,396	0,294	0,437	0,325	0,318	0,336

Для минимизации вредного воздействия неравномерного распределения тока по элементам электролизера и, особенно, в подине, необходимо создать эквипотенциальную схему анодной ошиновки, для чего все ее четыре ветви с обеих сторон должны быть электрически соединены. Иными словами – необходимо установить перемычки между внешними (I-IV) и внутренними (II-III) рядами анодной ошиновки. Это позволит снизить неравномерность распределения тока по всему электролизеру и, как следствие, уменьшит потери энергии в ошиновке и увеличит срок службы электролизера. Уравнительные шины при капитальном ремонте были установлены на многих заводах, но, как правило, только между внутренними ветвями анодной ошиновки, конструкция которых оставляет желать лучшего.

Необходимость установки уравнивающих перемычек на анодной ошиновке электролизеров ВТ была показана в работе [4] и неоднократно подтверждена в других работах [1, 2]. Это подтверждает и опыт эксплуатации электролизеров с обожженными анодами типа РА-300, у которых анодная ошиновка, выполнена в виде кольца. Измерения и расчеты показали, что на этих электролизерах распределение тока по блямсам существенно лучше, а  $K_n = 0,193$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минцис М.Я. Распределение тока в алюминиевых электролизерах / М.Я. Минцис. – Новокузнецк: СибГИУ, 2002. – 125 с.
2. Журавин Ю.Д. Особенности электрообеспечения алюминиевых электролизеров / Ю.Д. Журавин, М.Я. Минцис. – М.: Металлургия, 1982. – 78 с.
3. Сорлье М. Катоды алюминиевого электролизера / М. Сорлье, Х.А. Ойя; научный редактор П.В. Поляков; 3-е издание. – Красноярск: Версо, 2013. – 720 с.
4. Галевский Г.В. Металлургия алюминия. Стабилизация и модуляция тока электролизной серии / Г.В. Галевский, М.Я. Минцис, Г.А. Сиразутдинов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. – 151 с.

В.Б. Деев<sup>1</sup>, К.В. Пономарева<sup>2</sup>, О.Г. Приходько<sup>2</sup>, А.С. Юдин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технический университет «МИСиС», г. Москва

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

<sup>3</sup> ООО «НПП Вектор машиностроения», г. Новокузнецк

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ОТЛИВОК СПОСОБОМ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

В работе рассмотрена технология получения герметичных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов способом литья по газифицируемым моделям.

The paper considers the technology for producing thin-walled castings hermetic aluminum alloy casting method on gasified models

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) в настоящее время является одним из эффективных и перспективных способов получения высококачественных тонкостенных отливок, обладающих заданной размерной точностью, требуемой чистотой поверхности и другими свойствами [1, 2]. Все более широкое распространение данная технология находит при производстве изделий из алюминиевых сплавов [3, 4].

Одним из путей снижения себестоимости производства литых изделий является применение ресурсосберегающих технологий. Для алюминиевого литья способом ЛГМ востребованы ресурсосберегающие технологии с использованием повышенного количества вторичных материалов в шихте. Между тем, преобладание при плавке вторичных материалов в шихте даже при стабильном течении технологического процесса ЛГМ может приводить к пористости, спаям и другим видам литейных дефектов и брака, что значительно снижает механические и эксплуатационные свойства готовых изделий. Технология плавки в этом случае должна включать эффективные приемы обработки расплава – рациональные температурные перегревы, позволяющие снизить его микронеоднородность, и температурные параметры литья (заливки в форму).

В данной статье рассмотрена разработанная ресурсосберегающая технология получения тонкостенных герметичных отливок из алюминиевых сплавов АК7, АК12, АК9М2 (ГОСТ 1583-93) способом ЛГМ, включающая ТСО расплава при плавке в печи ИСТ-0,06, с преобладанием вторичных материалов в шихте (85...90 %); а также результаты реализации этой

технологии в производственных условиях ООО «НПП Вектор машиностроения».

В промышленных технологиях литья известно, что высокотемпературный тип структуры ближнего порядка расплава (эффект перегрева) можно зафиксировать его быстрым охлаждением перед заливкой путем термоскоростной обработки (ТСО) [5 – 7]. Эффект ТСО связан с тем, что скорость структурных превращений в жидкой фазе достаточно низкая, несмотря на сравнительно большие скорости процессов диффузии, поэтому быстрое охлаждение расплава может в значительной степени подавлять трансформацию кластеров [8]. ТСО расплава оказывает эффективное модифицирующее влияние на алюминиевые сплавы – позволяет получить мелкозернистую структуру и повышенные механические свойства отливок [6 – 8].

Быстрое охлаждение расплава достигается добавками твердой шихты, соответствующими получаемому сплаву по химическому составу (это могут быть добавки чушкового сплава, кокильный лом и т.д.). Данные добавки создают модифицирующий эффект, внося микронеоднородности меньших масштабов и активированные нерастворимые примеси, являющиеся потенциальными центрами кристаллизации.

Комплексное исследование влияния температурно-временных параметров плавки при реализации ТСО на качественные показатели тонкостенных отливок (чистоту поверхности, размерную точность, пористость) из алюминиевых сплавов АК7, АК12, АК9М2 показало, что при данном составе шихты (85...90 % вторичных материалов) рациональным является ТПЕР ~ 990...1000 °С, а время выдержки при ТПЕР ~ 5...10 мин.

Во всех экспериментах ТЗАЛ, до которой расплав охлаждали введением предварительно измельченного чушкового сплава (10...15 %), составляла 820...830 °С. Рафинирование осуществляли через стеклосетку фильтровальную ССФ-0,6 при заливке в литейную форму. Исследования проводили на тонкостенных отливках (с толщиной стенки 5...10 мм), входящих в номенклатуру ООО «НПП Вектор машиностроения» (г. Новокузнецк).

Механические свойства и пористость определяли на стандартных образцах согласно ГОСТ 1583–93, полученных ЛГМ. Герметичность исследовали по критерию гидропрочности на специальной установке на пробах-стаканчиках с толщиной стенки 4 мм, полученных способом ЛГМ.

Результаты влияния данной ресурсосберегающей технологии получения алюминиевых сплавов АК7, АК12, АК9М2 на механические свойства и герметичность тонкостенных отливок показано в таблице 1. Также приведены механические свойства отливок, полученных по существующей на предприятии технологии плавки (с содержанием в шихте не более 35...40 % вторичных материалов), которая заключалась в том, что высокотемпературный перегрев не проводили, а нагревали расплавы только до 880...890 °С, при этом до ТЗАЛ (820...830 °С) расплав охлаждался вместе с печью.

Таблица 1 – Влияние ТСО (Тпер = 990...1000 0С, τ = 5...10 мин) расплава на качество отливок из алюминиевых сплавов, полученных способом ЛГМ

Сплав	Тонкостенная отливка	Технология плавки	Свойства отливок					
			Пористость, балл	Чистота поверхности <sup>2</sup>	Размерная точность <sup>2</sup>	σ <sub>B</sub> , МПа	δ, %	Герметичность, МПа
АК7	Корпус	Существующая <sup>1</sup>	4 - 5	–	+	174...185	2,2...2,6	11,0
		ТСО	3	+	+	203...210	3,3...3,5	12,3
АК12	Корпус	Существующая <sup>1</sup>	4 - 5	–	+	181...190	4,1...4,5	12,2
		ТСО	3	+	+	214...220	6,7...7,2	14,0
АК9М2	Вкладыш	Существующая <sup>1</sup>	3 - 4	+	–	200...207	1,5...1,8	13,3
		ТСО	2 - 3	+	+	227...233	2,1...2,3	15,2

<sup>1</sup> Перегрев до 880...890 °С; до температуры заливки расплав охлаждался вместе с печью; шихта содержала 35...40 % вторичных материалов.  
<sup>2</sup> «+» – удовлетворительная; «–» – неудовлетворительная.

Согласно таблице 1, механические свойства отливок после ТСО, по сравнению с отливками, полученными по существующей технологии, повысились (в среднем): для отливок «Корпус» из сплава АК7 временное сопротивление разрыву σ<sub>B</sub> – на 13,5...16,7 %, относительное удлинение δ – на 35...50 %; герметичность – на 11,8 %; для отливок «Корпус» из сплава АК12 σ<sub>B</sub> – на 15,8...18,2 %, δ – на 60...63 %; герметичность – на 14,8 %; для отливок «Вкладыш» из сплава АК9М2 σ<sub>B</sub> – на 12,6...13,5 %, δ – на 28...40 %; герметичность – на 14,3 %.

*Вывод.* Внедрение ресурсосберегающей технологии в условиях ООО «НПП Вектор машиностроения» при выплавке сплавов АК7, АК12, АК9М2 с применением ТСО и изготовлении высококачественных тонкостенных герметичных отливок способом ЛГМ позволило получить за счет увеличения (до 85...90 % в шихте) количества вторичных материалов существенный экономический эффект.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуляк В.С. Литьё по газифицируемым моделям. — СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
2. Рыбаков С.А. Инновационные возможности литья по газифицируемым моделям, состояние и перспективы этого метода в России // Литейщик России. – № 4. – 2009. – С. 44, 45.

3. Деев В.Б. Температурные режимы плавки и заливки Al-сплавов при литье по газифицируемым моделям / В.Б. Деев, К.В. Пономарева, А.С. Юдин, С.А. Цецорина, А.В. Прохоренко // Литейное производство. – 2014. – № 3. – С. 25–27.
4. Deev, V.B. / Fast cooling of aluminum alloys in casting with a gasifying core // V.B. Deev, I.F. Selyanin, K.V. Ponomareva, A.S. Yudin, S.A. Tsetsorina // Steel in translation. – 2014. – Т. 44. – № 4. – P. 253, 254.
5. Влияние температуры перегрева на свойства отливок из силумина / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.Н. Химухин и др. // Литейное производство. – 2011. – № 7. – С. 10–12.
6. Термическая и термоскоростная обработка алюминиевых сплавов / Хосен Ри, Э.Х. Ри, С.Н. Химухин, М.Е. Калугин, И.В. Крючков // Литейщик России. – 2010. – № 8. – С. 12–14.
7. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys / Deev V.B., Degtyar V.A., Kutsenko A.I., Selyanin I.F., Voitkov A.P. // Steel in Translation. – 2007. – Т. 37. – № 12. – С. 991–994.
8. Деев В.Б. Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольск-на-Амуре государственный технический университет, 2012. – 35 с.

УДК 669.046.564:621.785

М.В. Темлянцев, К.С. Слажнева, А.Ю. Дзюба\*, А.А. Уманский,  
Н.В. Темлянцев

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

\*ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ МАРКИ 60С2ХА

Представлены результаты лабораторных исследований кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали марки 60С2ХА. Получены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать угар металла при нагреве под прокатку. Установлены температурные интервалы интенсификации окалинообразования и обезуглероживания.

The outcomes of laboratory researches of a kinetics of high-temperature oxidation and decarbonizations of steel of the mark 60S2HA are shown. The empirical relations permitting to predict an intoxication of metal at heating under rolling are obtained. Set temperature intervals intensification scaling and decarbonization.

К прокату из рессорно-пружинной стали предъявляют высокий уровень требований к качеству поверхности, в том числе к глубине видимого обезуглероженного слоя. Наличие обезуглероженного слоя в упругих элементах (пружинах, рессорах) наиболее опасно, поскольку резко снижает их усталостную прочность, предел выносливости. Большинство таких изделий работает в условиях кручения или изгиба, при которых максимальные напряжения приходится на поверхностные слои [1 – 3].

Для изготовления пружин для автомобилей различного назначения широкое распространение получила сталь марки 60С2ХА. Круглый прокат для навивки пружин из такой стали получают на сортовых станах посредством горячей прокатки заготовок. Традиционно нагрев заготовок осуществляют в методических печах, при этом помимо окисления стали происходит процесс ее обезуглероживания. Исследованию кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания рессорно-пружинной стали марки 60С2 посвящены работы [1, 4, 5], однако для стали марки 60С2ХА с повышенным содержанием хрома 0,7 – 1,0 % (в стали марки 60С2 хрома содержится менее 0,30 %) данные по влиянию температурно-временного фактора на окисление и обезуглероживание фактически отсутствуют. В то же время известно [1, 6], что хром способствует снижению интенсивности окисления стали, вследствие формирования окали-

ны, обладающей более высокими защитными свойствами, а являясь карбидообразующим элементом, снижает интенсивность диффузии углерода в стали и замедляет ее обезуглероживание [1].

В настоящей работе проведено исследование кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали марки 60С2ХА следующего химического состава, %: 0,576 С; 1,439 Si; 0,66 Mn; 0,736 Cr; 0,024 Ni; 0,031 Cu; 0,004 S; 0,008 P. При проведении лабораторных экспериментов использовали три вида образцов: цилиндрические диаметром 11 – 13 мм и длиной 20 – 30 мм массой 16 – 27 г (для определения обезуглероживания и угара по убыли массы), 3×3×6 мм (для определения угара на дериватографе по методу непрерывной регистрации увеличения массы образца во времени) и 4×4×10 мм (для определения температуры плавления окалины). Образцы вырезали из отрезков (стержней) круглого проката диаметром 14 мм. Перед вырезкой образцов стержни отжигали и обтачивали на токарном станке с целью полного удаления обезуглероженного слоя.

При проведении лабораторных экспериментов нагрев образцов проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха.

При проведении исследований кинетики окисления и обезуглероживания стали использовали дискретный гравиметрический метод, основанный на убыли массы образцов, которые нагревали до температур 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 и 1250 °С и выдерживали при постоянной температуре в течение 5, 15 и 25 мин. Время разогрева образцов от 20 °С до температуры выдержки составляло 3 – 5 мин, причем в области температур ниже начала интенсивного окисления (до 800 °С) – порядка 3 мин. При выдержке температура образцов менялась в пределах  $\pm 5 - 10$  °С.

Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Термопару устанавливали в высверленное в центре образца отверстие диаметром 3,2 мм и глубиной 12 мм. Температуры образца фиксировали многоканальным программным регулятором температур «Термодат 19Е2».

До и после опытов геометрические размеры образцов измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, массу определяли на весах Vibra AF-220СЕ с точностью до 0,1 мг. Для удаления окалины с поверхности образцы подвергали травлению в подогретом до 40 – 60 °С 10 %-ном растворе серной кислоты с добавлением 0,1 г/л тиомочевины.

После определения угара стальные образцы распиливали на две части и изготавливали шлифы поперечного разреза. Глубину видимого обезуглероженного слоя определяли с помощью металлографического метода. Микроструктуру выявляли в 4 %-ом растворе азотной кислоты и исследовали на оптическом микроскопе при увеличении 100 – 500 крат.

При обработке экспериментальных данных считали, что зависимость угара (или толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня [1].

Дополнительно проведена серия экспериментов по дифференциально-термическому анализу образцов при помощи термоанализатора LABSYS. Эксперименты проводили в атмосфере воздуха. Применение термоанализатора позволило непрерывно фиксировать массу образца и тепловые эффекты, вызванные окислением железа, углерода и других легирующих элементов.

При определении температур плавления печной окалины для более точного измерения температуры образцы крепили непосредственно к спаю термопары. Начало плавления окалины фиксировали визуально через окно печи.

На рисунке 1 представлена зависимость угара  $Y$  стали марки 60С2ХА от температуры  $t$  и времени  $\tau$  выдержки при постоянной температуре, построенная по результатам экспериментальных данных.

На рисунке 2 представлена зависимость логарифма константы скорости окисления от температуры.

Для прогнозных расчетов угара получена зависимость, позволяющая определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева:

$$Y = 348,6 \cdot \exp(-12660/T) \cdot \sqrt{\tau}$$

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что для стали марки 60С2ХА температура является гораздо более мощным фактором, интенсифицирующим процесс окисления по сравнению со временем. Угар резко интенсифицируется при достижении металлом температур 1000 – 1050 °С.

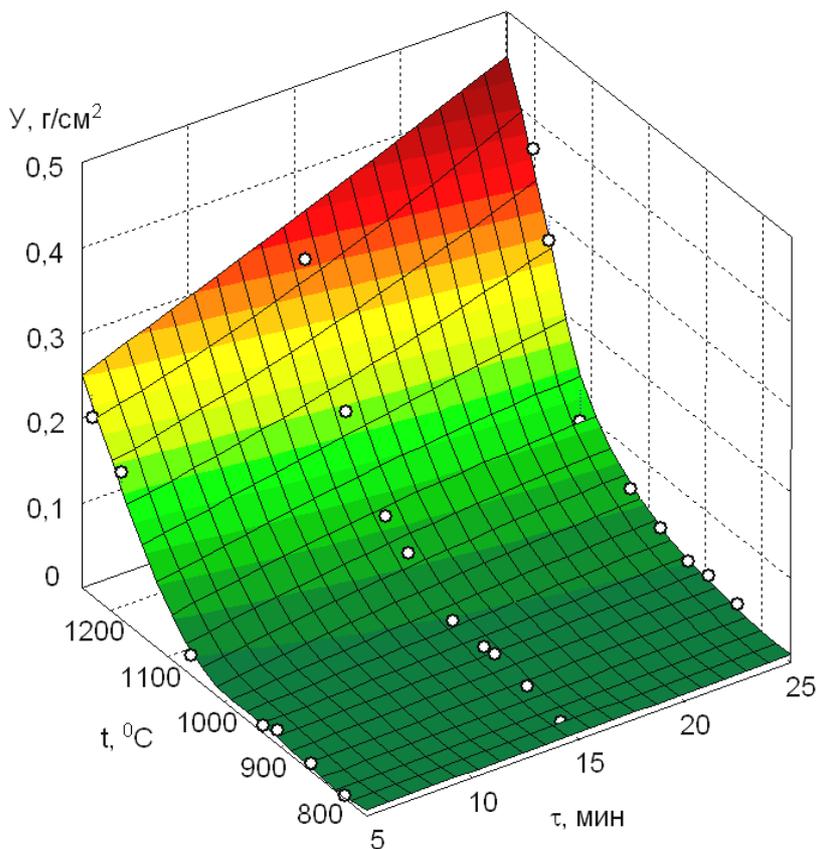


Рисунок 1 – Зависимость угара стали марки 60С2ХА от температуры и времени выдержки

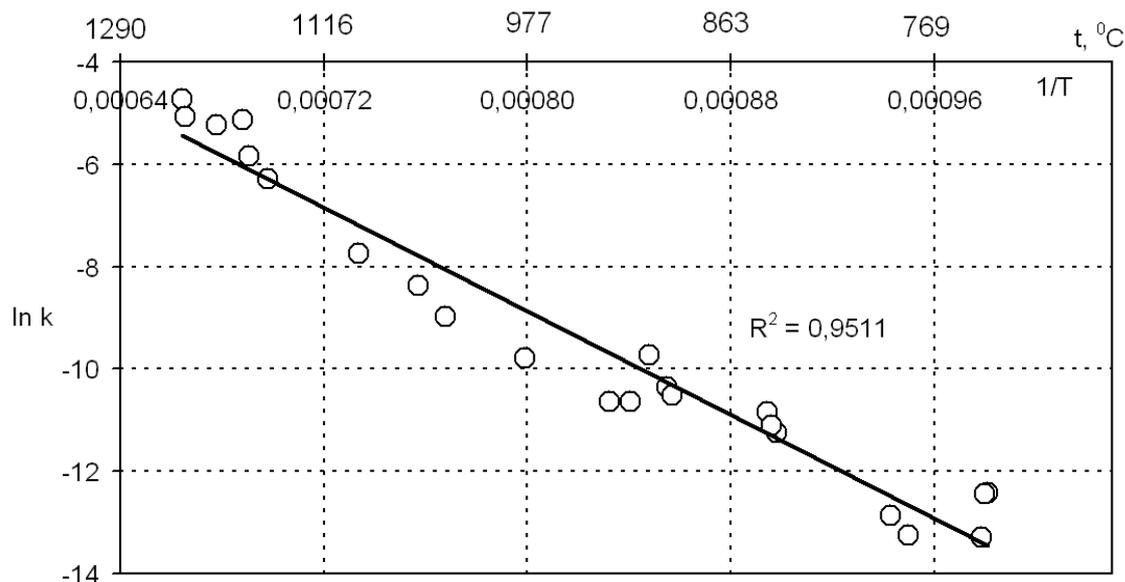


Рисунок 2 – Зависимость логарифма константы скорости окисления от температуры

На рисунке 3 представлены результаты дифференциально-термического анализа. При нагреве образца стали в атмосфере воздуха происходит увеличение его массы за счет окисления железа и легирующих компонентов. В то же время окисление углерода и удаление его оксидов в газовую фазу способствует некоторому снижению массы образца.

На дериватограмме присутствуют два пика на кривой теплового состояния. Один соответствует началу интенсификации угара после перехода стали в аустенитное состояние (для стали марки 60С2ХА  $A_{c1}=765\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3}=780\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,) и образования вюстита и второй – интенсификации угара в области температур порядка  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данные исследований угара с помощью гравиметрического метода по потере массы и на дериватографе согласуются между собой.

Анализ результатов исследований температуры плавления окалины показывает, что для окалины, образующейся на стали 60С2ХА, появление первых жидкофазных участков происходит при температурах  $1270 - 1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оплавление окалины, сопровождающееся ее стеканием с поверхности металла, начинается при температурах  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По сравнению с температурой начала плавления окалины стали 60С2, которая составляет  $1229 - 1251\text{ }^{\circ}\text{C}$  температура начала плавления окалины стали марки 60С2ХА выше, это связано с более высоким содержанием хрома, который повышает температуру плавления окалины в среднем на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  на каждые  $0,1\%$  его содержания в стали [1, 5, 7]. Результаты рентгеноспектрального анализа окалины показывают, что она содержит, %: 1,66 Si; 0,70 Mn и 0,67 Cr.

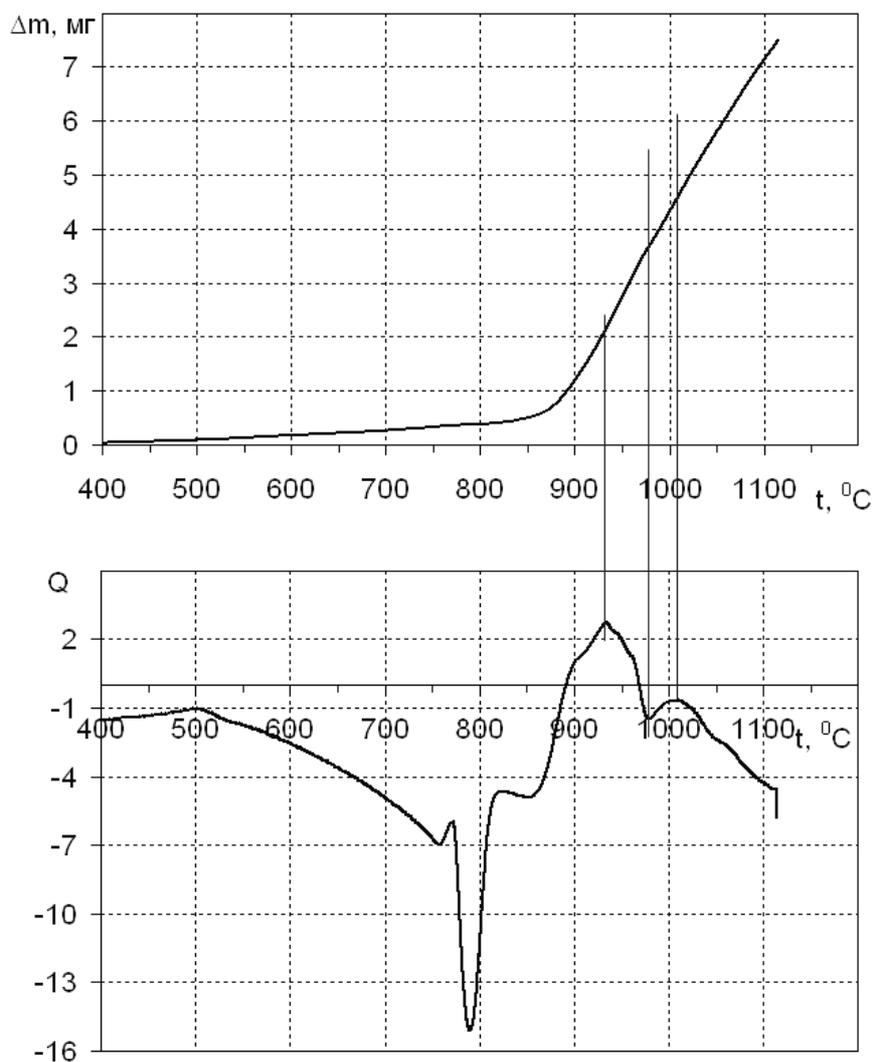


Рисунок 3 – Дериватограмма образца стали 60С2ХА при нагреве в атмосфере воздуха

На рисунках 4, 5 представлены результаты исследования микроструктуры поверхностных слоев образцов, подвергнутых нагреву по различным режимам. На рисунке 4 представлена зависимость глубины видимого обезуглероженного слоя от температурно-временного фактора. Для исследуемой марки стали характерно образование полностью обезуглероженного слоя металла глубиной до 0,05 – 0,15 мм при нагреве до 750  $^{\circ}\text{C}$  и выдержке 5 – 25 мин. В температурном интервале 750 – 1100  $^{\circ}\text{C}$  происходит формирование видимого обезуглероженного слоя глубиной до 0,223 мм. При более высоких температурах происходит поглощение обезуглероженного слоя окалиной, связанное с превышением скорости окисления стали над скоростью обезуглероживания.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно интенсивном обезуглероживании стали 60С2ХА не только при температурах, соответствующих стадии нагрева в методической печи, но и при температурах прокатки и последующего охлаждения проката.

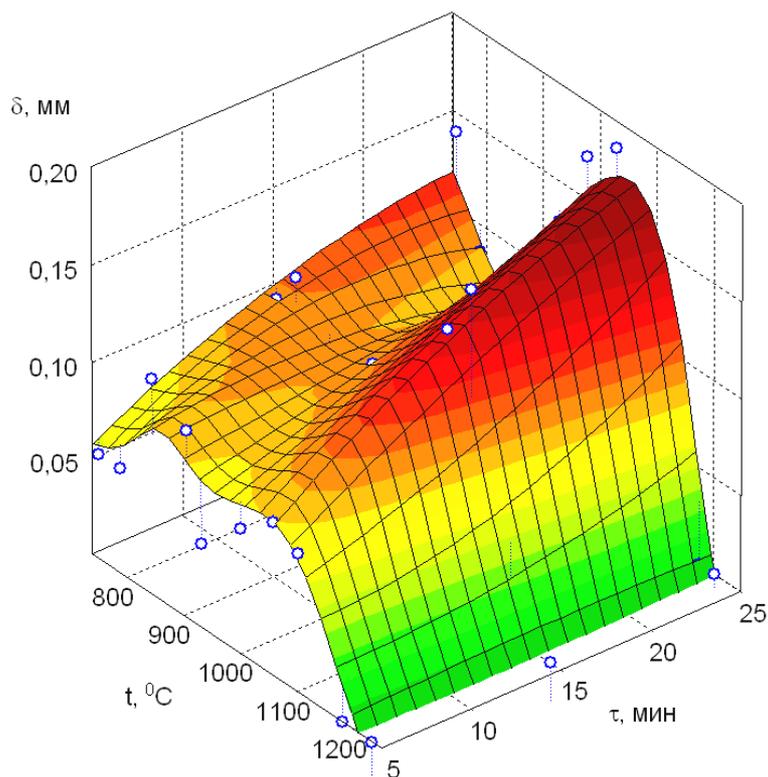
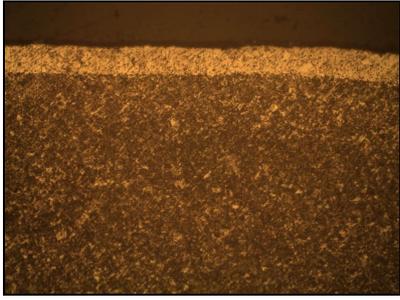


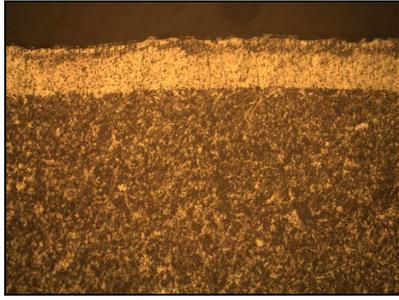
Рисунок 4 – Зависимость глубины видимого обезуглероженного слоя от температурно-временного фактора

При температурах 1175 °С и выше на поверхности металла наблюдается образование смешанной зоны толщиной 0,030 – 0,045 мм, представляющей собой полностью обезуглероженную сталь (феррит) и оксиды [8]. Наличие такой зоны способствует формированию сталагмитообразного вида поверхности раздела окалина – сталь, для которого характерно наиболее проблемное отделение окалины от металла [6]. Это может стать причиной образования дефектов поверхности, связанных со вкатанной окалиной. В связи с этим при таких температурах нагрева необходимо обеспечить надежную работу системы гидросбива окалины.

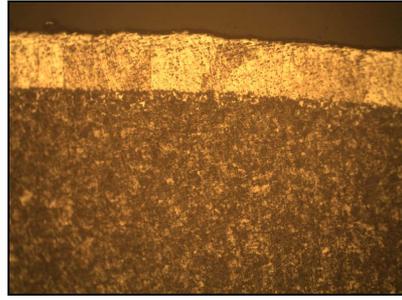
*Выводы.* Проведено исследование кинетики высокотемпературного окисления и обезуглероживания стали марки 60С2ХА. Для осуществления расчетов угара в зависимости от температуры и времени нагрева получено уравнение. Установлено, что: угар резко интенсифицируется при достижении металлом температуры 1000 – 1050 °С; появление первых жидкофазных участков в окалине происходит при температурах 1270 – 1280 °С, а оплавление окалины, сопровождающееся ее стеканием с поверхности металла, начинается при температурах 1300 °С; область температур наиболее интенсивного обезуглероживания стали составляет 950 – 1120 °С; при температурах 1175 °С и выше на поверхности металла наблюдается образование смешанной зоны толщиной 0,030 – 0,045 мм, затрудняющей удаление окалины с поверхности металла.



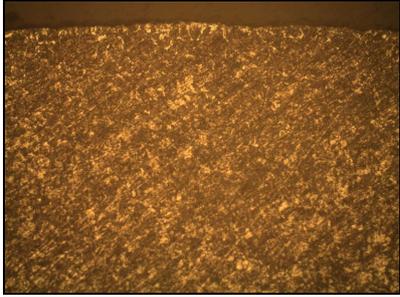
1 t=749 °C



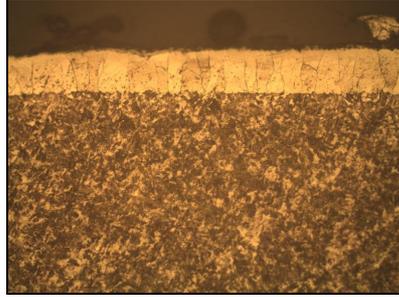
2 t=746 °C



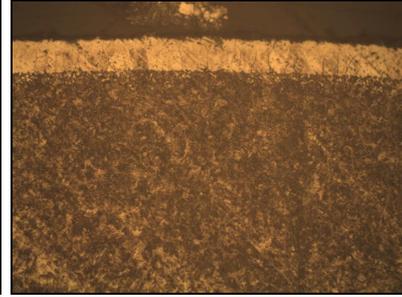
3 t=747 °C



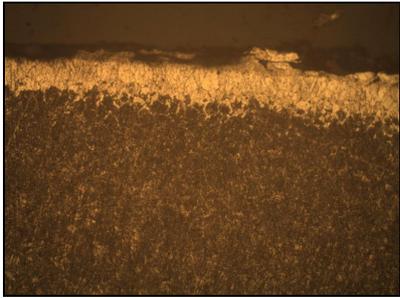
4 t=788 °C



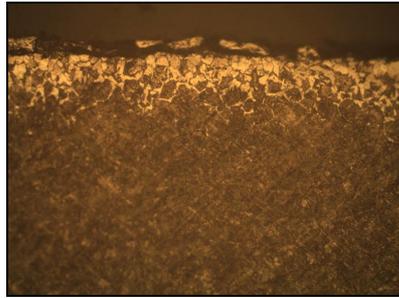
5 t=780 °C



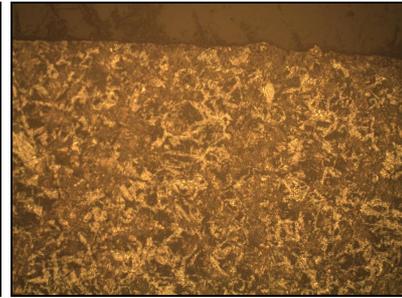
6 t=789 °C



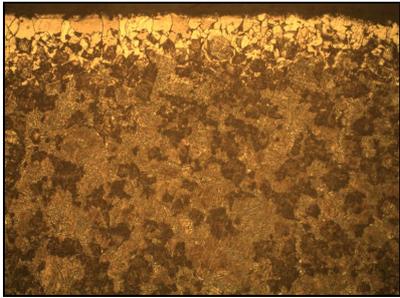
7 t=845 °C



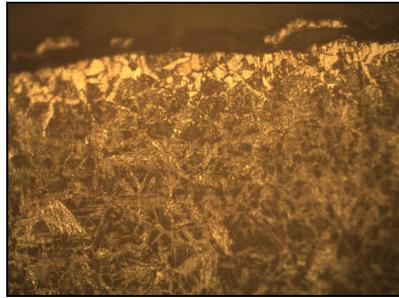
8 t=840 °C



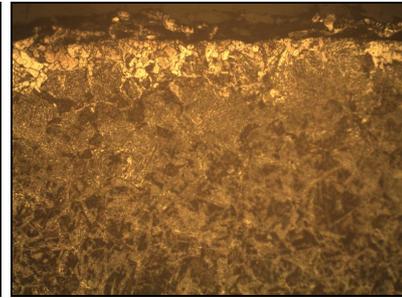
9 t=843 °C



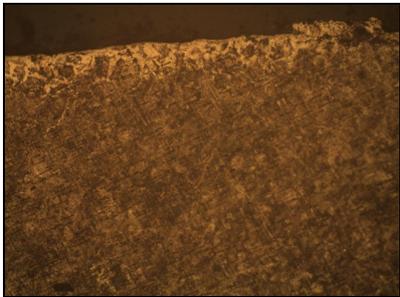
10 t=906 °C



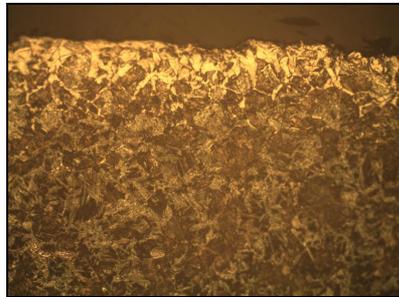
11 t=896 °C



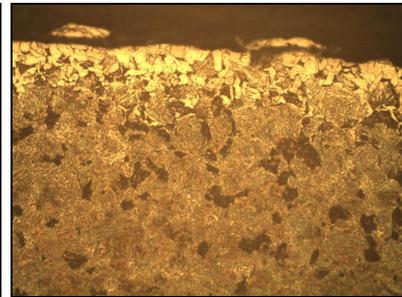
12 t=894 °C



13 t=931 °C



14 t=916 °C



15 t=928 °C

$\tau=5$  мин

$\tau=15$  мин

$\tau=25$  мин

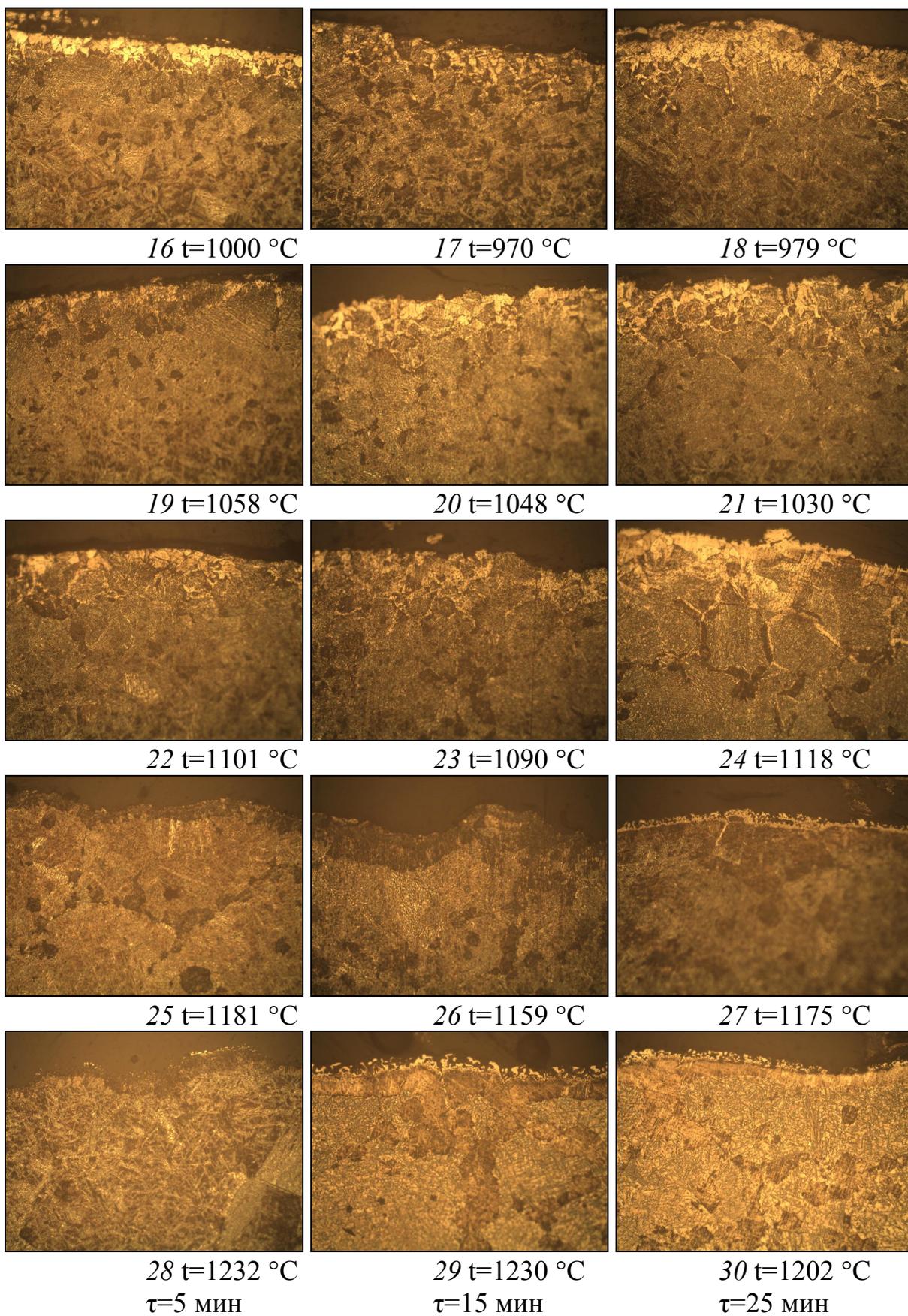


Рисунок 5 – Микроструктуры поверхностных слоев образцов  $\times 400$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темлянец М.В. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением / М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
2. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – М.: Metallurgiya, 1971. – 496 с.
3. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. – М.: Интекст, 2002. – 208 с.
4. Темлянец М.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей / М.В. Темлянец, Н.В. Темлянец // Заготовительные производства в машиностроении. 2005. – № 3. – С. 50 – 52.
5. Темлянец М.В. Исследование химического состава окалина пружинной стали 60С2 / М.В. Темлянец, Н.В. Темлянец // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2005. – № 2. – С. 75, 76.
6. Перетяцько В.Н. Нагрев стальных слябов / Перетяцько В.Н., Темлянец Н.В., Темлянец М.В., Михайленко Ю.Е. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
7. Темлянец М.В. Исследование температур оплавления образующейся при нагреве стали печной окалина / М.В. Темлянец, Н.В. Темлянец // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2005. – № 9. – С. 51 – 53.
8. Темлянец М.В. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянец, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, Л.Т. Кожеурова // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2005. – № 12. – С. 47 – 49.

А.В. Головатенко<sup>1</sup>, В.Н. Кадыков<sup>2</sup>, А.А. Уманский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ Э78ХСФ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОКАТКИ

С использованием установки «Hydrawedge II» – модуля комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800» – проведены экспериментальные исследования сопротивления деформации рельсовой стали марки Э78ХСФ при различных термомеханических параметрах прокатки. На основании полученных графических зависимостей сопротивления деформации от степени деформации, температуры и скорости прокатки разработана математическая модель, проверка адекватности которой показала возможность ее использования в производственных условиях.

Using the installation «Hydrawedge II» – module for complex physical modeling «Gleeble System 3800» – experimental studies of resistance to deformation of the rail steel at different thermomechanical rolling parameters. Based on the plots of the deformation resistance of the strain, temperature and speed of rolling a mathematical model, the validation of which showed the possibility of using it in a production environment.

Сопротивление стали пластическому деформированию (сопротивление деформации) является ключевой характеристикой, определяющей энергосиловые параметры прокатки (давление металла на валки, момент прокатки). Таким образом, при проектировании новых режимов прокатки в условиях действующих прокатных станов и, особенно, при вводе в эксплуатацию новых прокатных станов, необходимы точные данные о величине сопротивления деформации прокатываемых сталей.

Использование недостоверных данных о величине сопротивления деформации при расчетах энергосиловых параметров прокатки для условий конкретного прокатного стана может привести либо к перегрузкам основного оборудования при прокатке (в случае занижения сопротивления деформации по сравнению с действительными его значениями), либо к недоиспользованию оборудования и, как следствие, к снижению производительности стана (при использовании завышенных значений сопротивления деформации по отношению к реальным значениям).

Анализ литературных данных показывает, что на величину сопротивления деформации значительное влияние оказывают такие параметры, как: химический состав прокатываемой стали, температура и скорость прокатки, величина обжатий (степень деформации). При этом численные зависимости сопротивления деформации от температурных и термомеханических параметров прокатки получены исследователями только для ограниченного количества марок стали. Так в работе [1] приводятся данные о сопротивлении деформации марганцовистых сталей, авторами работы [2] исследовано изменение сопротивления деформации электротехнических сталей в зависимости от термомеханических параметров прокатки. В работе [3] получены экспериментальные кривые зависимости сопротивления деформации стали марки 08X18H10T от температуры деформации и содержания феррита. Значительный объем исследований по данному вопросу проведен авторами работы [4] – получены численные зависимости сопротивления деформации от параметров прокатки для 21 марки углеродистых, легированных и высоколегированных сталей и 5 марок жаропрочных сплавов. Однако в литературных источниках на сегодняшний день отсутствуют достоверные данные о величинах сопротивления деформации при прокатке рельсовых сталей. Таким образом, исследования влияния геометрических, скоростных и температурно-временных параметров прокатки на сопротивление деформации при прокатке рельсовых сталей являются актуальными.

Сложность процесса пластической деформации стали, обусловленная одновременным действием значительного количества взаимозависимых параметров, определяет тот факт, что наиболее надежным способом получения действительных значений сопротивления деформации являются экспериментальные методы, а именно стандартные методы горячих испытаний на растяжение, кручение и сжатие. Анализ показывает, что из трех перечисленных методов наиболее предпочтительным является испытание на горячее сжатие. При использовании данного метода не возникает значительная неоднородность деформаций по длине и сечению образца, как при использовании испытаний на горячее растяжение и кручение соответственно. При этом существенным недостатком метода горячего сжатия является искажение формы боковой грани образца после испытаний («бочкообразная» форма образца), что является следствием действия контактных сил трения между торцевыми поверхностями образца и деформирующими инструментами. Указанный недостаток можно в значительной степени нивелировать за счет выбора оптимальной формы образца, использования смазки, подаваемой на поверхность деформирующих инструментов, оптимизации формы деформирующих инструментов.

С целью разработки и оптимизации технологических режимов прокатки на универсальном рельсобалочном стане ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», введенном в эксплуатацию в 2013 г., проведены экспериментальные исследования влияния технологических параметров прокатки на сопротивление деформации рельсовой стали марки Э76ХСФ [5]. Исследования методом испытаний на горячее сжатие (осадку) проведены на специальной установке «Hydrawedge II» – мо-

дуля комплекса для физического моделирования «Gleeble System 3800». В состав установки «Hydrawedge II» входят (рисунок 1): приборы для контроля параметров испытаний (температуры, усилия, перемещения); закалочные форсунки; передвижной модуль для создания инертной атмосферы в рабочей камере; деформирующие передвижные штанги, оборудованные системой водяного охлаждения. Использование установки «Hydrawedge II» позволяет проводить деформацию образцов при постоянной скорости перемещения деформирующей штанги или постоянной скорости деформации образцов при заданной температуре. Возможность создания инертной атмосферы в рабочей камере, реализуемая за счет использования вакуумных насосов, позволяет избежать окисления поверхности образцов при повышенных температурах. Нагрев образцов осуществляется за счет пропускания электрического тока непосредственно через образцы. Данный способ нагрева обеспечивает достаточно высокую однородность температуры в объеме образцов. Контроль температуры производится с помощью термопар, приваренных к образцам.

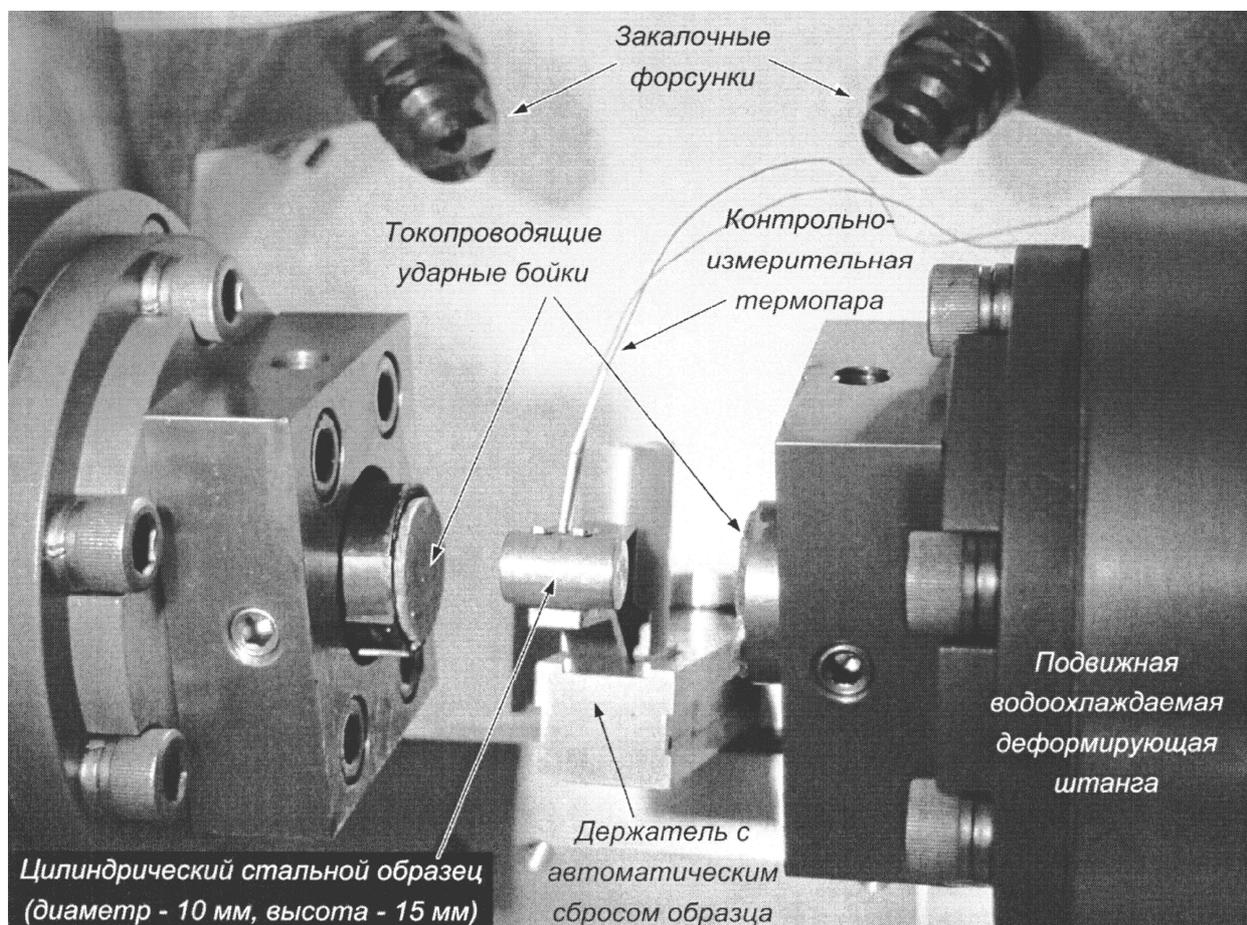


Рисунок 1 – Рабочая камера модуля «Hydrawedge II» комплекса «Gleeble System 3800»

В ходе проведения экспериментальных исследований провели испытания на горячую осадку прямоугольных и цилиндрических образцов, вырезанных из головки рельсов Р65 четырех плавок стали марки Э76ХСФ. Образцы

вырезали по двум схемам, представленным на рисунке 2. Испытания на горячую осадку проводили при скорости деформации  $0,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $1 \text{ с}^{-1}$  и  $10 \text{ с}^{-1}$ ; температурах  $900^\circ\text{C}$ ,  $950^\circ\text{C}$ ,  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1050^\circ\text{C}$ ,  $1100^\circ\text{C}$  и  $1150^\circ\text{C}$  (таблица 1) и степени относительной деформации в интервале до 1,0.

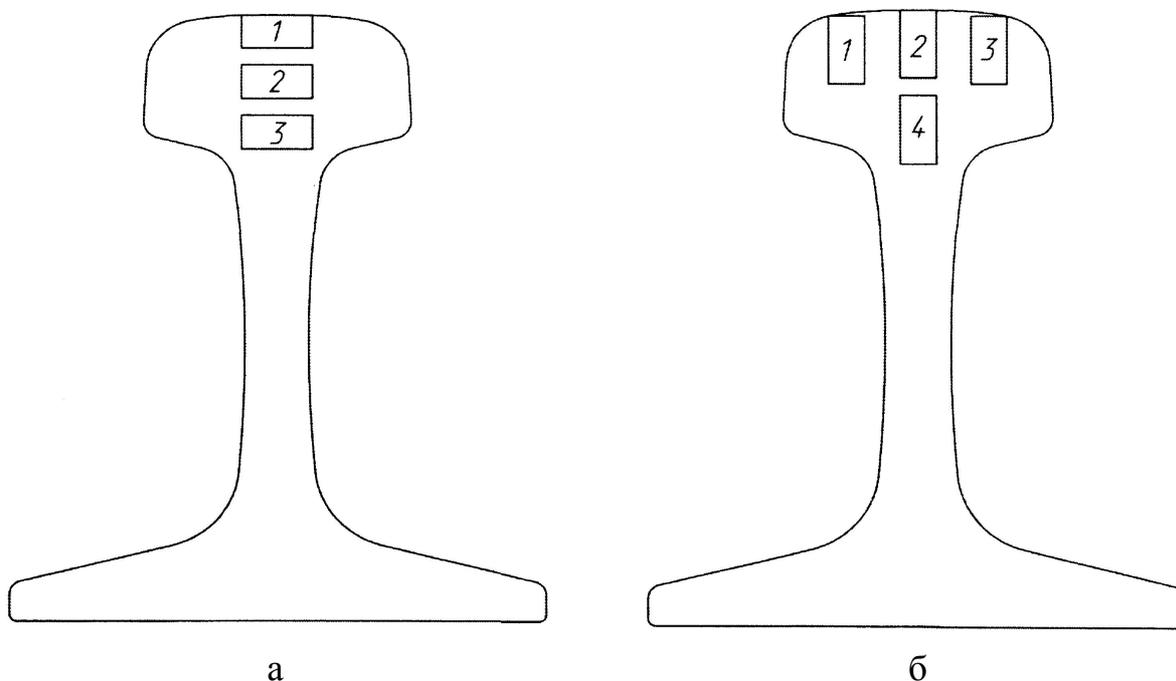


Рисунок 2 – Схема вырезки образцов из рельсов

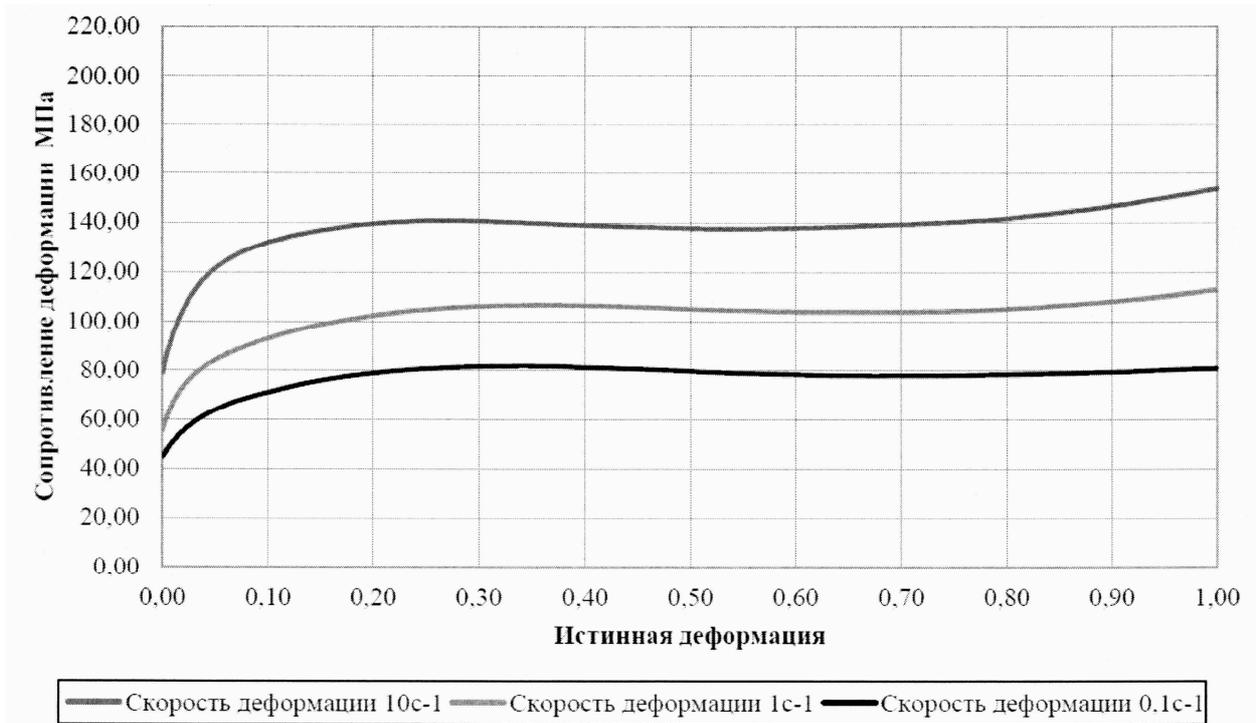
а – горизонтальное расположение образцов по сечению головки рельса;  
 б – вертикальное расположение образцов по сечению головки рельса.

Таблица 1 – План эксперимента

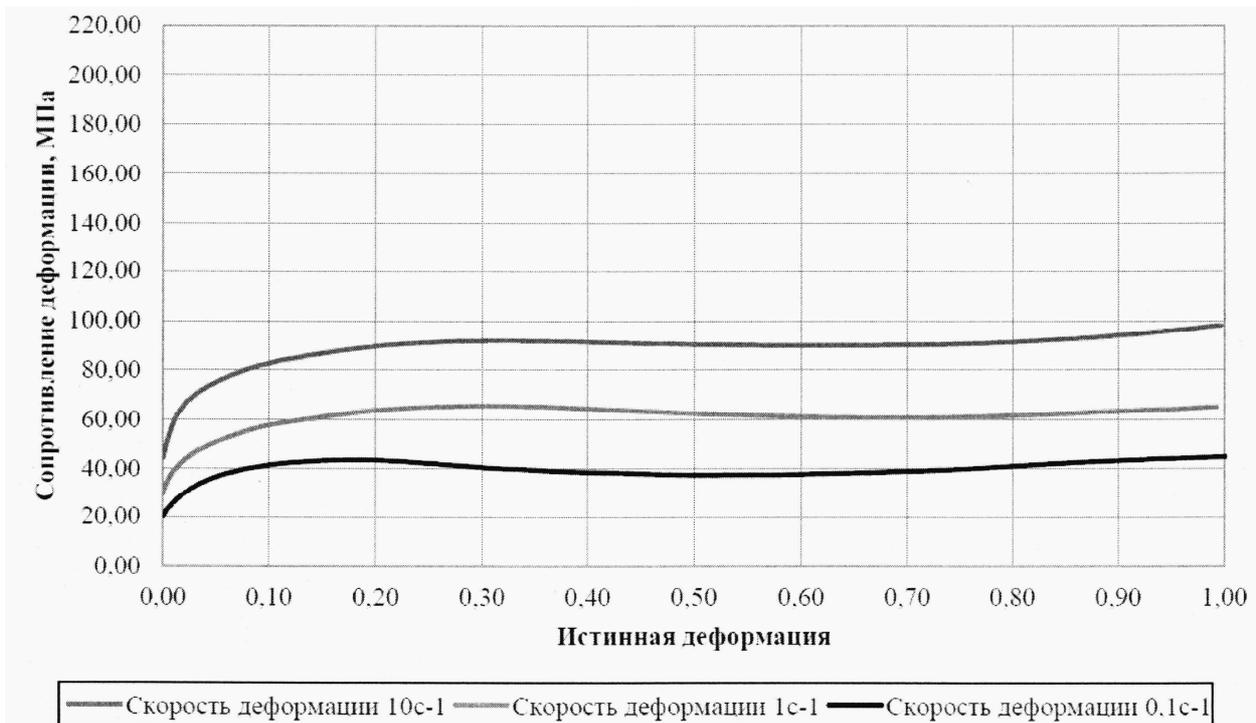
$t, ^\circ\text{C} / \varepsilon, \text{с}^{-1}$	900	950	1000	1050	1100	1150
0,1	×	×	×	×	×	×
1	×	×	×	×	×	×
10	×	×	×	×	×	×

Режим испытаний включал в себя следующие этапы: 1 – нагрев образцов в вакууме со скоростью  $5 \text{ }^\circ\text{C} / \text{с}$  до температуры  $1200^\circ\text{C}$ ; 2 – изотермическая выдержка при достигнутой температуре  $1200^\circ\text{C}$  в течение 600 с; 3 – подстуживание стали до температуры деформации ( $900\text{-}1150^\circ\text{C}$ ) со скоростью  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ ; 4 – деформация при заданной температуре ( $900\text{-}1150^\circ\text{C}$ ); 5 – охлаждение со скоростью  $10\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ .

Полученные результаты испытаний обобщены в виде графических зависимостей сопротивления деформации от степени относительной деформации, температуры и скорости и прокатки. Характер полученных кривых (на примере образцов от рельса одной из плавков – рисунок 3) свидетельствует, что



а



б

а – температура прокатки 1000°C; б – температура прокатки 1150°C.

Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости сопротивления деформации от степени деформации

при увеличении степени деформации до некоторого предела происходит увеличение значений сопротивления деформации, а затем (при достижении указанного предела) сопротивление деформации остается практически на том же

уровне или незначительно снижается. Далее, при достижении степени деформации более 0,70, сопротивление деформации вновь возрастает. Следует отметить, что полученный характер экспериментальных зависимостей до значений степени деформации на уровне 0,70 совпадает с зависимостями для различных марок сталей, полученных авторами работ [1-3] и согласуется с существующими теоретическими представлениями. В процессе деформации одновременно происходят процессы упрочнения и разупрочнения металла, и сопротивление деформации прекращает увеличиваться по достижении предела упрочнения. Из литературных данных известно, что предел упрочнения определяется химическим составом стали и температурно-скоростными условиями прокатки. На рассматриваемых плавках стали Э78ХСФ предел упрочнения наблюдается при степени деформации 0,25-0,40. В то же время участки кривых, соответствующие значениям степени деформации 0,7-1,0 не согласуются с существующими представлениями по теории прокатки и, очевидно, связаны с погрешностями эксперимента. Справедливости ради следует отметить, что в промышленных условиях такие интенсивные обжатия раската (со степенью деформации 70-100 %) не применяются, и, следовательно, полученные зависимости могут быть применены для определения энергосиловых параметров прокатки.

Касательно абсолютных значений сопротивления деформации при различных температурно-скоростных параметрах прокатки можно отметить, что по полученным данным повышение температуры прокатки стали в интервале 900-1150°C приводит к снижению сопротивления деформации, а повышение скорости деформации в интервале 0,1-10 с<sup>-1</sup> наоборот увеличивает сопротивление деформации.

На основании обработки полученных экспериментальных зависимостей сопротивления деформации от термомеханических параметров прокатки построена математическая модель вида:

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_3}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_4 \cdot t} \cdot e^{m_5 \cdot \varepsilon} \cdot u^{m_6 \cdot t}, \quad (1)$$

где A, m<sub>1</sub>-m<sub>6</sub> – константы; t – температура прокатки, °C; ε – степень деформации; u – скорость деформации, с<sup>-1</sup>.

Значения констант A, m<sub>1</sub>-m<sub>6</sub> рассчитывались путем статистической обработки данных экспериментов.

Проверка адекватности разработанной математической модели показала, что отклонения расчетных данных от экспериментальных значений не превышает 10 % (рисунок 4). Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована для расчетов сопротивления деформации при различных режимах прокатки рельсовой стали.

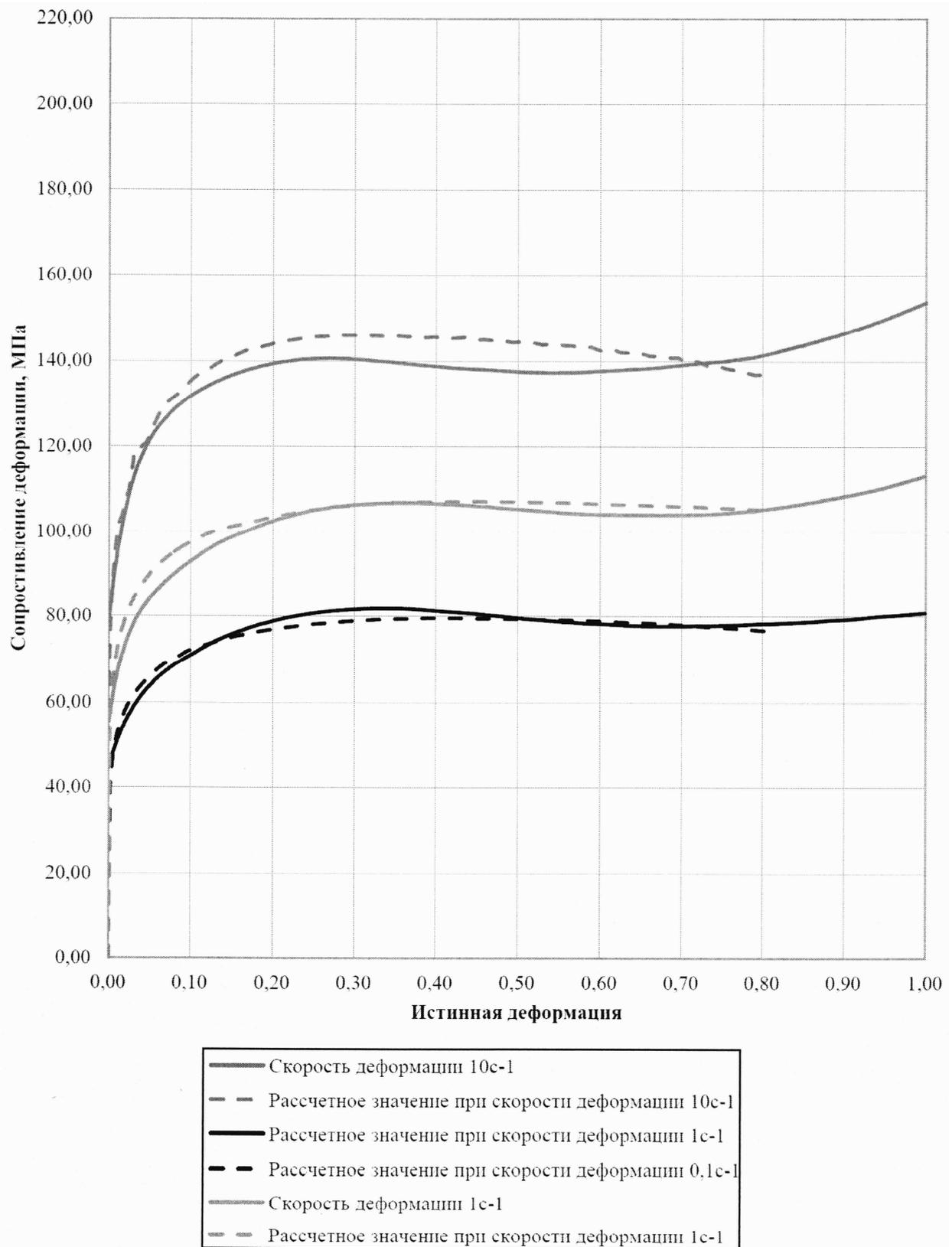


Рисунок 4 – Сопоставление расчетных данных численного моделирования и экспериментальных данных при температуре прокатки 1000°C.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов С.В. Сопротивление деформации марганцовистых сталей / С.В. Карпов, А.А. Банщиков, А.С. Карпова // Ползуновский альманах. 2003. – № 8. – С. 123-126.
2. Приходько И.Ю. Метод определения сопротивления деформации металлов со сложной зависимостью реологических свойств от параметров деформирования / И.Ю. Приходько, А.А. Сергеенко, В.В. Разносилин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины, 2007. – Вып. 14. – С. 187-193.
3. Развитие теории и практики металлургических технологий: монография в 3 т. / Под. ред. В.Н. Перетяцько, Е.В. Протопопова, И.Ф. Селянина. Т. 2: Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением / В.Н. Перетяцько, М.В. Темлянцев, М.В. Филиппова – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
4. Зюзин В.И. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке / В.И. Зюзин, М.Я. Бровман, А.Ф. Мельников. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
5. Головатенко А.В. Анализ экспериментальной зависимости сопротивления деформации рельсовой стали Э76ХСФ от температуры, скорости и степени деформации / А.В. Головатенко, В.В. Дорофеев, В.А. Трусов, К.В. Волков, А.В. Добрянский // Металлург. 2014. – № 6.

УДК 621.771.261

А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков\*, А.А. Уманский\*

ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», г. Новокузнецк

\* ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ В КЛЕТЯХ УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕЛЬСОБАЛОЧНОГО СТАНА ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ

В условиях универсального рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования энергосиловых параметров прокатки при использовании различных режимов обжатий для производства рельсов. Показана техническая возможность и подтверждена энергоэффективность снижения количества проходов в черновой клетки без увеличения числа пропусков в обжимной клетки.

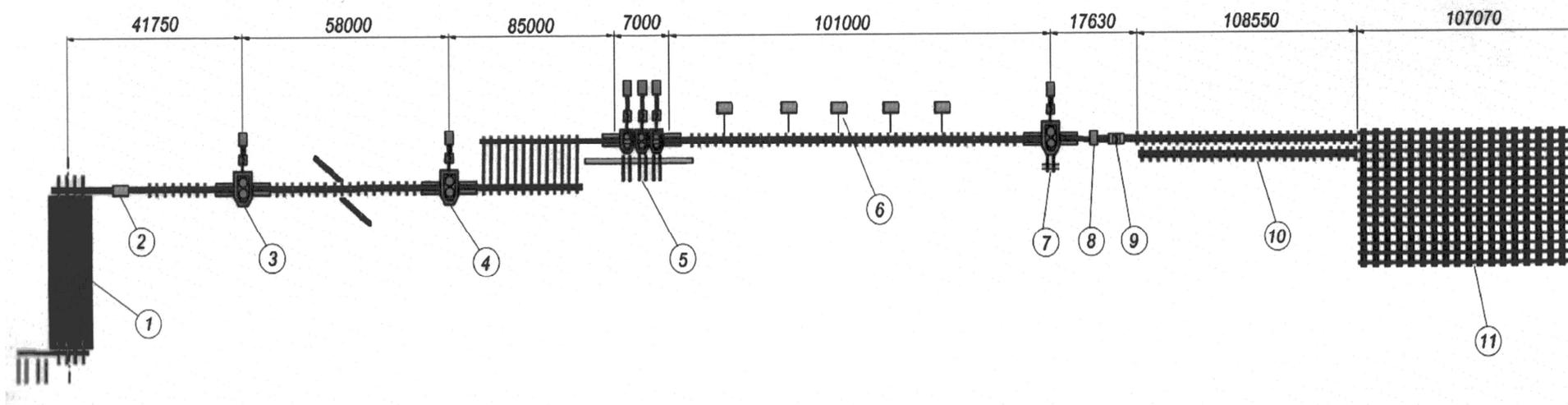
In the context of a universal rolling mill of «EVRAZ ZSMK» studied power parameters of rolling using different modes of breakdown for the production of rails. Shows the technical capability and proven energy efficiency to reduce the number of passes in the roughing stand without increasing the number of passes in assembling the stand.

Многочисленными исследованиями [1-4] показано, что интенсификация режимов обжатий при прокатке не только позволяет повысить производительность прокатных станов, снизить удельный расход электроэнергии, но и положительно влияет на качество готовой продукции – повышается качество внутренней структуры проката [1, 2], выкатываются имеющиеся на исходных заготовках поверхностные дефекты [3, 4].

При этом в условиях действующих прокатных станов возможности по интенсификации режимов обжатий лимитируются, прежде всего, допустимыми нагрузками на основное оборудование стана, в частности моментами на валу двигателей.

В ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в связи с запуском в эксплуатацию нового универсального рельсобалочного стана проблема разработки новых режимов прокатки, обеспечивающих повышение производительности и энергоэффективности, является на сегодняшний день наиболее актуальной.

Универсальный рельсобалочный стан имеет в своем составе следующее основное оборудование (рисунок 1): нагревательная печь с шагающими балками; устройства для гидросбива окалины; обжимная и черновая реверсивные клетки, имеющие последовательное расположение; универсальный тандем-



1 – нагревательная печь; 2 – устройство гидросбива окалины; 3 – обжимная клеть BD1; 4 – черновая клеть BD2;  
 5 – тандем-группа; 6 – пилы горячей резки; 7 – чистовая клеть; 8 – лазерный измеритель профиля;  
 9 – клеймитель; 10 – участок дифференцированной закалки; 11 – участок холодильника

Рисунок 1 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

стан, включающий в себя две универсальные и одну горизонтальную вспомогательную клеть; чистовая калибрующая универсальная клеть; устройства для автоматического измерения чистового профиля; клеймовочная машина.

Контрактной калибровкой поставщика оборудования предусматривается схема прокатки за 7 проходов в обжимной реверсивной клети BD1 с последующей прокаткой за 5 проходов в черновой реверсивной клети.

С целью определения возможности снижения количества проходов при прокатке в обжимной и черновой реверсивных клетях проведены исследования загрузки двигателей указанных клетей при использовании различных схем прокатки.

Обе клетки оборудованы аналогичными синхронными двигателями типа AMZ 0900LT08 LSB, технические характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателей обжимных прокатных клетей BD1 и BD2

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Номинальная скорость вращения	310 об/мин
2	Максимальная скорость вращения	982 об/мин
3	Номинальная сила тока	744 А
4	Номинальное напряжение статора	3165 В
5	Номинальная мощность	4000 кВт
6	Номинальный момент на валу двигателя - при номинальной скорости вращения - при максимальной скорости вращения	123 кН·м 39 кН·м

При проведении исследований использовали три режима прокатки (существующий и два опытных):

1) 7 пропусков в клети BD1 и 5 пропусков в клети BD2 (режим № 1 – существующий);

2) 9 пропусков в клети BD1 и 3 пропуска в клети BD2 (режим № 2);

3) 7 пропусков в клети BD1 и 3 пропуска в клети BD2 (режим № 3).

Исследования проводили методом осциллографирования работы двигателей. Результаты обработки полученных осциллограмм представлены в таблицах 2-4.

Для двигателей клетей BD1 и BD2 существуют следующие ограничения по перегрузке от номинала в процессе работы:

- не более 115 % от номинала при непрерывной перегрузке;
- не более 225 % от номинала при перегрузке в течение 30 с;
- не более 250 % от номинала при перегрузке в течение 2 с.

Таблица 2 – Статические моменты на валу двигателя клетки ВД1 при использовании различных схем прокатки

№ пропуска	Статические моменты на валу двигателя ( $M_{ст}$ ) и скорости вращения ( $n$ ) вала двигателя для различных схем прокатки					
	Режим № 1		Режим № 2		Режим № 3	
	$M_{ст}, \%$ от ном.	$n,$ об/мин	$M_{ст}, \%$ от ном.	$n,$ об/мин	$M_{ст}, \%$ от ном.	$n,$ об/мин
1	100	370	135	315	110	210
2	82	370	110	368	100	370
3	105	475	135	485	110	415
4	77	463	95	465	80	476
5	35	504	40	485	80	476
6	30	463	40	465	55	420
7	55	525	70	420	76	580
8	-		55	355	-	-
9	-		35	537	-	-

Таблица 3 – Динамические моменты на валу двигателя клетки ВД1 при использовании различных схем прокатки

№ пропуска	Средние динамические моменты на валу двигателя ( $M_{дин}$ ) за период времени ( $t$ ) для различных схем прокатки					
	Режим №1		Режим №2		Режим №3	
	$M_{дин}, \%$ от ном.	$t, c$	$M_{дин}, \%$ от ном.	$t, c$	$M_{дин}, \%$ от ном.	$t, c$
1	144	1,0	180	0,7	170	0,3
2	123	1,0	155	1,0	155	0,7
3	145	1,3	175	1,3	160	0,9
4	120	0,9	135	0,9	130	1,2
5	80	1,0	90	1,0	125	0,7
6	75	0,9	85	0,9	102	0,4
7	95	1,4	115	1,0	120	1,2
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	85	1,2	-	-

Таким образом, на основании проведенного анализа можно констатировать, что при использовании всех исследуемых схем прокатки режимы работы двигателей клеток ВД1 и ВД2 не выходят за пределы допустимых.

Таблица 4 – Статические моменты на валу двигателя клетки BD2 при использовании различных схем прокатки

№ пропуска	Статические моменты на валу двигателя ( $M_{ст}$ ) и скорости вращения ( $n$ ) для различных схем прокатки					
	Режим №1		Режим №2		Режим №3	
	$M_{ст}$ , % от ном.	$n$ , об/мин	$M_{ст}$ , % от ном.	$n$ , об/мин	$M_{ст}$ , % от ном.	$n$ , об/мин
1	66	495	85	366	105	355
2	20	455	70	344	68	315
3	92	377	35	484	38	485
4	70	344	-	-	-	-
5	33	385	-	-	-	-

С целью сравнительной оценки энергоэффективности рассматриваемых схем прокатки с использованием программного обеспечения Drive Window определены удельные расходы электроэнергии на тонну проката. Результаты представлены в таблице 5 и на рисунке 2.

Таблица 5 – Удельный расход электроэнергии при использовании различных схем прокатки в клетях BD1 и BD2

Клеть	Удельный расход электроэнергии для различных схем прокатки, кВт·ч/т		
	Режим №1	Режим №2	Режим №3
BD1	4,23	5,63	5,19
BD2	5,43	4,38	3,96
<b>Итого</b>	<b>9,66</b>	<b>10,01</b>	<b>9,15</b>

По полученным данным при использовании обоих экспериментальных режимов прокатки (режимы № 2 и № 3) наблюдается повышение удельного расхода электроэнергии при прокатке в обжимной клетке BD1 и снижение удельного расхода электроэнергии при прокатке в черновой клетке BD2. При этом суммарно по двум клетям режим прокатки № 3 является более энергоэффективным по отношению к существующей схеме прокатки (режим №1) – зафиксировано снижение удельного расхода электроэнергии на 0,51 кВт·ч/т, а режим прокатки № 2 является наименее эффективным из всех трех опробованных схем прокатки – удельный расход электроэнергии выше на 0,35 кВт·ч/т по сравнению с существующим режимом и превышает удельный расход электроэнергии при использовании схемы прокатки № 3 на 0,86 кВт·ч/т.

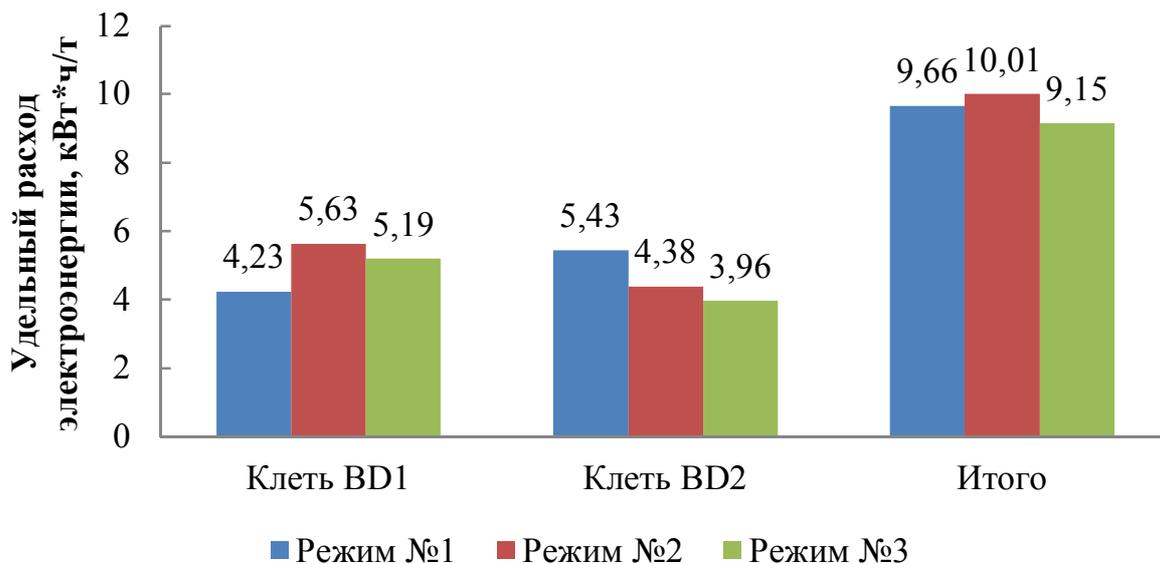


Рисунок 2 – Удельный расход электроэнергии при использовании различных режимов прокатки рельсов Р65

Таким образом, проведенными в промышленных условиях исследованиями показана техническая возможность и подтверждена энергоэффективность снижения количества проходов в черновой клетке без увеличения числа пропусков в обжимной клетке при прокатке на универсальном рельсобалочном стане ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
2. Грудев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин – М.: Металлургия, 1994 – 656 с.
3. Зильберг Ю.В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке / Ю.В. Зильберг [и др.] // Сталь. – 1997. – №10. – С. 44-46.
4. Егоров В.Д. Выкатываемость дефектов при прокатке крупносортовой стали / В.Д. Егоров [и др.] // Сталь. – 1995. – №1. – С. 32-34.

УДК 669.017:539.374[669.14.018.294.2]

А.С. Симачёв, М.В. Темлянцев, К.В. Волков\*, Е.В. Полевой\*,  
А.В. Головатенко\*

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

\* ОАО «ЕВРАЗ Объединенный «Западно-Сибирский металлургический  
комбинат», г. Новокузнецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ Э76ХФ

В статье представлены результаты исследования высокотемпературной пластичности рельсовой стали Э76ХФ в диапазоне температур 900...1200 °С. Установлено, что наилучшие показатели пластичности получены при температуре 1100 °С.

The article presents the results of research of high-temperature plasticity of rail steel Э76ХФ in the range of temperatures between 900...1200°C. It was found out that the best results of plasticity were got when the temperature was 1100 °С.

Качество рельсовой продукции в значительной степени зависит от технологии нагрева и прокатки металла [1 – 3]. Важную роль при этом играет обеспечение высокой пластичности стали, гарантирующей отсутствие трещин и рванин при деформации металла в валках. Пластичность рельсовой стали при высоких температурах во многом зависит от температурно-временного режима нагрева. При производстве рельсов из непрерывно-литых заготовок (НЛЗ) особенно важно обеспечить не только прогрев, но и создать благоприятные условия для хорошей проработки осевых зон при пластической деформации. В этой связи изучение влияния температуры нагрева в трёх зонах (корковая зона, зона столбчатых кристаллов и центральная зона заготовки) НЛЗ из рельсовой электростали на пластическую деформацию является целесообразным, поскольку это позволит скорректировать температуру нагрева заготовки из этой стали под прокатку, что повысит качество готового проката [1, 2].

В работе изучали пластичность рельсовой электростали марки Э76ХФ, химический состав которой представлен в таблице 1, при температурах от 900 до 1200 °С с контрольными точками через 50 °С. Время выдержки при температурах испытаний составляло 10 мин. Образцы ( $d_0 = 6,0...6,2$  мм;  $l_0 = 38,5...50,7$  мм) вырезали из трех зон (корковая, столбчатых кристаллов, центральная) непрерывно-литой заготовки квадратного сечения.

Таблица 1 – Химический состав стали марки Э76ХФ

С, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	V, %	P, %	S, %	Al, %
					не более		
0,75	0,77	0,55	0,42	0,04	0,025	0,025	0,020

Испытуемые образцы после нагрева и выдержки подвергались скручиванию, по методике описанной в работах [4, 5], до разрушения при скорости активного захвата 60 об/мин.

За величину предельной степени деформации металла до разрушения (критерий пластичности) принимали степень деформации сдвига, которую рассчитывали по формуле [6]:

$$\Lambda_p = \frac{\pi d_0 Z}{l_0}$$

где  $d_0$  и  $l_0$  – рабочий диаметр и рабочая длина образца, мм;  $Z$  – количество оборотов до разрушения.

При проведении испытаний на высокотемпературную пластичность корковой зоны НЛЗ стали марки Э76ХФ наблюдается постепенное повышение критерия пластичности с увеличением температуры, за исключением температуры 1050 °С, при которой происходит падение критерия пластичности. В этой связи дополнительно проведены испытания при 1025 и 1075 °С. Максимальное значение степени деформации сдвига наблюдается при температуре 1100 °С, дальнейшее увеличение температуры приводит к снижению критерия пластичности (рисунок 1).

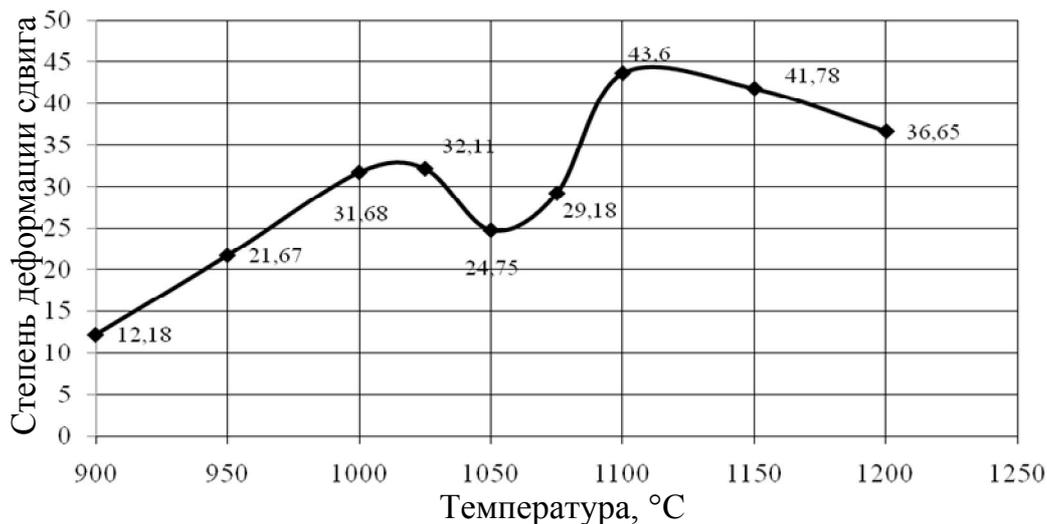


Рисунок 1 – График зависимости степени деформации сдвига от температуры испытаний на высокотемпературное кручение корковой зоны НЛЗ стали марки Э76ХФ

Зону столбчатых кристаллов, которая занимает наибольший объем НЛЗ, для изучения разделили на две части. Одна была вырезана на глубине 50 мм, другая на глубине 75 мм от поверхности НЛЗ.

При проведении экспериментов на высокотемпературное кручение образцов, вырезанных на глубине 50 мм от поверхности НЛЗ, наблюдается та же зависимость, что и в корковой зоне, за исключением меньших показателей степени деформации сдвига (рисунок 2). Максимальное значение критерия пластичности также наблюдается при температуре 1100 °С.

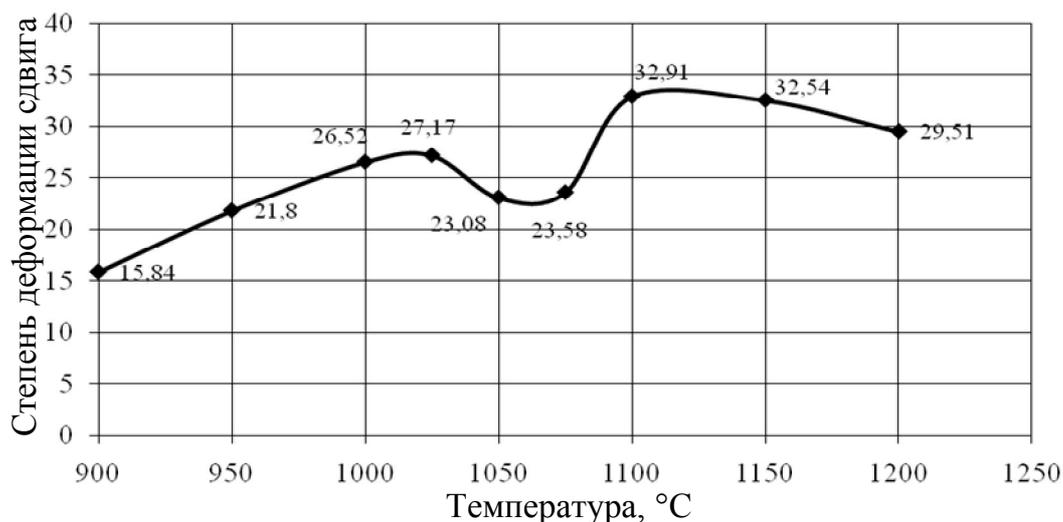


Рисунок 2 – График зависимости степени деформации сдвига от температуры испытаний на высокотемпературное кручение зоны столбчатых кристаллов НЛЗ стали марки Э76ХФ (образцы вырезаны на глубине 50 мм от поверхности)

Изучая высокотемпературную пластичность образцов, вырезанных на глубине 75 мм от поверхности НЛЗ стали марки Э76ХФ, наблюдалась иная зависимость степени деформации сдвига от температуры испытаний. Критерий пластичности плавно возрастает с 900 до 1000 °С, после чего показания пластичности остаются практически неизменными до температуры 1100 °С, при которой, как и в предыдущих случаях, наблюдаются максимальные показания степени деформации сдвига (рисунок 3).

При изучении критерия пластичности центральной зоны НЛЗ стали марки Э76ХФ наблюдалось его увеличение до температуры 1025 °С, далее значения практически не изменяются. При 1075 °С показатели вновь увеличиваются, максимум степени деформации сдвига при 1100 °С (рисунок 4).

Необходимо отметить, что при исследовании всех трех зон НЛЗ стали марки Э76ХФ максимальные показания пластичности в целом наблюдаются в корковой зоне, а минимальные в центральной зоне. Наибольшие значения степени деформации сдвига во всех зонах НЛЗ отмечаются при температуре 1100 °С.

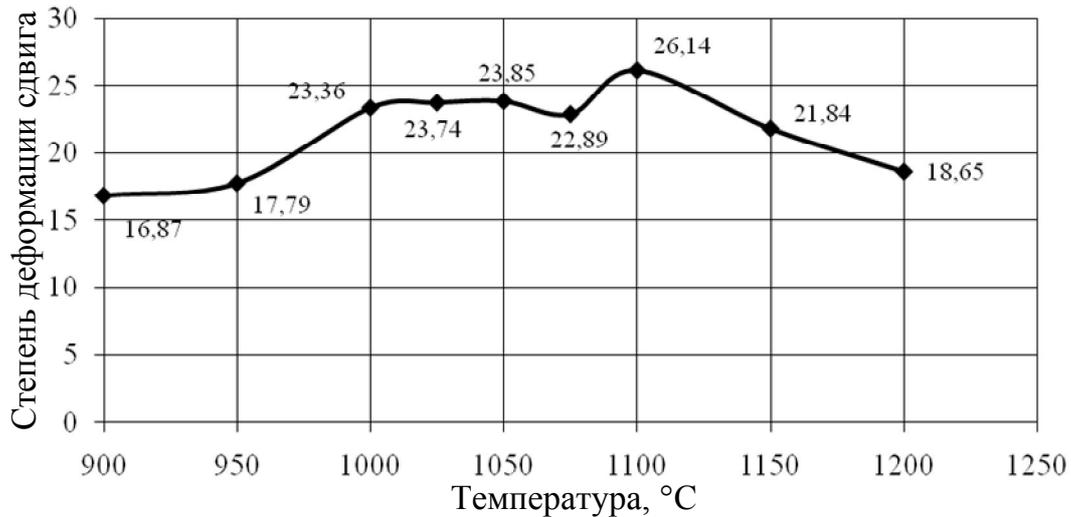


Рисунок 3 – График зависимости степени деформации сдвига от температуры испытаний на высокотемпературное кручение зоны столбчатых кристаллов НЛЗ стали марки Э76ХФ (образцы вырезаны на глубине 75 мм от поверхности)

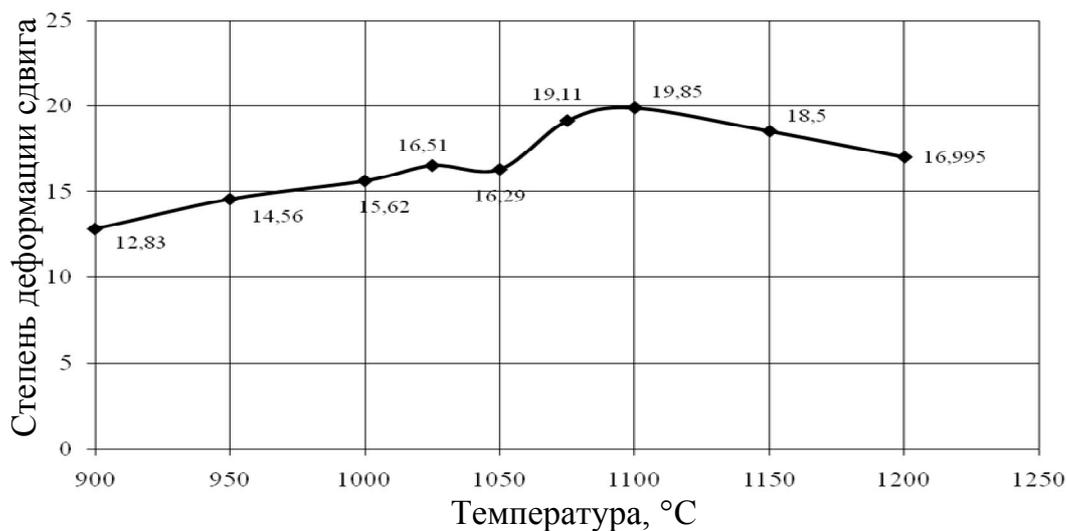


Рисунок 4 – График зависимости степени деформации сдвига от температуры испытаний на высокотемпературное кручение центральной зоны НЛЗ стали марки Э76ХФ

*Выводы.* В результате лабораторных экспериментов с применением метода горячего скручивания установлено, что для рельсовой стали марки Э76ХФ температура максимальной пластичности соответствует 1100 °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темлянцев М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В. и др. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно-литых заготовок рельсовой электростали // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2005. – № 5. – С. 47 – 49.
2. Темлянцев М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю., Темлянцев Н.В. Нагрев под прокатку непрерывнолитых заготовок рельсовой электростали // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 51 – 53.
3. Темлянцев М.В., Колотов Е.А., Сюсюкин А.Ю., Гаврилов В.В. Разработка технологии нагрева рельсовых заготовок в методической печи с шагающими балками // Сталь. – 2006. – № 12. – С. 33 – 35.
4. Симачев А.С., Темлянцев М.В., Осколкова Т.Н., Перетяцько В.Н., Базайкин В.И. Исследование высокотемпературной пластичности зон кристаллизации непрерывно-литых заготовок рельсовой стали Э76Ф // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. № 10. – С. 33–37
5. Симачев А.С., Темлянцев М.В., Осколкова Т.Н. Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76Ф // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – Вып 32. – Новокузнецк, 2014. – 23–27.
6. Перетяцько В.Н., Темлянцев М.В., Филиппова М.В. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Изд-во Теплотехник, 2010. – 352 с.

М.В Филиппова, В.Н. Перетяцько, А.А Федоров, А.С. Климов  
ФГБОУ ВПО Сибирский государственный индустриальный  
университет, г. Новокузнецк

## ВЫДАВЛИВАНИЕ КРЕСТОВИНЫ ИЗ ШАРОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Разработана новая технология штамповки выдавливания поковок типа «крестовин» из шаровой заготовки при одностороннем приложении силы. Проведено исследование напряженно – деформированного состояния металла. Изготовлена опытная партия поковок «крестовина» карданного вала автомашины ГАЗ хорошего качества.

The new extruding technology of forging of «crosspiece» type from a ball blank subjected to one-sided force has been developed. The study of the stress-strain state of the metal has been conducted. The pilot batch of high quality forgings of «crosspiece» type for cardan shaft of the vehicle GAZ has been produced.

Для передачи крутящего момента под некоторым углом используют шарниры равных угловых скоростей. Основной деталью таких шарниров является крестовина. Поковка крестовины относится к деталям типа тел вращения с боковыми отростками. Имеется несколько способов штамповки поковки «крестовина». Самым простым способом является горячая штамповка из цилиндрической заготовки в открытых штампах. Более экономичным способом производства крестовин является горячая штамповка из цилиндрической или квадратной заготовки способом выдавливания в закрытых штампах с односторонним приложением нагрузки [1]. Оба этих способа имеют существенные недостатки.

Нами предложен новый технологический процесс штамповки крестовины выдавливанием с использованием шаровой заготовки и деформации металла при температурах полугорячей штамповки. Такая технология наиболее перспективна для массового производства поковок типа тел вращения [2-4]. Шаровую заготовку получают прокаткой прутка на шаропрокатном стане. Работающие в настоящее время станы поперечно-винтовой прокатки производят шары (шаровая заготовка) от 20 до 125 мм диаметром или массой до 8 кг [5]. Ранее проведенные исследования показали, что шаровая заготовка обладает стабильной массой и ее с успехом можно использовать для безоблойной штамповки осесимметричных поковок. При осадке шара и штамповки осесимметричных поковок из шаровой заготовки текстура металла слабо зависит от расположения оси полюсов перед осадкой или штамповкой, и шаровую заготовку можно штамповать с любым расположением осей полюсов. Шаровая

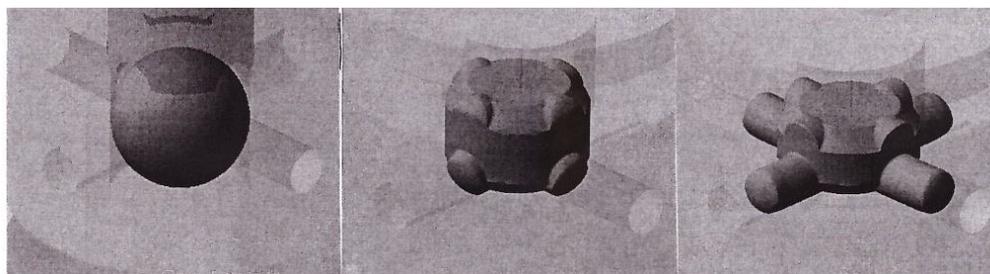
заготовка хорошо центрируется в штампе [6]. По производительности один прокатный стан заменяет 10 пресс-ножниц [5].

Технологический процесс выдавливания моделировали с использованием стали 20Х; температура штамповки 850 °С; коэффициент трения при смазке графитом – 0,1; материал штампа – сталь 5ХНМ; температура штампа – 200 °С; оборудование для штамповки – кривошипный пресс; приложение нагрузки – одностороннее. Исходная заготовка – шар диаметром 60 мм, диаметр боковых отростков – 20 мм.

На рисунке 1 показаны последовательные этапы выдавливания поковки типа «крестовина» из шаровой заготовки с односторонним приложением силы.

Процесс формоизменения металла при штамповке с боковым выдавливанием отростков можно разбить на три стадии: осадка заготовки, свободное выдавливание в боковые полости и заполнение углов боковых полостей.

На рисунке 1, б (первая стадия) видно, что шаровая заготовка при осадке приближается к цилиндрической форме. Видны наметки для последующего выдавливания отростков. Сверху видны отпечатки верхнего пуансона. В дальнейшем происходит уменьшение высоты центральной части поковки (ступицы) и вытеснение металла в боковые отростки (вторая стадия). В результате этого формируется центральная часть поковки и горизонтальные отростки крестовины (рисунок 1, в). Эта стадия процесса наиболее продолжительна по времени. При одностороннем приложении силы боковые отростки в нижней половине штампа уже сформированы, и дальнейшее их формирование будет происходить только за счет осадки верхней части ступицы. На третьей стали происходит заполнение торцевой части отростка.



а

б

в

а – исходное положение, б – осадка шара, в – заполнение отростков

Рисунок 1 – Последовательные этапы выдавливания крестовины

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла при штамповке поволок круглых в плане с боковыми отростками из шаровой заготовки с односторонним приложением силы. Отметим, что степени деформации 70 % соответствует полное заполнение гравюры штампа

Компьютерное моделирование проводили, используя метод конечных элементов. В качестве заготовки применяли шар диаметром 60 мм. Распреде-

ление интенсивности деформаций ( $\varepsilon = (2/\sqrt{3})\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$ ) по высоте ступицы приведены на рисунках 2, а и 2, б.

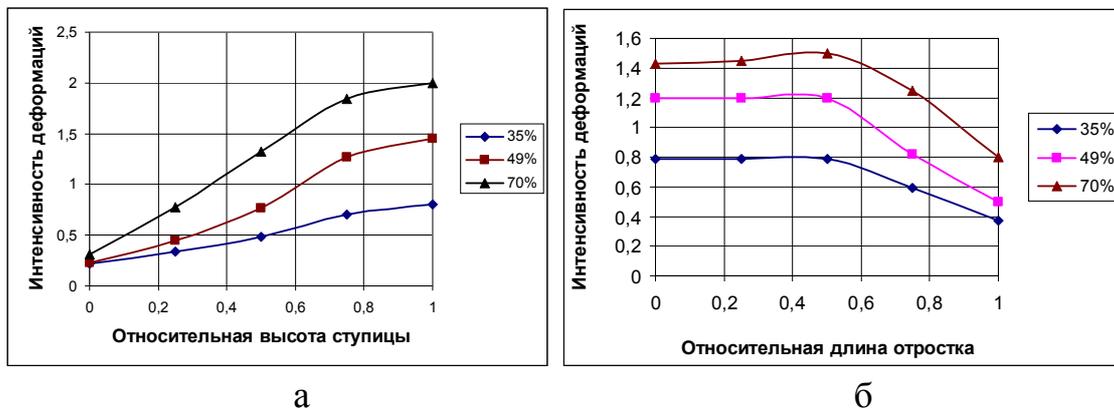


Рисунок 2 – Изменение интенсивности деформаций по высоте ступицы (а) и длины отрошков (б) от степени деформации (одностороннее приложение силы)

Как видно из рисунка 2, а, при штамповке с односторонним приложением силы, с увеличением степени деформации по ступице интенсивность деформаций возрастает. Интенсивность деформаций также возрастает от верхней части ступицы, расположенной под пуансоном, до нижней части ступицы, расположенной на матрице. Следует также отметить, что непосредственно под пуансоном при всех степенях деформации металл практически не перемещается. Можно назвать такое явление, как наличие зоны прилипания. В нижней части ступицы, при относительном расстоянии равном 1, наблюдается интенсивное течение металла, которое возрастает с увеличением степени деформации по ступице.

Интенсивность деформации по длине отрошка (рисунок 2, б) до относительной длины отрошка  $\sim 0,5$  слабо изменяется по величине. При дальнейшем увеличении длины отрошка ( $>0,5$ ) наблюдается падение величины интенсивности деформаций. Особенно резкое падение интенсивности деформаций наблюдается при высоких степенях деформации.

Для количественной оценки формоизменения металла при штамповке введем понятие «неравномерность деформации». Принимаем за величину неравномерности деформации  $Q$  отношение максимального значения интенсивности деформаций  $e_{\max}$  в сечении поковки к величине высотной логарифмической деформации по ступице  $e_{\text{ступ}}$ :

$$Q = \frac{e_{\max}}{e_{\text{ступ}}} \quad (1)$$

Таблица 1 – Неравномерность деформации по сечению крестовины и одно-  
стороннем приложении силы

Сечение	Степень деформации по ступице, %				
	21	35	49	63	70
Ступица	1,35	1,86	1,97	1,86	1,67
Отросток	1,30	1,81	1,79	1,41	1,2

Таким образом, при формоизменении металла при штамповке крестовины наблюдается большая неравномерность деформации, которая имеет максимальное значение при степени деформации по ступице 35 – 50 %.

Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по высоте ступицы приведено на рисунке 3, а и 3, б.

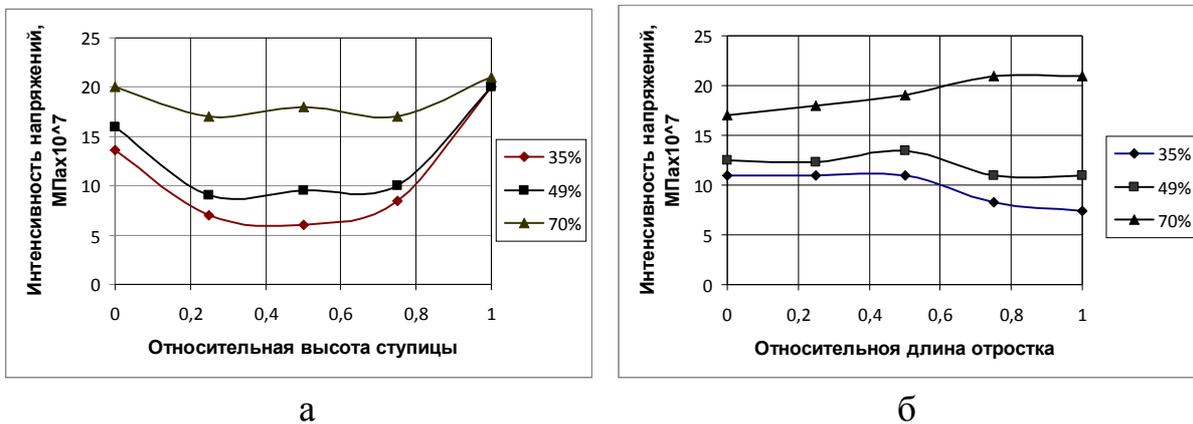


Рисунок 3 – Изменение интенсивности напряжений по высоте ступицы (а) и по длине отростка (б) от степени деформации (одностороннее приложение силы)

Наблюдаются два максимума интенсивности напряжений по высоте ступицы. Первый максимум располагается вблизи поверхности пуансона и зависит от степени деформации по ступице. Второй максимум располагается на контакте металла с матрицей и не зависит от степени деформации по ступице.

Интенсивность напряжений по длине отростка при разных степенях деформации по ступице ведет себя неоднозначно. При малой степени деформации по ступице интенсивность напряжений несколько уменьшается к торцу отростка, а при больших степенях деформации возрастает по направлению к торцу поковки. Можно отметить, что при степенях деформации по ступице 63% и выше торец поковки соприкасается с вертикальной стенкой матрицы, за счет чего происходит перераспределение интенсивности напряжений.

На рисунке 4, а и 4, б приведен график изменения среднего нормального (гидростатического) напряжения. Среднее нормальное напряжение по всему

объему ступицы сжимающее и мало зависит от степени деформации по ступице. Изменения среднего нормального напряжения по высоте ступицы не превышают 8 % (рисунок 4, а). По длине отростка среднее нормальное напряжение уменьшается от оси симметрии поковки и ее торцевой части (рисунок 4, б). Следует отметить, что на свободной торцевой поверхности отростка среднее нормальное напряжение принимает минимальное значение.

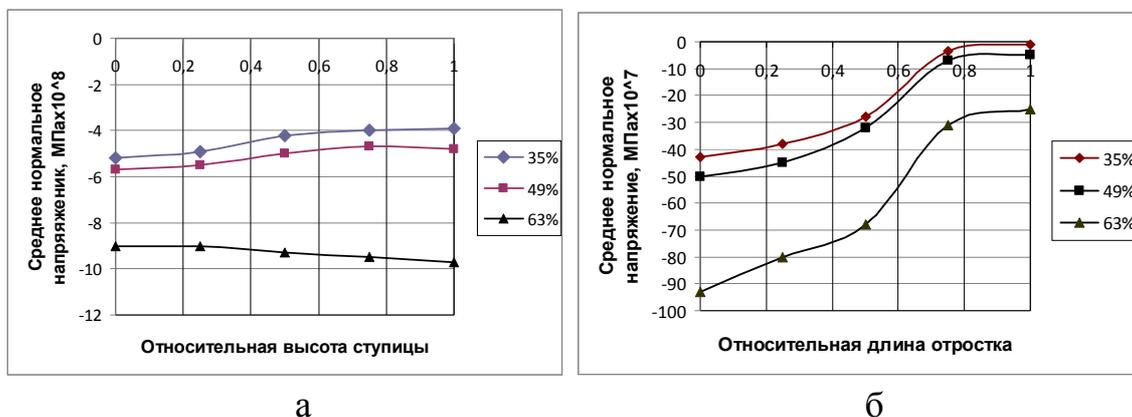


Рисунок 4 – Изменение среднего нормального напряжения по высоте ступицы (а) и по длине отростка (б) от степени деформации, (одностороннее приложение силы)

Среднее нормальное напряжение при степени деформации по ступице 70 % (полное заполнение штампа) приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Среднее нормальное напряжение МПа  $10^9$  при степени деформации по ступице 70 %

Сечение	Относительная высота или длина				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
Ступица	-3,8	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7
Отросток	-3,7	-3,7	-3,5	-3,4	-3,3

Сравнивая данные таблицы и рисунка можно отметить, что при полном заполнении гравюры закрытого штампа (степень деформации 70 %) среднее нормальное напряжение возрастает на один порядок.

При одностороннем приложении нагрузки в стадии свободного выдавливания деформирующая сила остается постоянной или несколько увеличивается. Поперечное сечение отростка искажается. Между верхней поверхностью отростка и соответствующей поверхностью боковой полости матрицы появляется зазор. При полном заполнении штампа этот зазор исчезает. Форма свободной торцевой поверхности бокового отростка в стадии заполнения не является сферической.

По результатам моделирования выдавливания крестовины получены значения сила на стадии свободного выдавливания  $P_n$  и максимальная сила при заполнении углов штампа  $P_m$ . Силы пересчитывали на удельные усилия и безразмерную величину относительного удельного усилия

$$p = \frac{P}{F_k} \quad \text{и} \quad q = \frac{p}{\sigma_T}, \quad (2)$$

где  $P$  – сила деформирования, Н;  $F_k$  – контактная площадь металла с пуансоном, мм<sup>2</sup>;  $p$  – удельная сила деформирования, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести металла при температуре, степени и скорости деформации реального технологического процесса, МПа.

В нашем случае при штамповке крестовины из стали 20Х получили величину относительного удельного усилия  $q_n=3,8$ . Величина максимального усилия выдавливания зависит от настройки штампа и может изменяться от (1,5 – 2,0)  $q_n$ . В нашем случае  $q_m=6,1$ .

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования установлено, что при выдавливании крестовины из шаровой заготовки получили поковку хорошего качества, без поверхностных дефектов. Исследование напряженно – деформированное состояние металла при выдавливании показало, что формоизменение металла происходит при объемном напряженном состоянии сжатии, которое способствует получению поковок хорошего качества.

Опытная штамповка крестовины карданного вала показала хорошее качество поковок. Технология рекомендована к промышленному использованию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эдуардов М.С. Штамповка в закрытых штампах / М.С. Эдуардов. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
2. Филиппова М.В. Моделирование безоблойной штамповки из шаровой заготовки / М.В. Филиппова, А.В. Бахаев, В.Н. Перетятько, А.А. Федоров А.А. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 10 – С. 24-27.
3. Перетятько В.Н. Моделирование штамповки осесимметричных поковок / В.Н. Перетятько, А.В. Бахаев, М.В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 4 – С. 27–29.
4. Peretyat'ko V.N., Bakhaev A.V., Filippova M.V., Varhman S.A. Stamping axisymmetric forgings // Steel in Translation. – 2009. – Т.39 – № 4. – С. 300–301.
5. Целиков А.И. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарин, М.В. Васильчиков и др. – М.: Металлургия, 1971. – 336 с.
6. Перетятько В.Н. Шаровая заготовка / В.Н. Перетятько, М.В. Филиппова, А.С. Климов и др. // Заготовительное производство в машиностроении. 2012. – № 3 – С. 17 – 19.

**ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ  
И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, О.А. Полях  
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ТЕХНОГЕННЫЙ МИКРОКРЕМНЕЗЕМ: ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА, ПОЛУЧЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Приведены результаты аналитического исследования научно-технической информации по вопросам аттестации и применения техногенного микрокремнезема, образующегося при плавке кремния и высококремнистых сплавов.

The results of analytical research of scientific and technical information on the certification and use of man-made fume formed by melting silicon and high-silicon alloys are presented.

### *Основные характеристики техногенного микрокремнезема*

Диоксид кремния входит в состав большого количества многотоннажных промышленных отходов. В отходах горнодобывающих предприятий содержится 20-80 %  $\text{SiO}_2$  [1], в металлургических отходах 16-55 % [2], в золах и золошлаках 27-63 % [3]. К отходам, в которых содержится свыше 80 %  $\text{SiO}_2$  относятся: отходы производства фтористого алюминия – 83-90 % [4]; горелая формовочная земля – 90-96 % [5]; отходы производства кристаллического кремния – до 97 % [6]; отходы производства ферросплавов – до 92 % [7].

Производство ферросплавов и кристаллического кремния сопровождается образованием больших количеств пылевых отходов, которые выносятся с газообразными продуктами. Удельное количество выбросов, образующихся при получении ферросплавов и кристаллического кремния, приведено в таблице 1 [8].

Пылевые отходы производства ферросплавов и кристаллического кремния представляют собой конденсированные аэрозоли и по общепринятой классификации относятся к категории дымов. К настоящему времени сложилась следующая терминология, объединяющая данный вид отходов [9]: Silica powder (кремнеземный порошок), Microsilica (микрокремнезем), Silica fume (кремнеземный пылеунос, силикатный дым). В отечественной практике обычно используется термин «микрокремнезем». Существует классификация кремнеземсодержащих отходов по степени эффективности в технологии изготовления бетона, разработанная в 1990 г. [10, 11]. Технические условия на микрокремнезем как добавку для бетонов приведены в таблице 2 [10].

Таблица 1 – Удельное количество выбросов, образующихся при получении ферросплавов

Ферросплав	Печь	Фактическое количество газов, поступающих на газоочистку, м <sup>3</sup> на 1 т сплава	Удельные выбросы пыли, кг/т	
			с газами	с газовоздушной смесью через вытяжную шахту
Ферросилиций:				
ФС90	Открытая	-	-	340-480
ФС75	"-	-	-	170
ФС65	Закрытая	-	-	40-55
ФС45	"-	800	15-30	3,4-6,0
ФС20	"-	350	4,5-6,5	2,4
Кремний кристаллический	Открытая	-	-	425-470

Таблица 2 – Микрокремнезем конденсированный. Технические условия ТУ 5743-048-02495332-96

Наименование показателя	Нормы для марок микрокремнезема конденсированного				
	Неуплотненного		уплотненного		паста
	МК-85	МК-65	МКУ-85	МКУ-65	МКС-85
1. Внешний вид	Ультрадисперсный порошок серого цвета		Мелкозернистый порошкообразный материал серого цвета с размером агрегатов до 0,5 мм		Тягучая жидкость серого цвета
2. Массовая доля кремнезема в пересчете на сухой продукт, % не менее	97	97	90	90	40
3. Потери при прокаливании, % масс.	≤ 3	≤ 5	≤ 3	≤ 5	≤ 5
4. Доля воды, % масс.	≤ 3	≤ 3	≤ 10	≤ 10	≤ 60
5. Доля диоксида кремния, % масс.	≥ 85	≥ 65	≥ 85	≥ 65	≥ 85
6. Доля свободных щелочей (Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O), % масс.	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
7. Доля оксида кальция, % масс.	≤ 3	≤ 5	≤ 3	≤ 5	≤ 3
8. Доля серного ангидрида, % масс.	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,6
9. Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	≥ 12	≥ 12	≥ 12	≥ 12	-
10. Индекс активности, %	≥ 95	≥ 90	≥ 95	≥ 90	≥ 95
11. Насыпная плотность сухого материала, кг/м <sup>3</sup>	150-200	150-200	280-500	280-500	-
12. Плотность пасты, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	1280
13. pH 5 %-ой водной суспензии	-	-	-	-	7

Микрокремнезем представляет собой порошок серого цвета. По химическому составу – это кремнезем с примесями Fe, Al, Ca, Mg, Mn, Ti, K, Na, преимущественно, в оксидной форме, а также  $C_{св}$ ,  $Si_{св}$ , P, S. Химический состав пыли зависит от марок выплавляемых сплавов [8], от технологии и т.п. В [9] проводились исследования химического состава микрокремнезема некоторых предприятий, выпускающих ферросплавы и кристаллический кремний: Братского алюминиевого завода; Челябинского, Новокузнецкого, Ермаковского ферросплавных заводов (таблица 3). Данные по химическому составу микрокремнезема производства кремния и ферросплавов, приведенные в [7, 8], в основном, подтверждают эти сведения.

Таблица 3 – Химический состав пыли, выделяющейся при выплавке ферросплавов и кристаллического кремния

Ферросплав	Массовое содержание, %							
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+ Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	п.п.п.
Ферросилиций ФС90, ФС75 (г. Новокузнецк)	90,1	2,0	1,7	2,3	0,8	1,9	0,6	1,6
Ферросилиций ФС75, ФС65 (г. Челябинск)	89,2	3,4	1,7	2,1	1,7	1,4	0,5	1,8
Ферросилиций ФС65, ФС45 (г. Ермак)	70,1	3,4	2,0	11,4	0,1	0,9	0,4	11,7
Кристаллический кремний марок Кр1, Кр2 (г. Братск)	91,7	0,4	0,5	1,7	-	-	-	2,0

Содержание кремнезема в пылевых отходах обычно возрастает с увеличением содержания кремния в сплаве [12, 13] и составляет ~ 60 % при выплавке низкопроцентных марок ферросилиция (ФС18-ФС45) и до 90 % – при выплавке высокопроцентных (ФС65-ФС75).

Микрокремнезем является рентгеноаморфным, что вызывает трудности при идентификации фаз [9, 14, 15]. Удельная поверхность микрокремнезема составляет 20-25 м<sup>2</sup>/г [9, 14]. Гранулометрический состав микрокремнезема также зависит от типа печи и марки сплава. В [11, 12] отмечается, что средний размер частиц микрокремнезема из открытой печи примерно в 10 раз больше, чем из закрытой.

Микрокремнезем газоочисток ферросплавного и кремниевого производств характеризуется низкой насыпной массой 0,16-0,20 т/м<sup>3</sup>, которая при вибрации в течение 30 с увеличивается до 0,25-0,30 т/м<sup>3</sup> [12]. Указанные свойства микрокремнезема затрудняют его транспортировку [7, 8, 16]. В ряде работ предложены различные способы его уплотнения, перевода в пульпу [17],

смешивания с грубодисперсными материалами [18]. Например, при добавлении 50 % песка насыпная плотность микрокремнезема увеличивается до  $0,52 \text{ т/м}^3$ , после вибрационного уплотнения смеси в течение 30 мин она составляет уже  $0,78\text{-}0,82 \text{ т/м}^3$ . Последний способ повышения насыпной плотности предназначен для микрокремнезема, используемого в строительной индустрии. На отечественных ферросплавных заводах реализуются технологии «сухого» (до плотности  $0,53 \text{ т/м}^3$ ) и «мокрого» (до плотности  $0,8 \text{ т/м}^3$ ) уплотнения [18].

Микрокремнезем отличается плохой аэрируемостью, что затрудняет его пневмотранспортировку и разгрузку из автоцементовозов и пневмоцистерн [19].

Микрокремнезем характеризуется также высокой адгезионной и аутогезионной способностью, что вызывает значительные затруднения при удалении его из емкостей. Адгезионные и аутогезионные свойства микрокремнезема изучали в [19] путем определения сдвиговых характеристик. Коэффициент внутреннего трения для микрокремнезема изменяется в зависимости от нагрузки (5-15 кПа) в пределах  $0,71\text{-}0,78$ . Для сравнения, у сухой угольной пыли при нагрузке 10 кПа он составляет  $0,72$ . Коэффициент внешнего трения по стали Ст3 при тех же нагрузках равен  $0,42\text{-}0,73$  (для угольной пыли  $0,5\text{-}0,6$ ). Начальное сопротивление сдвигу при нагрузке 10 кПа составляет для кремнеземсодержащей пыли  $1,99 \text{ кПа}$  (для угольной  $1,39 \text{ кПа}$ ). Таким образом, сдвиговые характеристики микрокремнезема сравнимы с таковыми для других промышленных пылей.

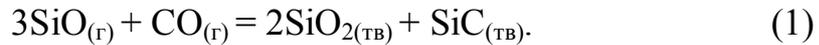
В работе [14] исследована такая характеристика микрокремнезема как «слеживаемость», препятствующая длительному хранению в бункерах и отвалах. Установлено, что адсорбционная влагоемкость микрокремнезема сравнительно невелика: количество воды, необходимое для создания одного молекулярного слоя составляет  $6,336 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2$ , количество монослоев воды, адсорбирующихся на частицах, составляет 3-4. В то же время этого количества воды достаточно для образования на поверхности частицы микрокремнезема гелеобразной фазы, увеличивающей адгезию. Гидравлическая активность микрокремнезема, оцениваемая по количеству извести, поглощенной из насыщенного раствора при температуре  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ , и водопотребность составляют  $100 - 104 \text{ кг CaO / т}$  и  $40 - 42 \%$  [9].

Таким образом, изучению свойств микрокремнезема производства кремния и ферросилиция посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов. Наиболее полно исследованы физико-технологические характеристики микрокремнезема: насыпная плотность, аэрируемость, адгезионные и аутогезионные свойства – с целью изучения возможности ее транспортирования; гидравлическая активность, водопотребность и пр. – для увеличения эффективности ее использования в строительной индустрии, самой традиционной области. Физико-химическая оценка микрокремнезема производства кристаллического кремния и ферросплавов также обычно имеет прикладной характер и производится, в основном, по химическому составу и дисперсности.

*Условия образования микрокремнезема при плавке кремния и ферросилиция в руднотермических печах*

Длительное время общепринятой являлась точка зрения, что источником микрокремнезема является часть монооксида кремния, не прореагировавшего с углеродом или сконденсировавшегося на более холодной шихте, которая выносится газами в низкотемпературные области. Однако разработанные при участии авторов подробные схемы физико-химических взаимодействий в рудно-термических печах при выплавке кремния и ферросилиция, описанные в [20 – 24], позволяют предложить более полные и достоверные балансовые схемы образования монооксида углерода и охарактеризовать механизм образования микрокремнезема как сложный многоканальный процесс. Так, при плавке ферросилиция можно выделить три возможных пути образования микрокремнезема (рисунок 1):

1) Образование микрокремнезема в самой печи в зоне температур 1400–1800 К, связанное со взаимодействиями в газовой фазе монооксидов кремния и углерода.



В печи может происходить диспропорционирование монооксида кремния, протекающее в низкотемпературных зонах при резком понижении температуры газовой фазы и концентрации SiO.

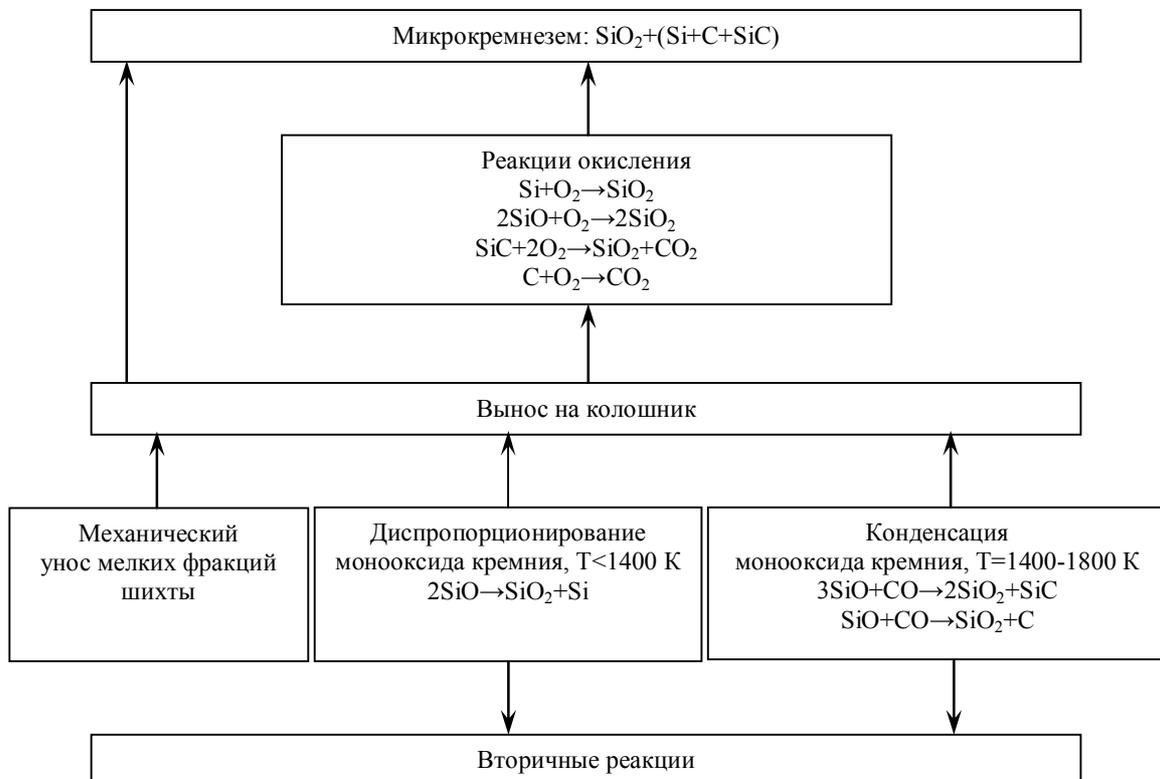
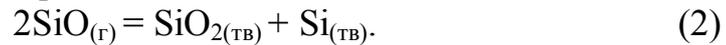
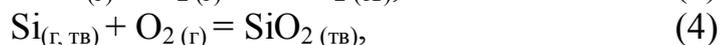
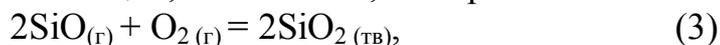


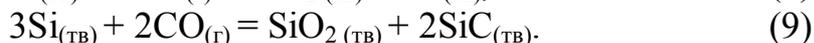
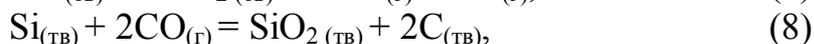
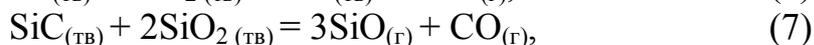
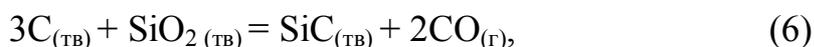
Рисунок 1 – Схема образования микрокремнезема

При очень высоких скоростях охлаждения газовой фазы (закалке) возможна также непосредственная конденсация монооксида кремния. Значительная часть микрокремнезема, образовавшегося на этом этапе, возвращается в процесс.

2) Образование микрокремнезема в результате реакций окисления на колошнике и в газоходах, протекающих, в основном, в открытых печах.



Содержание карбида кремния, кремния и углерода, вследствие развития указанных взаимодействий, а также вторичных реакций (6 – 9), в пылевых выбросах невелико, и микрокремнезем состоит, преимущественно, из диоксида кремния



3) Образование микрокремнезема вследствие механического уноса мелких фракций шихты.

Сертификация и введение в обращение техногенного микрокремнезема

Во многих странах микрокремнезем является товарным продуктом, цены на него в зависимости от качества составляют 150–250 фунтов стерлингов за тонну [25]. В России микрокремнезем также является сертифицированным товарным продуктом. Научно-исследовательским институтом бетона и железобетона (НИИЖБ, г. Москва) разработаны технические условия «Микрокремнезем конденсированный. ТУ 5743-048-02495332-96» [10], которые распространяются на микрокремнезем, получаемый при производстве кремнийсодержащих сплавов и предназначены для применения в качестве минеральной добавки к бетону и цементу. ОАО «Кузнецкие ферросплавы» в соответствии с техническими условиями «Микрокремнезем уплотненный огнеупорный. ТУ 14-142-17-01» [11] производит микрокремнезем трех видов: неуплотненный МК-85; уплотненный МКУ-85; в виде суспензии МКС-85. Микрокремнезем уплотненный огнеупорный предназначен для использования в качестве минеральной составляющей при изготовлении огнеупорных и теплоизоляционных материалов и изделий, а также в качестве высокоактивной добавки к цементу.

ОАО «Кузнецкие ферросплавы» является единственным поставщиком сертифицированного микрокремнезема на территории России. Технология производства микрокремнезема и его качество соответствуют уровню стандартов ведущих зарубежных стран, производящих и потребляющих микрокремнезем: Японии, стран ЕЭС, Канады и др. Установка по уплотнению микрокремнезема включает в себя пневмотранспортировку пыли до уплотняющих силосов; уплотнение сжатым воздухом до необходимой плотности; упаковку [26]. Введение в эксплуатацию установки уплотнения микрокремнезема

позволило полностью исключить выбросы пыли открытых печей, а уловленный микрокремнезем реализовывать как товарный продукт. Для устранения окатывания микрокремнезема до крупных частиц (более 5 мкм) и попадания инородных частиц в технологической линии предусмотрена операция рассева. С целью улучшения качества микрокремнезема установлены искроуловители на газоходах печей, осуществляющие грубую очистку от крупных частиц, что приводит к снижению в микрокремнеземе примесей, например, свободного углерода и оксидов железа.

#### *Металлургическое опробование и применение техногенного микрокремнезема*

При производстве кремния и ферросплавов на пылегазовые выбросы приходится основная доля потерь кремния, которая составляет, например, при выплавке ФС75 10-15 % [27]. Количество пыли, улавливаемой от ферросплавных печей, достигает в среднем 0,6-1 т/ч (ФС75, ФС90) [13].

Большие ресурсы пылевых отходов производства кремния и высококремнистых ферросплавов, содержащих значительное количество диоксида кремния, предопределяет актуальность проблемы рационального их использования. Однако в настоящее время на большинстве предприятий происходит дальнейшее накопление микрокремнезема. Это приводит к экономическим потерям, связанным, с одной стороны, с неиспользованием промышленно-ценных отходов, с другой, – с затратами на их складирование. Кроме того, пылевые отходы в результате беспорядочного сбора и накопления нередко теряют свою ценность как сырье для возможной переработки, а существующие в настоящее время способы хранения микрокремнезема не являются экологически чистыми. Поэтому утилизацию и использование пылевых выбросов следует рассматривать как важное направление экономии материальных ресурсов, а также повышения эффективности охраны окружающей среды при производстве кремния и кремнистых ферросплавов.

Обзор литературных данных выявил следующие аспекты проблемы использования микрокремнезема производства кремния и ферросилиция:

- наличие положительных свойств: значительное содержание кремнезема, высокая дисперсность, низкая стоимость, доступность и пр.;
- наличие негативных свойств: содержание примесей, а также низкая насыпная плотность, высокая адгезионная и аутогезионная способность и пр., затрудняющие его транспортировку, выгрузку, необходимость в компактировании (брикетировании, окусковании) при применении в традиционных металлургических технологиях.

Возможными направлениями применения микрокремнезема в технологических процессах являются вторичное использование в производстве кремния и его сплавов, а также в составе шихт производства карбида кремния.

К настоящему времени технология выплавки кремния располагает опытом утилизации пылевых отходов в качестве возврата [28, 29 – 34]. Авторами [29] указывается на технологическую эффективность применения микро-

кремнезема, выражающейся в повышении реакционной способности рудного компонента шихты и увеличении производительности электроплавки. Однако в работе [35] отмечается, что возвращение пылевых отходов в печь наносит технологическому процессу больший ущерб, чем их вынос с технологическими газами. Вероятно, это объясняется активной газификацией тонкодисперсного кремнезема в низко- и среднетемпературных зонах реакционного пространства печи и, как следствие, недостатком элементарного кремния в высокотемпературной зоне, что и приводит к повышению расхода электроэнергии и восстановителя. В [28] отмечается, что, во избежание указанных негативных моментов, проблема утилизации микрокремнезема производства кремния должна решаться на основе более глубокого изучения свойств окускованных композиций. В этом направлении требуется разработка способов окускования микрокремнезема и ведения восстановительной электроплавки, обеспечивающей возможность проникновения окускованного материала в высокотемпературную зону печи.

Один из таких способов [36] заключается в приготовлении двух- и многослойных окатышей: на поверхность углеродного окатыша предлагается наносить слой кремнеземсодержащего материала. Для улучшения использования микрокремнезема и как химического реагента рекомендуется получение двухслойных окатышей, внешний слой которых покрыт углеродсодержащей композицией, а внутренний состоит из окомкованного микрокремнезема. В работе [31] предлагается пылевые отходы производства кремния коксовать с нефтяными остатками, в результате чего обеспечивается наибольший контакт между углеродистой частью шихты и кремнеземсодержащим материалом и, следовательно, увеличивается скорость протекания основных восстановительных реакций. Подобное использование микрокремнезема позволяет снизить расход шихтовых материалов и электроэнергии. Разработан способ окускования микрокремнезема производства кремния жидким стеклом [8]. В результате получается высокопористая шихта, так называемая пеношихта, которая обладает высокими удельным электросопротивлением, механической прочностью, газопроницаемостью и т.д. Такая подготовка микрокремнезема не требует применения дорогостоящего прессового оборудования и дополнительных затрат на сушку. В [32] разработана технологическая схема получения пористых шихтовых композиций на основе тонкодисперсных кремнеземсодержащих (микрокремнезем производства кремния) и углеродистых (отходы целлюлозно-бумажных и гидролизных заводов) материалов техногенного происхождения.

При выплавке ферросилиция так же, как и в производстве кремния, существует практика вторичного использования пылевых отходов. В работе [33] приводится ссылка на опыт американских исследователей по использованию для производства кремния и ферросилиция моношихты из тонкоизмельченных компонентов, в состав которой входит микрокремнезем, углеродистый восстановитель, железосодержащий материал и вода. Полученная смесь наносится на плоскую поверхность и сушится при температуре 220 °С, просу-

шенный слой разбивается на куски и направляется на плавку ферросилиция. В обзоре [34] ссылаются на опыт норвежской фирмы «Электрокемикс» по использованию при плавке ферросилиция окатышей из микрокремнезема на воде или цементе в качестве связующего. Там же указывается на практику одного из заводов США по замене 20-25 % кварцита окатышами из микрокремнезема на воде при выплавке ферросилиция.

В работе [33] описан способ изготовления пылекоксовых брикетов, состоящих из микрокремнезема и отсевов кокса крупностью менее 5 мм, с жидким стеклом в качестве связующего. Полученные технико-экономические показатели опытных плавов в однофазной руднотермической печи мощностью 230 кВА с использованием дробленых брикетов не уступали показателям плавов ферросилиция на обычных шихтовых материалах (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты опытных плавов ферросилиция марки ФС65 с частичной заменой кварцита брикетами на основе микрокремнезема

Расход шихты, кг			Доля замены кварцита, %	Доля экспер. шихты, %	Степень извл. кремния, %	Среднее содержание кремния, %	Расход эл-эн, %	Производительность, %
кварцит	кокс	брикеты						
311	157	-	0	0	54,8	54,75	100	100
338	152	194	23,2	34,4	71,8	60,9	99,6	161
257	106	293	37,4	53,2	76,4	58,5	88,1	196
34	-	164	71,7	100	74,2	61,1	89,5	167
40	18	23,5	23,5	30,8	54,5	56,0	96,6	146

В работе [35] приводятся способы получения двух видов брикетов из микрокремнезема: для возврата в производство ферросилиция; для доменного и сталеплавильного производства. При решении первой задачи в брикеты вводили восстановитель и связующее. При решении второй задачи брикеты готовили из шихты, состоящей из фторуглеродсодержащего шлама, извести и микрокремнезема. Такие брикеты выполняли функцию разжижителя металлургических шлаков.

Таким образом, использование предварительно окускованных пылевых отходов при выплавке кремния и ферросилиция, позволяет достичь достаточно высокого извлечения кремния из кремнезема, снизить расход шихтовых материалов и электроэнергии, что, на фоне ощутимого дефицита сырьевых материалов и экологических проблем, можно рассматривать как важный показатель эффективности производства.

Результаты опробования микрокремнезема в технологии карбида кремния описаны в работах [37-40].

В работе [37] исследован технологический вариант низкотемпературного синтеза карбида кремния из микрокремнезема ферросплавного производства, рекомендуемого для применения в металлургии и электротехнике. Шихта гото-

вилась из мелкодисперсного буроугольного полукокса и пыли сухой газоочистки производства ферросилиция при массовом соотношении 0,66–0,60, перемешивалась и гранулировалась в присутствии 15–25 % связующего – водного раствора лигносульфонатов или жидкого стекла при концентрации в растворе 5–50 %. Гранулированную шихту подвергали термообработке в электропечах в течение 1 часа. Выход карбида кремния при этом составлял 79–86 %. Однако аттестационные характеристики получаемого карбида не приводились, что не позволяет судить об эффективности вышеописанного процесса.

В работах [38 – 40] исследовалась возможность получения карбида кремния из шихты, содержащей микрокремнезем и коксовую пыль, смешанных в соотношении  $M_{SiO_2} : M_C = 1 : 3$ . Смешивание проводилось в шаровой мельнице в мокром режиме в течение 60 мин., при этом кокс доизмельчался до фракции – 10 мкм. Полученный продукт в виде сметанообразной пульпы продавливался через фильеру диаметром 3 мм; высушивался естественным путем 3 суток, и затем 1 час при температуре 105 0С. Полученная окомкованная шихта обладала достаточной механической прочностью, которая сохранялась в течение 1 года. Исследования проводились в интервале температур 1570 – 1670 °С при давлении в системе 0,1 МПа. Степень восстановления микрокремнезема, близкая к 100 %, достигается при 1670 °С за 10 мин изотермической выдержки, при 1630 °С – за 20 мин. Результаты рентгеновского анализа продуктов карбидизации шихты, содержащей микрокремнезем производства ферросилиция и коксовую пыль при температуре 1670 °С, давлении 0,1 МПа при длительности выдержки в электропечи сопротивления 5 – 30 мин, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты рентгеновского анализа продуктов карбидизации шихты микрокремнезем производства ферросилиция – пыль кокса,  $t = 1670$  °С,  $P = 0,1$  МПа

Время выдержки, мин	Фазовый состав**	S, мм <sup>2</sup> d/n=0,251 нм
5	$\beta$ -кристобаллит, $\beta$ -SiC, муллит, $\alpha$ -Fe	87
10	$\alpha$ -SiC, муллит, $\alpha$ -Fe, $Ca(Mg,Fe)_3(SiO_3)_4$	202
15	$\alpha$ -SiC, $\alpha$ -Fe, муллит, $Ca(Mg,Fe)_3(SiO_3)_4$	244
20	$\alpha$ -SiC, $\alpha$ -Fe, муллит, $Ca(Mg,Fe)_3(SiO_3)_4$	242
25	$\alpha$ -SiC, $\alpha$ -Fe, муллит, $Ca(Mg,Fe)_3(SiO_3)_4$	287
30	$\alpha$ -SiC, $\alpha$ -Fe, муллит, $Ca(Mg,Fe)_3(SiO_3)_4$	324

Содержание карбида кремния в продуктах карбидизации составляло 89,77 – 92,02 % масс., а уровень дисперсности – 200 – 900 нм. По мнению авторов работ [38 – 40], достижение требуемых условий карбидизации становится возможным в проходных печах непрерывного действия (электрокальцинаторы, трубчатые электропечи сопротивления или индукционные, щелевые

керновые печи и т.п.). При этом может быть получен микропорошок карбида кремния, востребованный в металлургии и производстве огнеупоров.

### *Заключение*

1) Выполнен аналитический обзор имеющихся публикаций по вопросам аттестации и использования техногенного микрокремнезема, образующегося при плавке кремния и высококремнистых сплавов в руднотермических печах. Установлено:

2) Сочетание у микрокремнезема положительных и негативных технологических свойств: высокие содержание кремнезема и дисперсность, низкая стоимость и доступность, с одной стороны, с другой – низкая насыпная плотность, высокая адгезионная и аутогезионная способность и пр., затрудняющие транспортировку, выгрузку, хранение, необходимость использования в составе окускованных шихт.

3) Целесообразность применения микрокремнезема, в первую очередь, в строительной индустрии, в резинотехнической промышленности, в производстве огнеупоров и силикатных материалов, в металлургии в восстановительных процессах: при вторичном использовании в производстве кремния и его сплавов, синтезе карбида кремния.

4) Шихты, содержащие в разных вариантах микрокремнезем и коксовую пыль, отсева кварцита, кокса и микрокремнезем, микрокремнезем – сажу являются весьма перспективными для карбидизации в электропечах при температуре 1570 – 1670 °С и получения микропорошка карбида кремния. Однако исследования носят лабораторный характер и в качестве объекта технологической коммерциализации пока не рассматриваются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов П.И. Строительная керамика из побочных продуктов промышленности / П.И. Баженов [и др.]. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.

2. Рябов Г.Г. Исследование металлургических шлаков для изготовления замазок / Г.Г. Рябов [и др.]. // Обзорная инфор. ВНИИЭСМ. Сер.11: Использование отходов попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. – М., 1988. – С. 9-11.

3. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: Справ. пособие. Ч. I. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.

4. Ескарев А.И. Декоративный материал с добавкой отходов суперфосфатного производства / А.И. Ескарев [и др.]. // Обзорная инфор. ВНИИЭСМ. Сер.11: Использование отходов попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. – М., 1988. – С. 11-12.

5. Тандилова К. Получение цементов с применением пиритсодержащих отходов / К. Тандилова, Е. Шанакидзе // Обзорная инфор. ВНИИЭСМ. Сер.11:

Использование отходов попутных продуктов в производстве строительных материалов и изделий. Охрана окружающей среды. – М., 1988. – С. 7-9.

6. Приходько А.А. Декоративный бетон с комплексной добавкой красного шлама и пыли кремния / А.А. Приходько [и др.]. // Тезисы докл. конф. «Разработка ресурсосберегающей технологии, эффективных технологий производств строительных материалов и конструкций» – Днепропетровск, 1988. – С. 144-145.

7. Каприелов С.С. Эффективный путь утилизации ультрадисперсных продуктов газоочистки печей / С.С. Каприелов [и др.]. // Сталь. – 1992. – № 5. – С. 83-85.

8. Гасик М.И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1999. – 764 с.

9. Батраков В.Г. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон / В.Г. Батраков [и др.]. / Бетон и железобетон. – 1990. – № 12. – С. 15-17.

10. ТУ 5743-048-02495332-96. Микрокремнезем конденсированный. Введ. 01.08.1996, Москва.

11. ТУ 14-142-17-01. Микрокремнезем уплотненный огнеупорный. Введ. 05.05. 2001. Новокузнецк.

12. Страхов В.М. Использование колошниковой пыли производства ферросилиция для улучшения свойств углеродистого восстановителя / В.М. Страхов [и др.]. / Сб. науч. тр. «Кремнистые ферросплавы» – М.: Металлургия, 1988. – С. 77-81.

13. Максимов Ю.С. Пылевидные отходы при выплавке ферросилиция / Ю.С. Максимов // Производство ферросплавов: Темат. отр. сб. – М.: Металлургия, 1978. – С. 81-84.

14. Стороженко Г.И. Определение основных характеристик пылевидных отходов производства ферросилиция / Г.И. Стороженко, К.А. Черепанов. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 2. – С. 152-155.

15. Евсеев Н.В. Изучение свойств пыли, уловленной в аппаратах систем газоочистки при производстве кремния на ИркАЗе и БрАЗе / Н.В. Евсеев [и др.]. // Современное состояние и перспективы развития производства кремния : тез. докл. Всес. науч.-тех. конф. – Братск, 1989. – С. 102.

16. Еремин В.П. Создание технологии гранулирования и упаковки пыли газоочистки производств технического кремния / В.П. Еремин, А.А. Соколовский. // Пути повышения качества продукции кремниевого производства : тез. докл. межд. науч.-тех. конф. – Иркутск, 1994. – С. 74-75.

17. Вертий И.Г. Утилизация пылевидных и шлаковых отходов производств кремнистых ферросплавов / И.Г. Вертий [и др.] // Сталь. – 1987. – № 8. – С. 42-43.

18. Снитко Ю.П. Утилизация сухой пыли от производства ферросилиция / Ю.П. Снитко [и др.] // Совершенствование производства ферросилиция : материалы заводской науч.-тех. конф. – Вып. 3. – Новокузнецк, 1997. – С. 349-360.

19. Ливенец В.И. Физико-механические свойства кремнеземистой пыли, образующейся при производстве ферросилиция / В.И. Ливенец, В.М. Динельт, К.А. Черепанов. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 8. – С. 152-153.
20. Якушевич Н.Ф. Взаимодействие углерода с оксидами кальция, кремния, алюминия / Н.Ф. Якушевич, Г.В. Галевский – Новокузнецк: СибГИУ, 1999. – 250 с.
21. Якушевич Н.Ф. Физико-химические взаимодействия в руднотермических печах при плавке кремния / Н.Ф. Якушевич, О.А. Коврова. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 8 – С. 3-8.
22. Якушевич Н.Ф. Механизм межфазных взаимодействий в ванне ферросилициевой печи / Н.Ф. Якушевич [и др.]. // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей : материалы Всеросс. науч.-тех. сов. / С.-ПбТИ. – С.-Пб., 1998. – С. 59-65.
23. Полях О.А. Физико-химические процессы пылеобразования при выплавке ферросилиция // О.А. Полях, Г.В. Галевский, Н.Ф. Якушевич [и др.]. // Сб. науч. тр. «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» / СибГИУ. – Новокузнецк, 1999. – Вып. 8. – С. 41-45.
24. Полях О.А. Разработка и освоение технологии плазмометаллургического производства карбида кремния с использованием микрокремнезема для композиционного никелирования и хромирования : автореф. дисс. ...канд. техн. наук / О.А. Полях : СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – 23 с., граф. – Библиогр.: С. 20 – 23 (23 назв.).
25. Виноградов С.В. Перспективы использования пыли газоочистных производств ферросилиция / С.В. Виноградов [и др.]. // Сталь. – 1989. – № 4 – С. 41-44.
26. Бондарев А.А. Опыт улучшения качества товарного микрокремнезема на ОАО «Кузнецкие ферросплавы» / А.А. Бондарев [и др.] // Металлургия России на рубеже XXI века : труды Междунар. науч.-практич. конф. Т. I / ГОУ ВПО «СибГИУ». – Новокузнецк, 2005. – С. 314-317.
27. Бердников В.И. Приближенная тепломассообменная модель процесса выплавки ферросилиция / В.И. Бердников // Повышение эффективности и качества ферросплавов : темат. сб. тр. / МУН СССР. – М.: Металлургия, 1986. – С. 71-80.
28. Зельберг Б.И. Шихта для электротермического производства кремния / Б.И. Зельберг, А.Е. Черных, К.С. Елкин. – Челябинск: Металл, 1994. – 320 с.
29. Евсеев Н.В. Влияние добавок пылевого отхода на физико-химические превращения в шихте при выплавке технического кремния / Н.В. Евсеев, Н.В. Головных, Н.Ф. Радченко. // Цветные металлы. – 1991. – № 10. – С. 29-31.
30. Щадис В.С. Разработка и применение высокопористых композиционных видов сырья для выплавки кремния: автореф. дисс. ... канд. тех. наук /

В.С. Щадис: Иркутский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 1997. – 19 с.: граф. – Библиогр. С. 18-19 (14 назв.).

31. Ознобихин Л.М. Способ утилизации отходов кремниевого производства / Л.М. Ознобихин [и др.] // Современное состояние и перспективы развития производства кремния : тез. докл. Всесоюз. науч.-тех. конф. – Братск, 1989. – С. 102.

32. Черных А.Е. Тонкодисперсные техногенные материалы как сырье для выплавки кремния / А.Е. Черных [и др.]. // Пути повышения качества продукции кремниевого производства : тез. докл. междуна. науч.-тех. конф. – Иркутск, 1994. – С. 9-11.

33. Павлов С.Ф. Использование сухой пыли газоочисток для плавки ферросилиция / С.Ф. Павлов [и др.]. // Совершенствование производства ферросилиция : материалы завод. науч.-тех. конф. – Новокузнецк, 1997. – Вып. 3. – С. 388-394.

34. Толочко А.И. Утилизация пыли и шламов в черной металлургии / А.И. Толочко [и др.]. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 152 с.

35. Волынкина Е.П. Брикетирование пыли и отсеков как способ получения кондиционного сырья и продукции в производстве ферросилиция / Е.П. Волынкина, С.А. Кудашкина, В.М. Машинский. // Совершенствование производства ферросилиция : материалы завод. науч.-тех. конф. – Новокузнецк, 1997. – Вып. 3. – С. 367-370.

36. Жучков В.И. Совершенствование технологии получения высококремнистых сплавов / В.И. Жучков // Современное состояние и перспективы развития производства кремния : тез. докл. Всесоюз. науч.-тех. конф. – Братск, 1989. – С. 17-19.

37. А.С. 1730035 (СССР) МКИ С01В31/36. Способ получения карбида кремния / В.М. Динельт, В.И. Ливенец. – № 4768209/26; заявл. 12.12.89; опубл. 16.08.1992.

38. Якушевич Н.Ф. Технология углестермического синтеза микропорошков карбида кремния / Н.Ф. Якушевич [и др.] // Новые материалы и технологии : тез. докл. науч.-тех. конф. / МГАТУ. – М., 1994. – С. 32.

39. Якушевич Н.Ф. Кинетика углестермического восстановления кремнеземсодержащих пылевых отходов / Н.Ф. Якушевич, О.А. Коврова, Г.В. Галевский. // Пути повышения качества продукции кремниевого производства : тез. докл. междуна. науч.-тех. конф. – Иркутск, 1994. – С. 48-49.

40. Полях О.А. Оценка возможности и целесообразности использования мелкодисперсных кремнеземсодержащих материалов в восстановительных процессах / О.А. Полях [и др.]. // Сб. науч. тр. «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» / СибГИУ. – Новокузнецк, 1999. – Вып. 8. – С. 29-40.

А.Е. Аникин, О.А. Полях, Г.В. Галевский, В.В. Руднева  
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛЕВИДНОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЯ И ЖЕЛЕЗО-КРЕМНИСТЫХ СПЛАВОВ

Исследованы фазовый и химический составы, дисперсность и морфология частиц микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и его сплавов с железом. Установлена технологическая целесообразность применения его в производстве микропорошков карбида кремния.

The phase and chemical composition, dispersion and particle morphology of fume generated in the production of silicon and its alloys with iron are investigated. The feasibility of its technology in the production of silicon carbide micro-powders is established.

Большие объемы пылевых отходов производства кремния и высококремнистых ферросплавов, содержащих значительное количество диоксида кремния, определяют актуальность проблемы рационального их использования. Однако в настоящее время на большинстве предприятий происходит дальнейшее накопление микрокремнезема. Это приводит к экономическим потерям, связанным, с одной стороны, с неиспользованием промышленно-ценных отходов, с другой, – с затратами на их складирование. При этом пылевые отходы в результате беспорядочного сбора и накопления нередко теряют свою ценность как сырье для возможной переработки, а существующие в настоящее время способы хранения микрокремнезема не являются экологически чистыми. Поэтому утилизацию и использование пылевых выбросов следует рассматривать как важные направления экономии материальных ресурсов и повышения экологической безопасности производства кремния и кремнистых ферросплавов. Однако для эффективного применения микрокремнезема необходима комплексная аттестация его физико-химических характеристик.

Анализ литературных данных выявил такие характеристики микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и ферросилиция, как значительное содержание кремнезема, относительно высокое содержание примесей, высокая дисперсность, доступность. При этом значительное количество работ, обобщенных в [1], посвящено изучению свойств микрокремнезема, образующегося при производстве ферросилиция. Однако физико-химическая оценка микрокремнезема носит сугубо прикладной характер, а

изучению таких характеристик как химический, фазовый, гранулометрический составы достаточного внимания не уделяется. Исследования, направленные на аттестацию микрокремнезема, образующегося при производстве кремния, немногочисленны, хотя по химическому составу он представляет большой интерес как возможный сырьевой материал технологических процессов.

В связи с этим целью настоящей работы является комплексная физико-химическая аттестация микрокремнезема, включающая определение фазового и химического составов, удельной поверхности, размера и морфологии частиц. Исследовался микрокремнезем, получаемый при выплавке кристаллического кремния марки Кр1 на ОАО «РУСАЛ – Иркутск» (МК-Кр), и микрокремнезем, получаемый при производстве ферросилиция марки ФС75 на ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (МК-ФС).

#### *Определение фазового состава*

Фазовый состав микрокремнезема исследовался методами рентгеновского, термогравиметрического и ИК-спектроскопического анализов. Для определения фазового состава образцов использовался стандартный рентгеновский дифрактометр общего назначения ДРОН-3 (излучение  $K_{\alpha}$  меди, напряжение 36 кВ, сила тока 14 мкА). Термогравиметрический анализ микрокремнезема проводился на дериватографе системы «Паулик – Паулик – Эрдей». В качестве эталона использовался прокаленный оксид алюминия. Скорость нагрева составляла 10 град./мин., чувствительность весов 0,050 г, величина навески 0,250 г. Спектрограммы микрокремнезема получены на спектрографе марки Sпecord-751R в области частот 400 – 4000  $\text{см}^{-1}$  при величине навески 0,3; 0,6 и 3 мг. Для подготовки образцов к съемке применялся метод прессования в бромиде калия при концентрации вещества в таблетке 1 % масс.

В результате проведения рентгеновского анализа установлено, что в образцах микрокремнезема МК-Кр и МК-ФС кремнезем присутствует в аморфном состоянии. Из кристаллических фаз выявлена только шпинель типа  $\text{FeO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3)$ , дающая слабый пик в области  $d/n = 0,2480$  нм на дифрактограммах микрокремнезема МК-Кр.

Аморфное состояние микрокремнезема вызывает трудности при идентификации фаз, что также отмечается в работе [2]. В связи с этим для определения кристаллических составляющих в массе микрокремнезема проведено седиментационное отделение тяжелой фракции и отмагничивание магнитной фракции. Идентификация фаз осуществлялась по данным [3]. Установлено, что магнитная фракция микрокремнезема МК-ФС состоит из кристаллического кремния, магнетита, гематита, обнаружены следы  $\alpha$ -кварца и  $\alpha$ - $\beta$ -карбида кремния (таблица 1). В немагнитной фракции идентифицированы силикаты типа  $\alpha$ - $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_3)_4$  и карбид кремния, а в тяжелой, содержащей небольшое количество кристаллической фазы, определен только карбид кремния. Образцы микрокремнезема МК-Кр не содержат магнитной фракции в достаточном для исследования количестве, а в тяжелой

фракции идентифицированы  $\alpha$ -кварц, карбид кремния, силикат типа  $Al_2O_3 \cdot SiO_2$  (таблица 2).

Таблица 1 – Дифракционные характеристики магнитной фракции микрокремнезема производства ферросилиция

Межплоскостное расстояние, d/n, нм	Интенсивность пика * I, %	Фазовый состав **				
0,3310	15					$\alpha$ -кварц
0,3190	94		Si			
0,2990	38	$Fe_3O_4$ ***				
0,2720	22				$Fe_2O_3$	
0,2550	100	$Fe_3O_4$		SiC	$Fe_2O_3$	
0,2110	12	$Fe_3O_4$				
0,1952	15		Si			
0,1672	15				$Fe_2O_3$	
0,1621	28	$Fe_3O_4$	Si			
0,1528	13			SiC		
0,1487	22	$Fe_3O_4$				

Примечание: \* - по отношению к самому сильному пику из данной серии.  
 \*\* - фазы представлены в порядке убывания.  
 \*\*\* - фаза на основе магнетита типа  $Me_3O_4$  с примесями.

Таблица 2 – Дифракционные характеристики тяжелой фракции микрокремнезема производства кремния

Межплоскостное расстояние d/n, нм	Интенсивность пика I, %	Фазовый состав		
0,3340	100	$\alpha$ -кварц		$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
0,3250	23			
0,2520	54		SiC	
0,2410	15	$\alpha$ -кварц		
0,2250	20	$\alpha$ -кварц		
0,1544	23		SiC	
0,1317	19		SiC	
0,1260	17		SiC	

Для ИК-спектров микрокремнезема характерно наличие трех интенсивных полос поглощения при 1400-900, 875-700, 700-400  $cm^{-1}$ , и полос средней интенсивности при 3680-3110, 2400-2300, 1930-1800, 1700-1588  $cm^{-1}$  (рисунок 1). Согласно работам [4 – 6], полоса поглощения 3680-3300  $cm^{-1}$  достаточно однозначно может быть отнесена к валентным колебаниям свободных и ассоциированных групп  $[OH]^-$ . Возможно, этот рефлекс обусловлен наличием в микрокремнеземе гидратированных оксидов железа, кальция, алюминия.

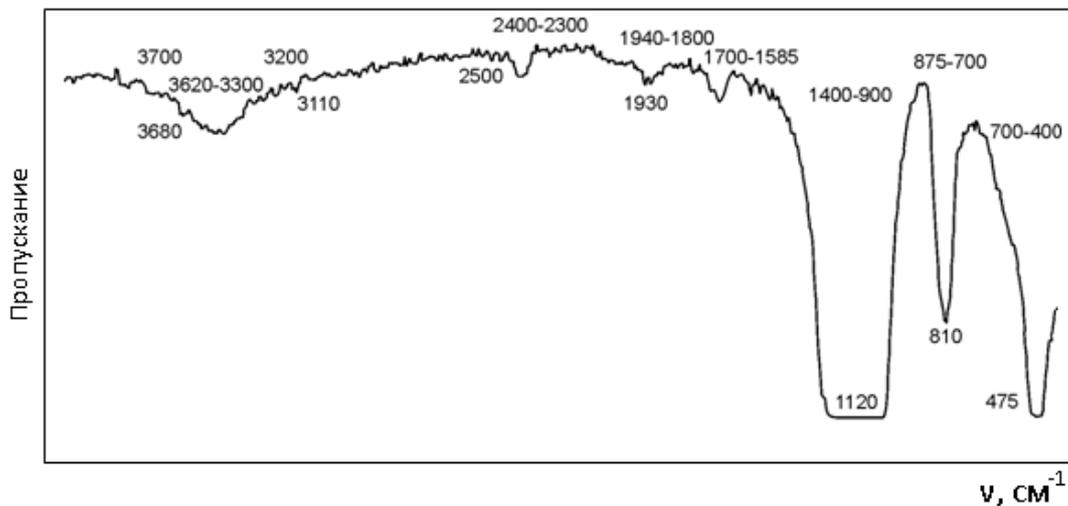
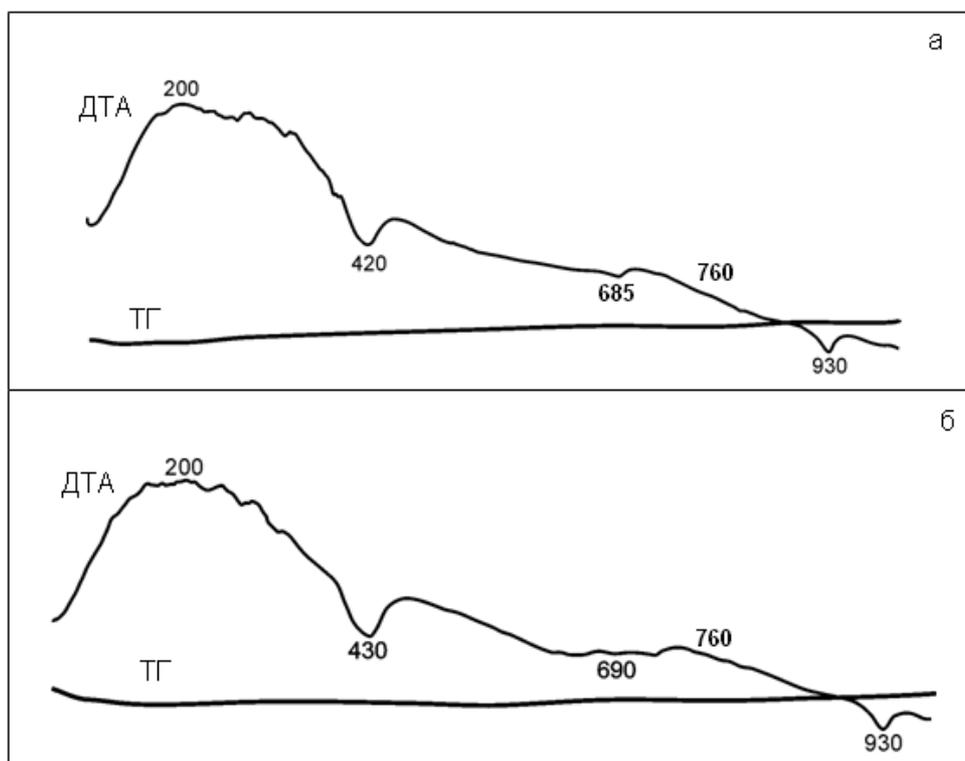


Рисунок 1 – Инфракрасный спектр микрокремнезема МК-Кр

Полоса поглощения  $1700-1580 \text{ см}^{-1}$  связана с проявлением деформационных колебаний единичных молекул воды. Полосы поглощения при  $2400-2300 \text{ см}^{-1}$  и  $1940-1800 \text{ см}^{-1}$  обусловлены, вероятно, присутствием кальциевых силикатов. Полосы поглощения при  $1400-900$ ,  $875-700$ ,  $700-400 \text{ см}^{-1}$  являются характеристическими для группы  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ . При этом, полосы в области  $1100 \text{ см}^{-1}$  относятся к валентным, в области  $460-530 \text{ см}^{-1}$  к деформационным колебаниям  $\text{SiO}_4$ -тетраэдра, полоса в области  $830-750 \text{ см}^{-1}$  объясняется колебаниями Si-O-Si. Для кристобалита характеристическими частотами являются:  $465$ ,  $523$ ,  $695$ ,  $784$  и  $807$  (дублет),  $1095$  и  $1168$  (дублет)  $\text{см}^{-1}$ ;  $\alpha$ -кварц имеет рефлексы при  $495$ ,  $620$ ,  $756$ ,  $1106$  и  $1200$  (дублет)  $\text{см}^{-1}$  [6]. Поэтому полосы при  $1400-900 \text{ см}^{-1}$  (с максимумом около  $1120 \text{ см}^{-1}$ ),  $875-700 \text{ см}^{-1}$  (с максимумом  $475 \text{ см}^{-1}$ ) могут быть определены как характеристические для этих модификаций. Отсутствие на спектре дублетов обусловлено аморфным состоянием кремнезема.

Кривые ДТА образцов микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и ферросилиция, снятые на воздухе в интервале температур  $20-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , практически идентичны (рисунок 2). В обоих случаях в интервале температур  $80 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит десорбция влаги. На кривых ДТА также наблюдается три эндоэффекта при температурах  $420$  и  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $685$  и  $690 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  и экзоэффект при  $760 \text{ }^\circ\text{C}$ . Эффект при температуре  $420 \text{ }^\circ\text{C}$  может быть объяснен поведением оксидов железа, в частности, дегидратацией гетита и переходом его в гематит [4, 5]. Эффект при  $685 \text{ }^\circ\text{C}$  характеризует полиморфное превращение  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и хорошо выражен на термограмме микрокремнезема МК-ФС. Эффекты при  $760 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  обусловлены, по видимому, окислением свободного углерода и полиморфным превращением силикатов [4, 7].



а – МК-ФС; б – МК-Кр, температура указана в °С

Рисунок 2 – Дериwатограммы микрокремнезема

Определенная по кривой ТГ убыль массы образцов составляет 3,6 % для МК-ФС и 4,1 % для МК-Кр. Уменьшение массы образцов происходит в интервале температур 100-1000 °С и обусловлено отдачей неструктурной воды и окислением свободного углерода.

Результаты рентгеновского, ИК-спектроскопического и термического анализов образцов исходного микрокремнезема и выделенных тяжелой и магнитной фракций хорошо согласуются между собой и дают достаточно полное представление о фазовом составе. В работе [2] при фазовом анализе микрокремнезема, образующегося при производстве ферросплавов, удалось идентифицировать только  $\alpha$ -тридимид,  $\alpha$ -кварц и магнетит.

#### *Определение химического состава*

Химический состав микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и ферросилиция, определялся по стандартным методикам [8]. Результаты исследования представлены в таблице 3. Установлено, что содержание основной фазы - кремнезема - составляет 93,41-95,33 % масс. в МК-Кр и 91,72-93,63 % масс. в МК-ФС. Свободный углерод в МК-Кр содержится в количестве 1,96-3,28 % масс., в МК-ФС – 0,56-1,18 % масс., свободный кремний в количестве 0,30-0,34 % масс. и 0,18-0,20 % масс., соответственно. Потери при прокаливании микрокремнезема МК-Кр составляют 2,36 – 2,94 %, при прокаливании микрокремнезема МК-ФС – 2,62 - 2,72 %, что согласуется с результатами термографического анализа.

Анализируя результаты фазового и химического анализов, можно сделать вывод о том, что различия в составе микрокремнезема, образующегося при производстве кремния и высококремнистого ферросилиция, немногочисленны и заключаются в следующем:

- свободный кремний содержится в кристаллической форме в микрокремнеземе МК-ФС и в аморфной – в микрокремнеземе МК-Кр. Это объясняется различными скоростями закалки возгонов: при производстве кремния пылегазовый поток орошается водой, при производстве ферросилиция охлаждение достигается за счет большого разбавления воздухом;
- железо содержится в различных формах: в виде магнетита в микрокремнеземе МК-ФС и шпинели  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  – в микрокремнеземе МК-Кр. Вероятно, небольшое содержание железа в сырьевых материалах при производстве кремния предопределяет возможность его кристаллизации только в составе сложных соединений, чаще шпинелидного типа;
- повышенное содержание свободного углерода в микрокремнеземе МК-Кр может быть связано с выносом углеродистого восстановителя с газовой фазой в результате практикуемого "рыхления" шихты;
- большее содержание примесей в микрокремнеземе МК-ФС объясняется использованием в технологическом процессе железосодержащих материалов и менее чистых кварцитов.

Таблица 3 – Химический состав микрокремнезема

Содержание $\text{SiO}_2$ и примесей, % масс.	Микрокремнезем	
	МК-Кр	МК-ФС
$\text{SiO}_2$	93,41-95,33	91,72-93,63
CaO	0,41-0,49	0,52-0,55
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,81-0,91	0,62-1,43
MnO	0,03-0,05	0,24-0,32
MgO	следы	0,92-1,08
$\text{TiO}_2$	0,01-0,03	следы
$\text{C}_{\text{своб.}}$	1,96-3,28	0,56-1,18
$\text{Si}_{\text{своб.}}$	0,30-0,34	0,18-0,20
П.п.п.	2,36-2,94	2,62-2,72

#### *Определение дисперсности и морфологии частиц*

Дисперсность и морфология частиц микрокремнезема исследовались методами БЭТ и электронной микроскопии.

Удельная поверхность определялась по адсорбции аргона при температуре кипения жидкого азота на "тренированных" в инертной среде при 400 °С для удаления сорбированной влаги и газов образцах [9]. Погрешность измерения удельной поверхности не превышала 5 %.

Исследование формы и размера частиц микрокремнезема осуществлялось методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии [10, 11].

В первом случае исследования проводились с использованием просве-

чивающего электронного микроскопа EF/4-M/P "Karl Zeis" с ускоряющим напряжением 65 кВ. При проведении исследований подтверждены отмеченные в целом ряде работ, в частности, [12], трудности приготовления препаратов из наноуровневых порошков, образующих благодаря когезионным силам достаточно прочные вторичные агрегаты, не разрушаемые традиционными методами, например, диспергированием в вязкой среде (раствор нитроцеллюлозы в амилацетате). Положительные результаты были получены при реализации следующей методики приготовления препаратов. Навеска порошка массой 0,1 г смешивалась с 500 мл 50 %-ного раствора этилового спирта и обрабатывалась ультразвуком в диспергаторе ЗДН-1 в течение 15-30 мин. Капля полученной суспензии наносилась на угольную подложку толщиной 0,025-0,25 мкм и высушивалась при температуре 323 К. При работе с нанодисперсными порошками использовалось увеличение до 40000.

Во втором случае исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа JSM-6700 F с ускоряющим напряжением 0,5-30 кВ и разрешением 0,1 нм при 15 кВ и 0,22 нм при 1 кВ [13]. Приготовление препаратов осуществлялось следующим образом. На предварительно прокатанную из индия пластину размером 10×8×1 мм насыпали порошок микрокремнезема, вдавливали напыленный слой и остатки удаляли обдувом поверхности. Далее исследовались частицы, импрегнированные в металлическую матрицу. При исследовании порошков увеличение составляло до 300000.

Удельная поверхность микрокремнезема обоих видов составляет 20000-22000 м<sup>2</sup>/кг. Изучение микрофотографий, полученных методами просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии, показывает, что оба вида микрокремнезема в состоянии поставки представлены агрегатами шарообразной формы различных размеров, изменяющихся в широком диапазоне – от 100 до 600 нм. Отдельные агрегаты образованы шарообразными частицами преимущественно размера 50-80 нм, число которых в агрегате зависит от его крупности (рисунки 3 – 5).

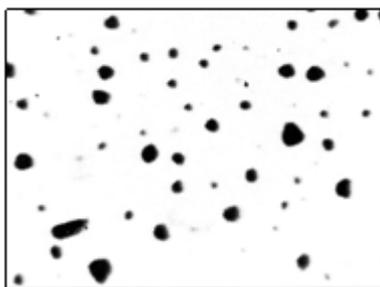


Рисунок 3 – Микрофотография (ПЭМ) микрокремнезема МК-ФС, × 20000

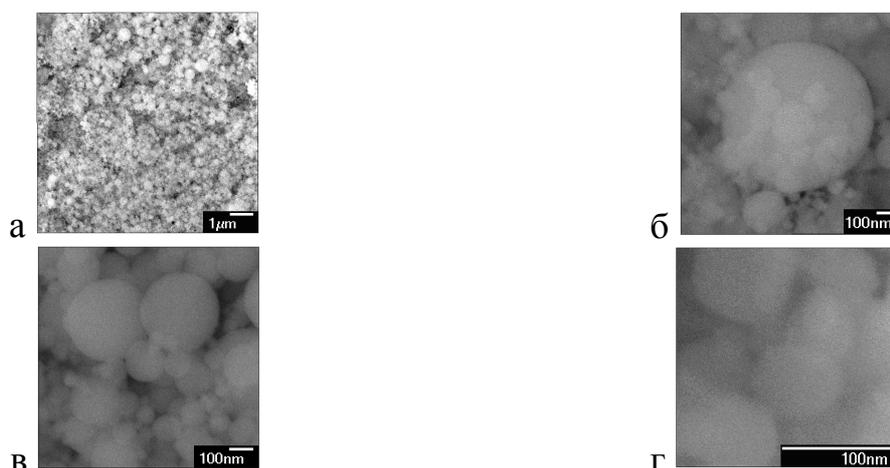


Рисунок 4 – Микрофотографии (РЭМ) микрокремнезема МК-Кр: а – в состоянии поставки; б – морфологическая картина агрегата; в – ансамбль частиц и агрегатов; г – отдельные частицы

Сопоставление результатов, полученных методами ПЭМ и РЭМ, показывает, что в первом случае констатируется только агрегирование частиц, а обращение к методу РЭМ позволяет отследить морфологическое строение агрегатов, форму и размеры отдельных частиц. Именно возможностями используемого метода ПЭМ объясняются ранее установленные характеристики дисперсности порошков микрокремнезема, описанные, в частности, в работах [14 – 16] и утверждение, что микрокремнезем, образующийся при производстве кремния и ферросилиция, состоит из частиц преимущественно сферической формы размером 0,1-0,4 мкм, объединенных в агрегаты размером до 1 мкм. Определение в работе [17] среднего размера частиц микрокремнезема в 3 мкм и размеров агрегатов в 17 мкм обусловлено, по-видимому, некачественной подготовкой препаратов для электронно-микроскопических исследований.

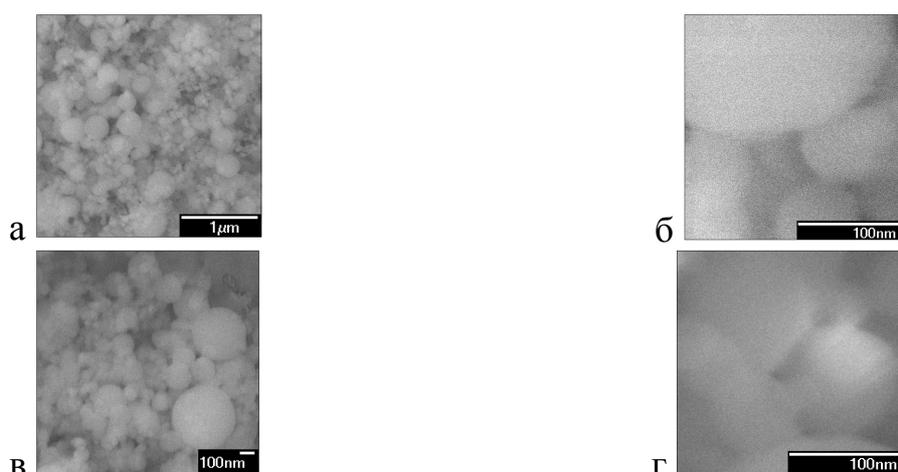


Рисунок 5 – Микрофотографии (РЭМ) микрокремнезема МК-ФС: а – в состоянии поставки; б – агрегат шаровидной формы диаметром 240 нм; в – ансамбль частиц и агрегатов; г – отдельные частицы

### *Заключение*

Проведена физико-химическая аттестация микрокремнезема, образующегося при производстве кремния (МК-Кр, ОАО «РУСАЛ - Иркутск») и высококремнистых сплавов (МК-ФС, ОАО «Кузнецкие ферросплавы»). Содержание кремнезема составляет в МК-Кр 93,41 – 95,33, в МК-ФС – 91,72 – 93,63 % масс., свободных кремния и углерода 0,30 – 0,34 и 0,18 – 0,20, 1,96 – 3,28 и 0,56 – 1,18 % масс. соответственно. Частицы микрокремнезема имеют форму, близкую к сферической, их крупность находится в пределах 100 нм, величина удельной поверхности составляет 20000 – 22000 м<sup>2</sup>/кг. Полученные результаты подтверждают технологическую целесообразность применения микрокремнезема МК-Кр и МК-ФС в производстве микропорошков карбида кремния.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния : монография : в 3 т / науч. ред. Г.В. Галевский ; Т. 1. Микрокремнезем в производстве карбида кремния / О.А. Полях, В.В. Руднева. – М.: Флинта: Наука, 2007. – 248 с.
2. Стороженко Г.И. Определение основных характеристик пылевидных отходов производства ферросилиция / Г.И. Стороженко, К.А. Черепанов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 2. – С. 152 – 155.
3. Index (Inorganic) to the Diffraction Fil. – Philadelphia, 1973.
4. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: ВШ, 1981. – 335 с.
5. Накамото Н. Инфракрасные спектры силикатов / Н. Накамото. – М.: Мир, 1967. – 268 с.
6. Плюсина И.И. Инфракрасные спектры минералов / И.И. Плюсина - М.: Изд. МГУ, 1976. – 175 с.
7. Топор Н.Д. Термический анализ минералов и неорганических соединений / Н.Д. Топор, Л.П. Огородова, Л.В. Мельчакова. – М.: Изд. МГУ, 1987. – 190 с.
8. ГОСТ 23581.15-81\* – ГОСТ 23581.22-81\*. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы химического анализа. - Введ. 01.01.81, изменен 1.02.87. – М.: ИПП Изд-во стандартов, 2003. – 440 с.
9. ГОСТ 23401-90. Порошки металлические, катализаторы и носители. Определение удельной поверхности. – Введ. 22.12.90. – М.: ИПП Изд-во стандартов, 2003. – 440 с.
10. Кларк Э.Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э.Р. Кларк, К.Н. Эберхард. – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.
11. Штанский Д.В. Возможности просвечивающей микроскопии высокого разрешения для изучения наноматериалов / Д.В. Штанский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70. – № 10. – С. 31-38.

12. Рыжонков Д.И. Ультрадисперсные системы: получение, свойства, применение : учеб. пособие / Д.И. Рыжонков, Ц.В. Левина, Э.Л. Дзидзигури. – М.: МИСиС, 2003. – 182 с.

13. Научно-исследовательский центр коллективного пользования «Материаловедение и металлургия». – М.: МИСиС, 2006. – 32 с.

14. Галевский Г.В. Физико-химические характеристики пылевых выбросов при производстве ферросилиция и перспективы использования кремнистой пыли в электротермических процессах / Г.В. Галевский, Ю.Л. Крутский, В.В. Руднева // Рациональное использование природных ресурсов Сибири : материалы рег. науч.-практ. конф. / ТГУ. – Томск, 1989. – С. 30-31.

15. Галевский Г.В. Состав и физико-химические свойства кремнистой пыли ферросплавного производства / Г.В. Галевский, Т.В. Киселева, В.В. Руднева / Изв. вузов. Черная металлургия. – 1992. – № 6. – С. 10-12.

16. Полях О.А. Анализ условий образования и физико-химическая аттестация микрокремнезема / О.А. Полях, Г.В. Галевский, Н.Ф. Якушевич // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : тр. Первой Междунар. науч.-практ. конф. / СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – С. 224-229.

17. Виноградов С.В. Перспективы использования пыли газоочистных производств ферросилиция / С.В. Виноградов [и др.]. // Сталь. – 1989. – № 4 – С. 41-44.

# **ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

О.В. Олесюк, С.В. Коновалов, Д.А. Романов,  
К.Ю. Бондаренко, В.Я. Целлермаер

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ИЗНОСО- И ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Проанализированы закономерности формирования износо- и электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления и последующей электронно-пучковой обработки, выполнено изучение их структуры, фазового состава и свойств.

Analyzed regularities of wear and erosion-resistant coatings by electro explosive electro deposition and subsequent electron-beam processing, carried out a study of their structure, phase composition and properties.

Для электротехнического машиностроения, создающего коммутационную электроаппаратуру, постоянно требуются новые материалы для электрических контактов. Это объясняется тем, что, в основном, именно они формируют аппаратные характеристики, способность длительно и надежно коммутировать электрический ток. Разрушение электрических контактов, выполненных из дорогостоящих материалов, работающих в условиях электрической эрозии и трения, как правило, начинается с поверхности. В связи с этим разработка новых методов защиты именно поверхности, а не всего объема электрического контакта, оказывается экономически эффективным. Одним из приоритетных направлений физики конденсированного состояния является разработка методов повышения эксплуатационных характеристик различных материалов [1]. С учетом этого упрочнение поверхностных слоев материалов электрических контактов и деталей, работающих в условиях трения, является актуальной задачей развития новых современных технологий.

Кроме того, интенсивное использование металлов и сплавов в различных отраслях промышленности и техники выдвинуло в ряд актуальных проблему улучшения их физических и механических свойств, а также эксплуатационных характеристик [2-4].

В последние годы доказано, что электровзрывное напыление композиционных покрытий способствует совместному увеличению до нескольких раз физико-механических и эксплуатационных свойств: микротвердости, электроэрозионной стойкости, износостойкости в условиях абразивного износа и сухого трения скольжения. Упрочнение достигается за счет формирования покрытий с образованием мелкодисперсных фаз в вязкой металлической матрице. Эффективным инструментом для дополнительной обработки электро-

взрывных покрытий являются высокоинтенсивные импульсные сильноточные электронные пучки. Исследования последних лет показали, что возможности электровзрывной обработки могут быть существенно усилены при совместном ее использовании с электронно-пучковой обработкой, осуществляемой низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками [5, 6].

В связи с этим целью настоящей работы является формирование износо- и электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления (ЭВН) и последующей электронно-пучковой обработкой (ЭПО), изучение их структуры, фазового состава и свойств.

ЭВН проводили на электровзрывной установке ЭВУ 60/10М, ЭПО выполняли на установке «СОЛО» [5, 6].

Емкостный накопитель энергии установки разряжается на взрываемый проводник, закрепляемый на электродах плазменного ускорителя коаксиально-торцевого типа. Образующаяся при электровзрывном разрушении проводника многофазная плазма формируется в струю, являющуюся инструментом воздействия на поверхность. В струе всегда содержатся конденсированные частицы продуктов взрыва и частицы порошковых навесок, вводимые в область взрыва, которые формируют покрытие.

ЭВН проводили с использованием композиционного электрически взрываемого материала (КЭВМ) для нанесения покрытий, представляющего собой двуслойную фольгу с заключенной в ней навеской порошка. Использование КЭВМ позволяет реализовать перемешивание продуктов взрыва фольги и порошка при формировании струи. При напылении покрытий системы TiB<sub>2</sub>-Al фольга КЭВМ была алюминиевой, а навеска порошка – диборид титана, для системы TiC-Mo фольга была молибденовой, а навеска порошка – карбид титана, соответственно. Композиционные покрытия систем W-Cu, Mo-Cu, W-C-Cu, Mo-C-Cu и TiB<sub>2</sub>-Cu формировали на электрических контактах из электротехнической меди марки М00. Для ЭВН использовали КЭВМ из медной фольги и порошки Mo, W, TiB<sub>2</sub>, (Mo + C) и (W + C). ЭПО электроэрозионностойких покрытий всех систем осуществляли в режимах при длительности импульса 100 мкс, количестве импульсов 10 при изменяемой поверхностной плотности энергии 45, 50, 55 и 60 Дж/см<sup>2</sup> и при длительности импульса 200 мкс, количестве импульсов 20 и поверхностной плотности энергии 60 Дж/см<sup>2</sup>. Параметры формирования покрытий представлены в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 режимы воздействия, выделенные фоном, обеспечивают формирование электровзрывных износо- и электроэрозионностойких покрытий систем TiB<sub>2</sub>-Al, TiC-Mo, W-Cu, Mo-Cu, W-C-Cu, Mo-C-Cu и TiB<sub>2</sub>-Cu.

В результате исследования рельефа поверхности, строения по глубине, структуре и фазовом составе, состояния дефектной субструктуры, значения коэффициента трения, удельного объема изнашивания, электроэрозионной стойкости композиционных покрытий, а также результаты испытаний в условиях производства покрытий, сформированных при ЭВН и ЭПО, установлено следующее.

Таблица 1 – Параметры формирования покрытий

Подложка	Покрытие	Параметры ЭВН		Параметры ЭПО		
		$q$ , ГВт/м <sup>2</sup>	$m$ , мг	$E_s$ , Дж/см <sup>2</sup>	$t$ , мкс	$N$ , имп.
Алюминий марки А99	TiB <sub>2</sub> -Al	3,5	50/100	-	-	-
			100/100	-	-	-
			150/100	-	-	-
Сталь 45	TiC-Mo	4,5	142/284	-	-	-
			213/284	-	-	-
			284/284	-	-	-
Медь марки М00	W-Cu	4,1	272/238	45	100	10
				50	100	10
				55	100	10
				60	100	10
				60	200	20
	Mo-Cu	4,1	272/238	45	100	10
				50	100	10
				55	100	10
				60	100	10
				60	200	20
	TiB <sub>2</sub> -Cu	4,1	272/238	45	100	10
				50	100	10
				55	100	10
				60	100	10
				60	200	20
	Mo-C-Cu	4,1	272/27/ 238	45	100	10
				50	100	10
				55	100	10
				60	100	10
				60	200	20
W-C-Cu	4,1	232/18/ 238	45	100	10	
			50	100	10	
			55	100	10	
			60	100	10	
			60	200	20	

*Примечание.*  $E_s$  – поверхностная плотность энергии;  $t$  – длительность импульсов;  $N$  – количество импульсов. Частота следования импульсов составляла 0,3 Гц. Фоном выделены оптимальные режимы ЭПО

Методом оптической интерферометрии определен комплекс характеристик топографии поверхности покрытий [7-15]. Параметр шероховатости Ra для базовой поверхности электровзрывных покрытий системы TiB<sub>2</sub>-Al со-

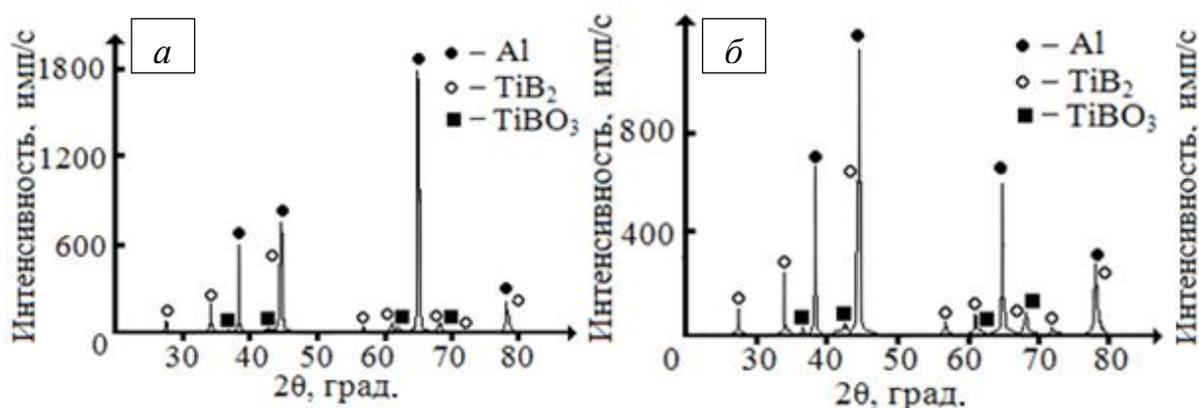
ставляет 2,5...2,7 мкм, а для системы TiC-Mo – 3,1...3,3 мкм. ЭПО электроэрозионностойких покрытий приводит к формированию зеркального блеска их поверхности и низкого значения Ra = 1,1...1,2 мкм, что ниже исходных значений Ra электрических контактов без ЭВН. Параметры шероховатости сформированных покрытий приемлемы для практического использования.

После ЭВН покрытий систем TiC-Mo и TiB<sub>2</sub>-Al на поверхности можно выделить ряд особенностей рельефа: наплывы, обусловленные радиальным течением металла от центра пятна напыления к периферии, микрократеры, микротрещины, наслоения, образовавшиеся в результате конденсации частиц продуктов взрыва фольги и порошков, достигающих облучаемой поверхности из тыла струи, и неравномерно распределенные деформированные закристаллизовавшиеся микрокапли.

Композиционные покрытия систем TiC-Mo и TiB<sub>2</sub>-Al представляют собой металлическую матрицу с упрочняющими включениями частиц порошков. Объемное соотношение металлического компонента и частиц порошка соответствует их соотношению в композиционном электрически взрываемом проводнике. Установлено формирование на границе покрытия с подложкой зоны проникновения частиц порошков в подложку без нарушения ее сплошности.

Рентгеноспектральный микроанализ различных участков покрытий системы TiC-Mo показал, что область набора рентгеновского спектра, выбранная на включении, образована титаном. Эти включения являются карбидом титана. Область набора рентгеновского спектра, выбранная на участке покрытия без включений, – молибденом.

Рентгенофазовый анализ покрытий системы TiB<sub>2</sub>-Al, напыленных в различных режимах, показал (рисунок 1), что они состоят из Al, TiB<sub>2</sub> и TiBO<sub>3</sub>.

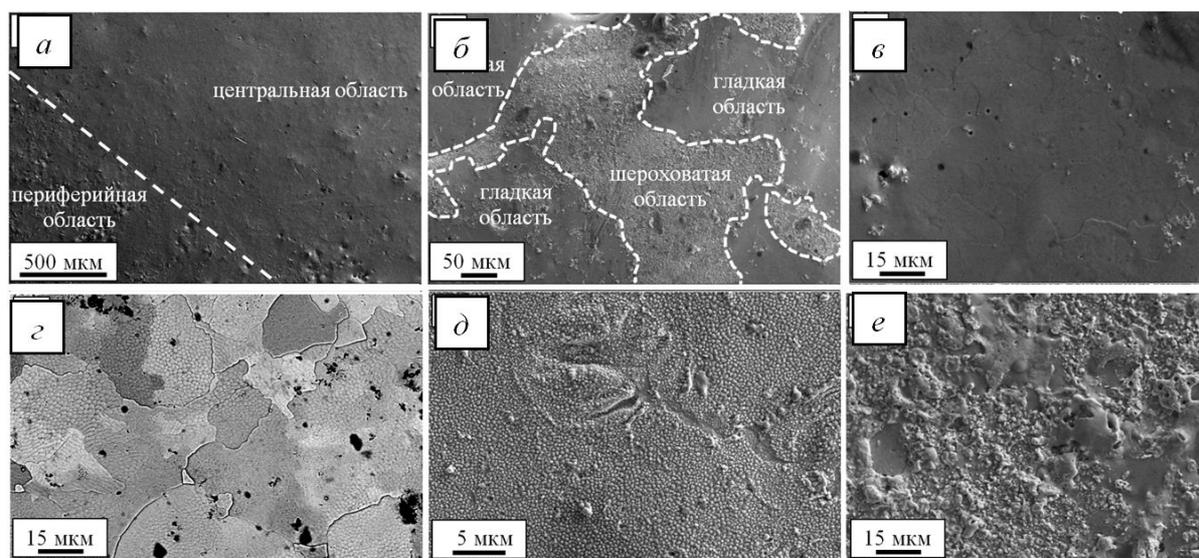


$$a - m_{\text{TiB}_2}/m_{\text{Al}} = 50/100, \quad b - m_{\text{TiB}_2}/m_{\text{Al}} = 100/100$$

Рисунок 1 – Участки рентгенограмм покрытий системы TiB<sub>2</sub>-Al, напыленных в различных режимах

Покрyтия обеих систем обладают композиционной наполненной структурой, представляющей собой для системы TiC-Mo молибденовую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями карбида титана, а для системы TiV<sub>2</sub>-Al – алюминиевую матрицу с расположенными в ней упрочняющими включениями диборида титана [9].

ЭПО электровзрывных электроэрозионнотойких покрытий независимо от элементного состава и режима облучения сопровождается плавлением слоя толщиной от 30 до 50 мкм; поверхность облучения выглаживается, исчезают микрокапли, микрократеры и микротрещины (рисунок 2, а). Формируется поликристаллическая структура, размер зерен которой при плотности энергии пучка электронов 60 Дж/см<sup>2</sup> (100 мкс, 10 имп.) изменяется в пределах от 3 до 40 мкм. Увеличение длительности воздействия пучка электронов до 200 мкс (20 имп.) при этой же плотности энергии пучка электронов приводит к формированию более однородной зеренной структуры (размер зерен изменяется в пределах от 10 до 20 мкм). В объеме зерен, независимо от плотности энергии пучка электронов, наблюдается структура ячеистой кристаллизации, характерная для материала, охлажденного с высокими скоростями. Размер ячеек изменяется в пределах от 0,25 до 0,5 мкм (рисунок 2, д).

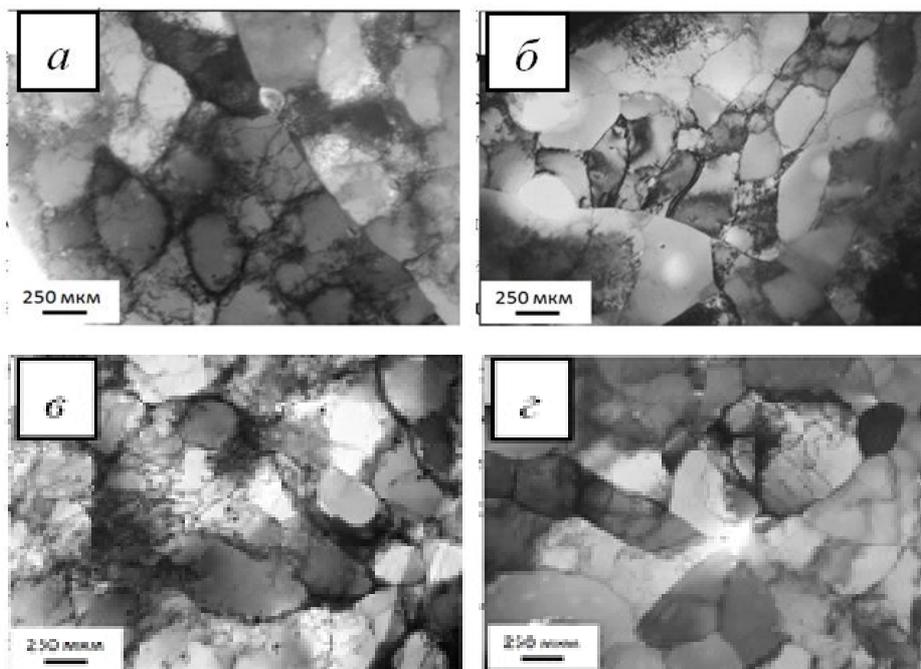


*a* – структура на границе (показана пунктиром) центральной и периферийной области; *б* – структура центральной области ЭПО (граница между областями с гладким и шероховатым рельефом обозначена пунктирной линией); *в, г* – разнотернистая поликристаллическая структура в центральной области ЭПО; *д* – ячеистая структура; *е* – область с шероховатым рельефом

Рисунок 2 – Характерное СЭМ-изображение поверхности электровзрывных композиционных покрытий после ЭПО

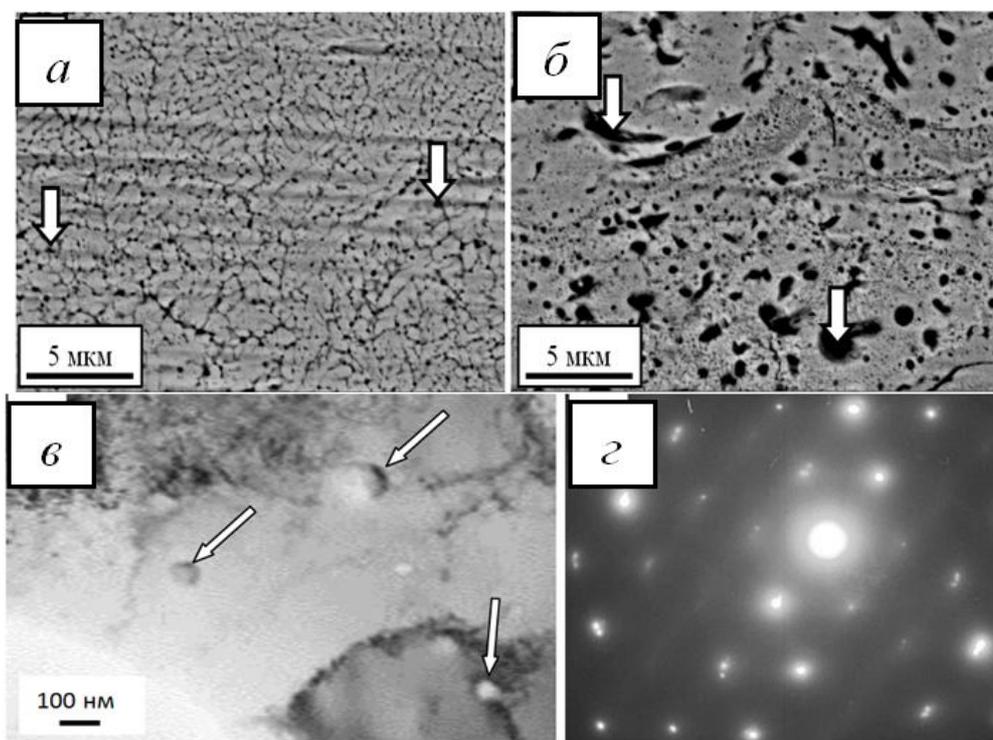
Независимо от фазового состава покрытия и режима облучения электронным пучком, выявлены следующие субструктуры (рисунок 3): ячеистая, полосовая, фрагментированная, субзеренная, а также зерна с хаотически распределенными дислокациями и дислокациями, формирующими сетки. Хаоти-

чески распределенные дислокации и дислокации, формирующие сетки выявляются также и во всех указанных выше субструктурах. Увеличение длительности импульса воздействия пучка (от 100 до 200 мкс) и количества импульсов (от 10 до 20) способствовало, преимущественно, формированию дислокационной субструктуры с более совершенными границами. Преимущественным типом дислокационной субструктуры во всех покрытиях (исключая покрытие состава W-C-Cu) является полосовая субструктура.



*а* – ячеистая, *б* – полосовая, *в* – фрагментированная, *г* – субзеренная  
 Рисунок 3 – Электронно-микроскопическое изображение дислокационной субструктуры, формирующейся в покрытии, синтезированном ЭВН и обработанном импульсным электронным пучком

ЭПО покрытий систем Mo-Cu и W-Cu приводит к формированию композиционной наполненной структуры по всему сечению переплавляемого слоя (рисунок 4), формированию в нем более дисперсной и однородной структуры по сравнению с нижележащим слоем. Размеры включений вольфрама или молибдена в матрице уменьшаются в 2–4 раза по сравнению с их размерами сразу после ЭВН. ПЭМ-исследования выявили, что основной фазой покрытий систем Mo-Cu и W-Cu является твердый раствор на основе меди. В объеме зерен меди и на границах обнаруживаются частицы вторых фаз. В покрытиях выявлены исключительно частицы молибдена или вольфрама. Они имеют округлую форму и по размерам могут быть разделены на два класса. Во-первых, это частицы, размеры которых изменяются в пределах от 80 до 150 нм (это частицы исходного порошка, не растворившиеся в процессе облучения). Во-вторых, это частицы, размеры которых изменяются в пределах от 10 до 15 нм, выделившиеся при кристаллизации расплава [12].



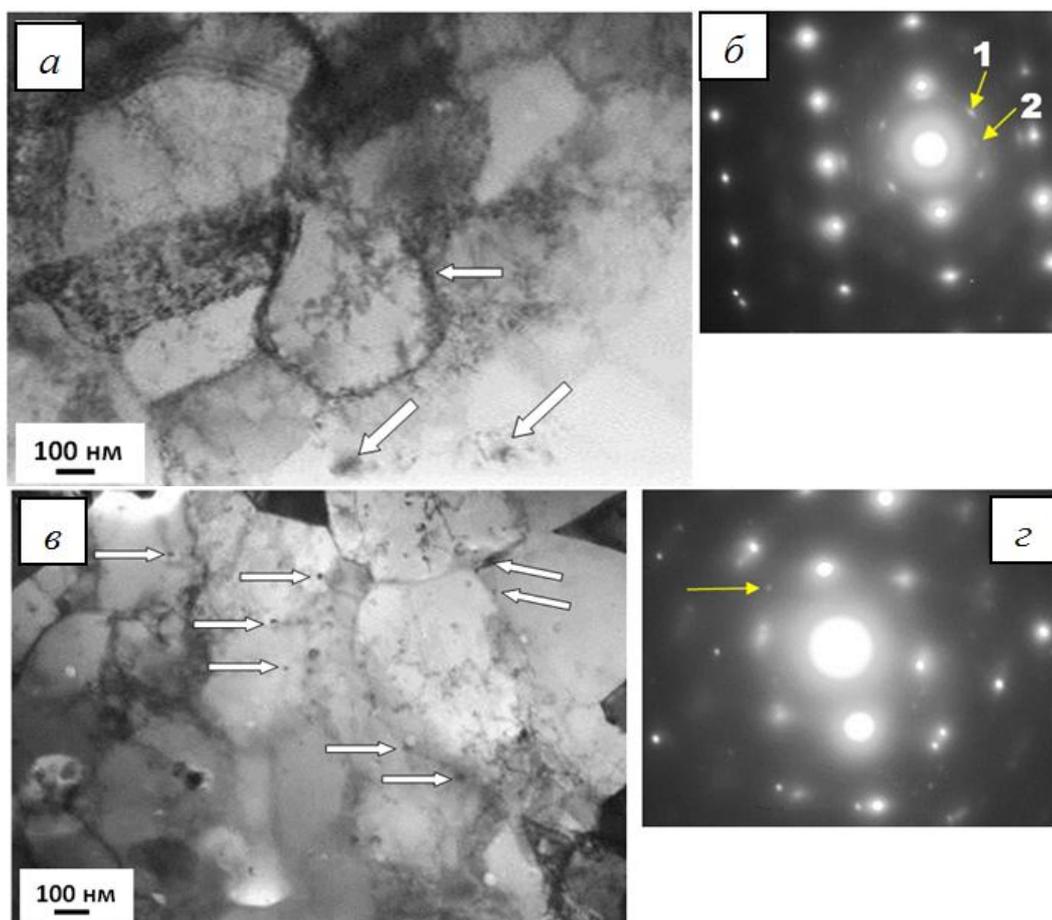
*a, z* – слой покрытия, подвергнутый ЭПО; *б* – слой покрытия, не затронутый ЭПО; *в* – светлопольное изображение; *г* – микроэлектронограмма. Стрелками указаны частицы второй фазы.  
 Рисунок 4 – Структура поперечного сечения медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН композиционного покрытия системы Mo-Cu

Особенности структуры покрытий системы  $TiB_2$ -Cu аналогичны системам Mo-Cu и W-Cu. Однако в этих покрытиях методом ПЭМ выявлены, наряду с частицами  $TiB_2$ , частицы состава  $Ti_2B_5$ . Это указывает на частичное растворение порошка  $TiB_2$  при ЭПО и его повторное выделение в составе  $Ti_2B_5$ .

В покрытиях состава Mo-C-Cu и W-C-Cu следовало ожидать формирование карбидной фазы. Действительно, выполненные исследования выявили частицы карбида молибдена состава  $Mo_2C$  (рис.) и карбида вольфрама состава WC (рисунок 5). В обоих случаях размеры частиц карбидной фазы изменяются в пределах от 10 до 30 нм.

Удельный объем изнашивания и коэффициент трения покрытий зависят от элементного состава. Максимальный удельный объем изнашивания выявлен у покрытия системы Cu-W, минимальный – у покрытия системы Cu-Mo.

Испытания на электроэрозионную стойкость по режиму АС-3 композиционных покрытий всех систем показали, что полученные в работе покрытия удовлетворяют ГОСТу по испытаниям электромагнитных пускателей на коммутационную износостойкость. В условиях искровой эрозии покрытия всех систем показывают увеличение электроэрозионной стойкости в 10 раз по сравнению с электротехнической медью М00 [14].



*a, v* – светлое поле; *б, г* – микроэлектронограмма. Стрелками указано: на *a* – частицы карбида  $\text{Mo}_2\text{C}$ ; на *б* – рефлексы карбида  $\text{Mo}_2\text{C}$ : 1 – [011], 2 – [001]; на *v* – частицы карбида  $\text{WC}$ ; на *г* – рефлекс карбида  $\text{WC}$  [001].

Рисунок 5 – ПЭМ-изображение структуры электровзрывных покрытий систем  $\text{Mo-C-Cu}$  (*a, б*) и  $\text{W-C-Cu}$  (*v, г*) после ЭПО

### *Выводы*

Разработана методика формирования электровзрывных износо- и электроэрозионностойких покрытий систем  $\text{TiB}_2\text{-Al}$ ,  $\text{TiC-Mo}$ ,  $\text{W-Cu}$ ,  $\text{Mo-Cu}$ ,  $\text{W-C-Cu}$ ,  $\text{Mo-C-Cu}$  и  $\text{TiB}_2\text{-Cu}$  с использованием электронно-пучковой обработки.

Определен комплекс параметров шероховатости ( $R_a$ ,  $R_{\text{max}}$  и  $S_m$ ) и особенностей рельефа поверхности покрытий во всех режимах обработки. Установлено проникновение частиц порошков в подложку без нарушения ее сплошности и формирование адгезионно-когезионной связи с подложкой.

Показано, что объемное соотношение металлического компонента и частиц порошка в композиционных покрытиях соответствует их соотношению в композиционном электрически взрываемом проводнике, используемом для напыления.

Установлено, что основным типом дислокационной субструктуры в электроэрозионностойких покрытиях всех систем является полосовая субструктура. Увеличение длительности импульса воздействия электронного

пучка от 100 до 200 мкс и количества импульсов от 10 до 20 имп. способствует формированию дислокационной субструктуры с более совершенными границами субзерен.

Основной фазой покрытий систем Mo-Cu и W-Cu, сформированных в оптимальных режимах, является твердый раствор на основе меди и частицы вторых фаз молибдена или вольфрама. Псевдосплавные покрытия систем Mo-C-Cu и W-C-Cu упрочнены мелкодисперсными износостойкими частицами карбидных фаз состава Mo<sub>2</sub>C и WC. При облучении электронным пучком в покрытиях системы TiB<sub>2</sub>-Cu происходит неполное растворение частиц порошка TiB<sub>2</sub> и выделение частиц фазы состава Ti<sub>2</sub>B<sub>5</sub>.

Установлена совокупность значений физико-механических свойств (коэффициент трения, удельный объем трека износа покрытия, электроэрозионная стойкость) композиционных покрытий систем Mo-Cu, TiB<sub>2</sub>-Cu, W-C-Cu, Mo-C-Cu, W-Cu, сформированных при ЭВН и ЭПО.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-12009 офу\_м, №14-08-00506а и 14-08-00686а).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов Д. А. Электровзрывное напыление электроэрозионностойких покрытий: формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления / Д.А. Романов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов В.Е. // Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. Kg, 2012. – 170 с.

2. Комшуков В.П. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Механические и металлографические исследования / В.П. Комшуков., А.Н. Черепанов, Е.В. Протопопов, Д.Б. Фойгт, Л.А. Ганзер // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. – № 10. – С. 21-24.

3. Перетяцько В.Н. Развитие теории и практики металлургических технологий / В.Н. Перетяцько, М.В. Темлянцев, М.В. Филиппова, Е.В. Протопопов, И.Ф. Селянин. – Том 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.

4. Феоктистов А.В. Влияние термовременных выдержек расплава белого хромистого чугуна на его износостойкость / А.В. Феоктистов, В.Б. Деев, И.Ф. Селянин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2000. – № 12. – С. 41.

5. Усталостная долговечность стали мартенситного класса, модифицированной высокоинтенсивными электронными пучками / Ю.Ф. Иванов, Д.А. Бессонов, С.В. Воробьев, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Н.Н. Коваль. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 258 с

6. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Воробьев С.В. и др. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / Под Ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова. Новокузнецк: СибГИУ, 2012. 402 с.

7. Олесюк О. В. Структура покрытий, сформированных методом электровзрывного напыления, после электронно-пучковой обработки / О.В. Олесюк, Д.А. Романов, Е.А. Будовских, С.В. Коновалов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 4. – С. 16 – 20.

8. Романов Д.А. Структура и свойства электроэрозионностойких покрытий, формируемых методом электровзрывного напыления / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Д.С. Кривеженко // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 1(58). – С. 53 – 58.

9. Олесюк О.В. Структура износостойких покрытий систем TiB<sub>2</sub>-Al и TiC-Mo, полученных электровзрывным напылением / О.В. Олесюк, Д.А. Романов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т.10. – № 3. – С. 417 – 423.

10. Романов Д.А. Структура износостойких покрытий системы TiC-Mo, полученных электровзрывным напылением / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, Е.С. Вашук // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3(60). – С. 90 – 93.

11. Романов Д.А. Структура износостойких покрытий системы TiC-Mo, полученных электровзрывным напылением / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Е.С. Вашук // Вестник ТГУ. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1831–1832.

12. Романов Д.А. Структура электровзрывных композиционных покрытий из несмешивающихся компонентов системы Cu-Mo после электронно-пучковой обработки / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 1(62). – С. 54 – 60.

13. Романов Д.А. Структура композиционных покрытий системы W – Cu – Si, полученных электровзрывным напылением и последующей электронно-пучковой обработкой / Д.А. Романов, О.В. Олесюк, С.В. Коновалов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов // Перспективные материалы. – 2014. – № 4. – С. 64 – 68.

14. Олесюк О.В. Влияние электронно-пучковой обработки на трибологические свойства электровзрывных электроэрозионностойких покрытий / О.В. Олесюк, С.В. Коновалов, Д.А. Романов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/116-12659> (дата обращения: 08.04.2014).

15. Романов Д.А. Электровзрывное напыление износостойких покрытий системы TiC-Mo и изучение их структуры / Д.А. Романов, О.В. Олесюк // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2. – С. 7 – 10.

УДК 539.4

И.А. Комиссарова, Н.Г. Ярополова, С.В. Коновалов, Д.В. Загуляев,  
В.Е. Громов

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАНОТВЕРДОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Проанализировано изменение нанотвердости и модуля Юнга некоторых металлов при присоединении к ним различных металлических масс. Сделаны выводы о причинах установленного эффекта.

The change of nanohardness and Young's modulus of some metals in acceding to the various metal masses. The conclusions about the reasons set effect.

В настоящий момент времени предложен ряд способов модификации физических и механических свойств металлических материалов. Особое место при этом занимают внешние энергетические воздействия. Одними из таких методов являются воздействие импульсами электрического тока, электрическими и магнитными полями, контактными воздействиями. Однако, физическая природа влияния этих воздействий на металлы и сплавы в процессе пластической деформации до сих пор изучена недостаточно.

В данной работе основное внимание уделено эффектам, происходящим при контактных воздействиях, возникающим при присоединении различных металлических масс к образцам.

Контактная разность потенциалов задавалась соединением к изолированному образцу через медный проводник металлических пластин из Zr.

Численное значение контактной разности потенциалов определялось согласно  $\varphi = (A_{Me} - A) / e$ , где  $A_{Me}$  – работа выхода электрона из металла, подключаемого к исследуемому образцу,  $A$  – работа выхода электрона для металла, подвергаемого исследованию,  $e$  – численное значение заряда электрона. Задание контактной разности потенциалов осуществлялось перед началом испытаний на наноиндентирование и продолжалось до их окончания. Определение нанотвердости поверхностных слоев проводилось на нанотвердомере «Nanohardness Tester» фирмы «CSEM» (НИ ТПУ). Обязательным условием всех экспериментов являлось то, что образец помещался на диэлектрическую площадку, чтобы исключить влияние электрических зарядов на приборах.

Все полученные количественные результаты математически обрабатывались и проверялись на статистическую значимость по критерию Стьюдента.

В результате проведённых исследований получены зависимости изменения значений нанотвердости и модуля Юнга от массы подключаемых металлов. Эти зависимости представлены на рисунках.

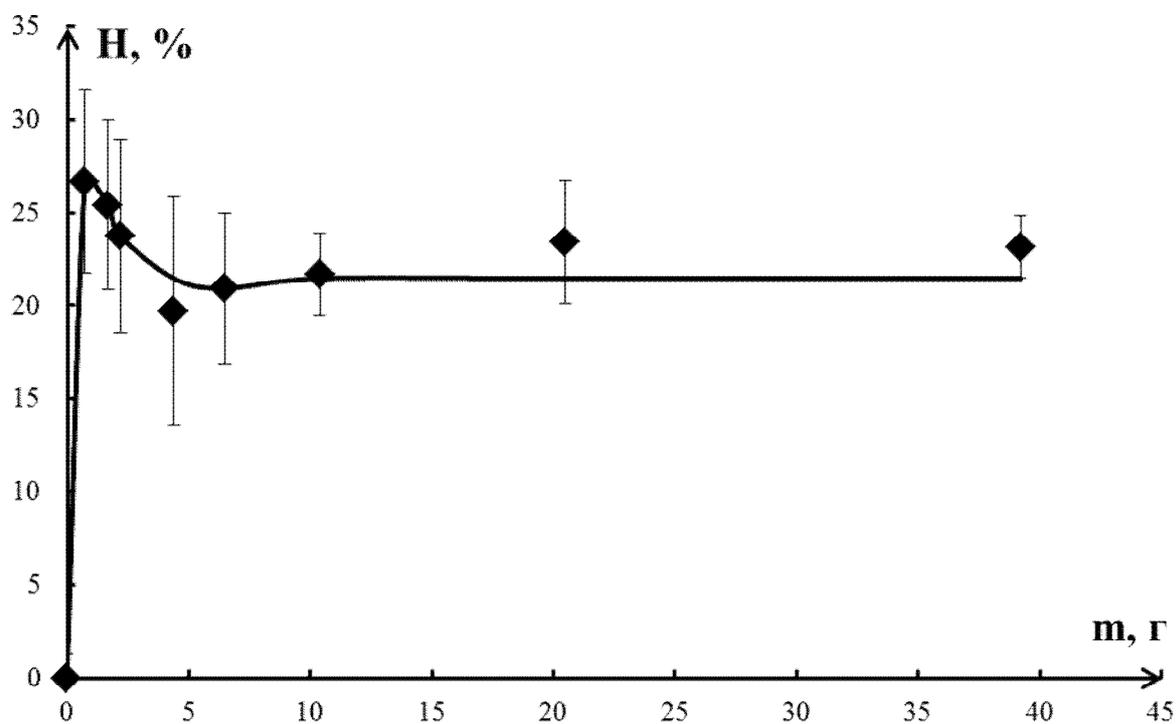


Рисунок 1 – Относительное изменение нанотвердости меди при подключении различных масс циркония

Установлено, что вид зависимостей, получаемых при исследовании нанотвердости металлов при подключении к ним масс различных металлов, в основном, также имеют экстремум.

В частности, максимум зависимости относительного изменения нанотвердости Al при подключении к нему масс Zr (рисунок 3) составляет 0,2, а при микроиндентировании этой же пары металлов это значение равно 0,13 [1]. Причем, экстремум в обоих случаях установлен при массе подключаемого Zr, равной ~ 0,003 кг.

Выполненные исследования по влиянию величины массы присоединенного металла на нанотвердость Fe и W показали, что зависимость относительного изменения нанотвердости от массы подключаемого металла в большинстве случаев имеет экстремальный характер (рисунки 4-7).

Установлено, что при присоединении масс меди к железу нанотвердость экстремально увеличивается на 50 % при значении массы подключаемого металла 9 грамм. Дальнейшее увеличение массы подключаемого металла приводит к снижению значения нанотвердости до исходной величины (рисунок 4).

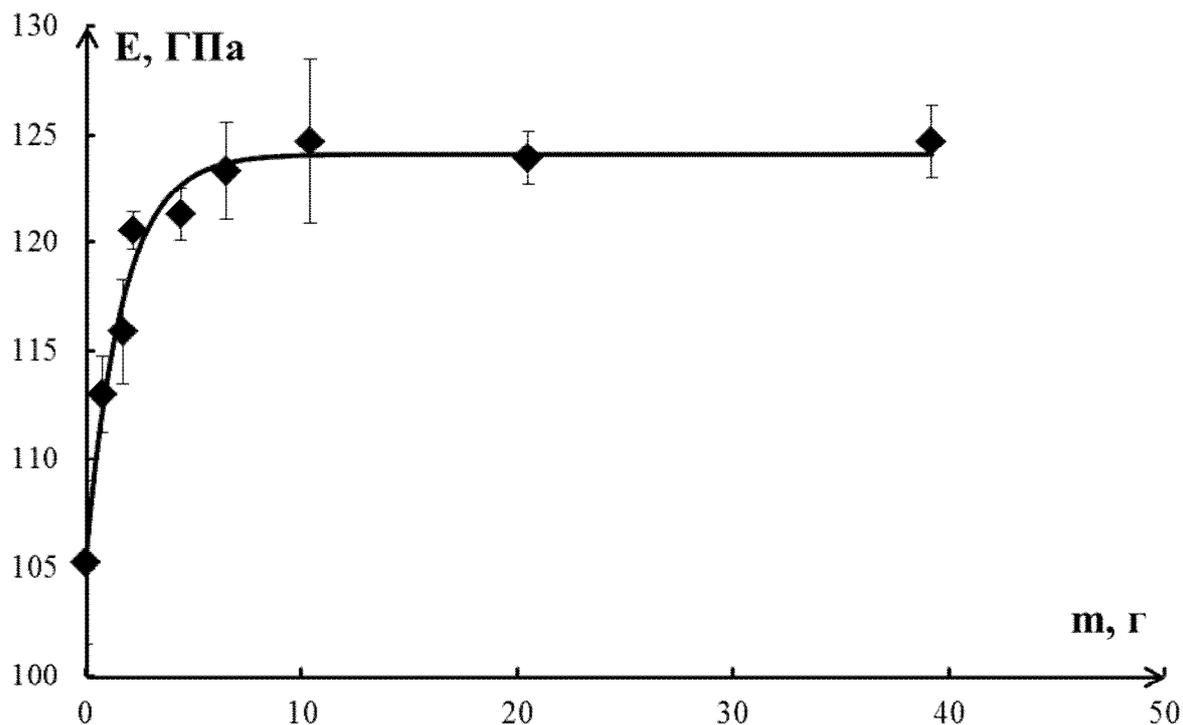


Рисунок 2 – Зависимость модуля Юнга меди от массы подключаемого циркония

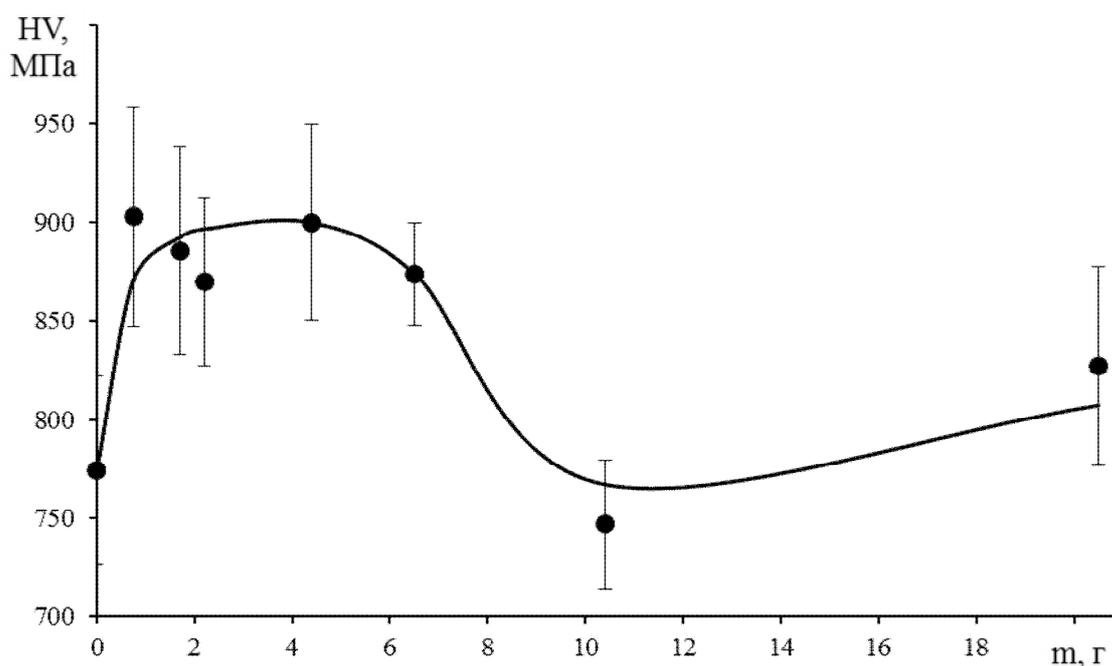


Рисунок 3 – Влияние массы подключаемого циркония на нанотвердость алюминия

Определено, что зависимость относительного изменения  $W$  от массы подключаемой  $Cu$  имеет немонотонный характер, происходит как возрастание

значения нанотвердости в интервале подключаемых масс до 2,5 грамм и более 12,5 г, так и ее уменьшении в интервале масс от 2,5 до 12,5 г (рисунок 5).

Анализ зависимости относительного изменения нанотвердости железа от массы подключаемого циркония показывает, что наблюдается два максимума увеличения нанотвердости: первый при массе подключаемого циркония 1,7 грамма (16 %), второй – при 6,5 г (37 %) (рисунок 6).

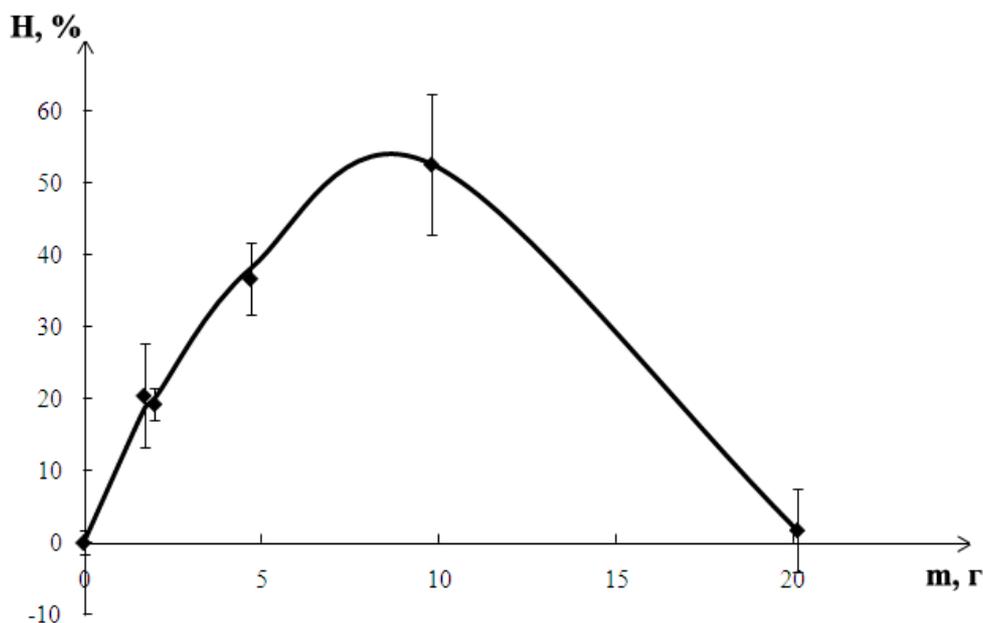


Рисунок 4 – Зависимости относительного изменения нанотвердости Fe от массы подключаемой Si

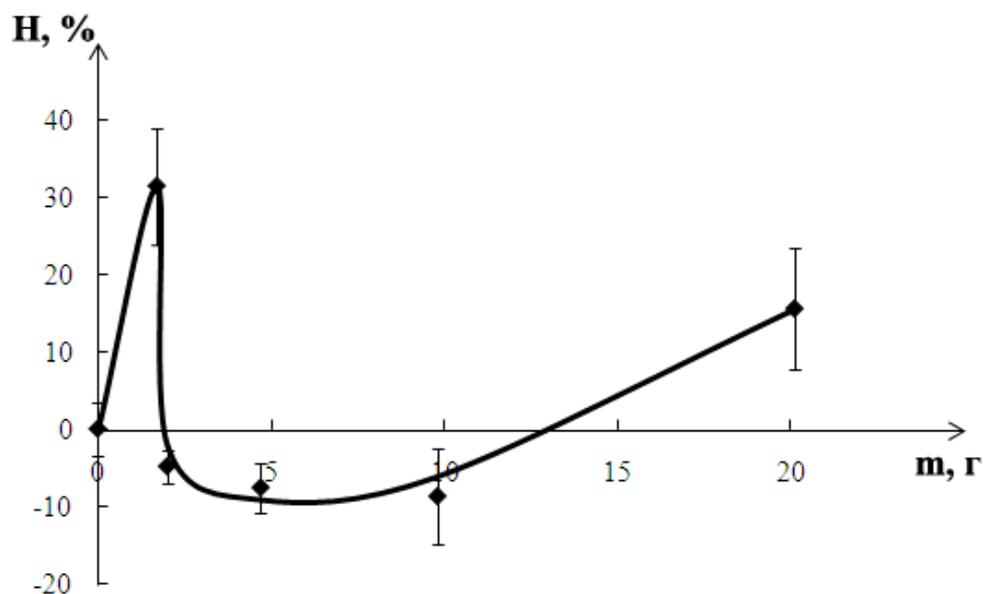


Рисунок 5 – Зависимости относительного изменения нанотвердости W от массы подключаемой Si

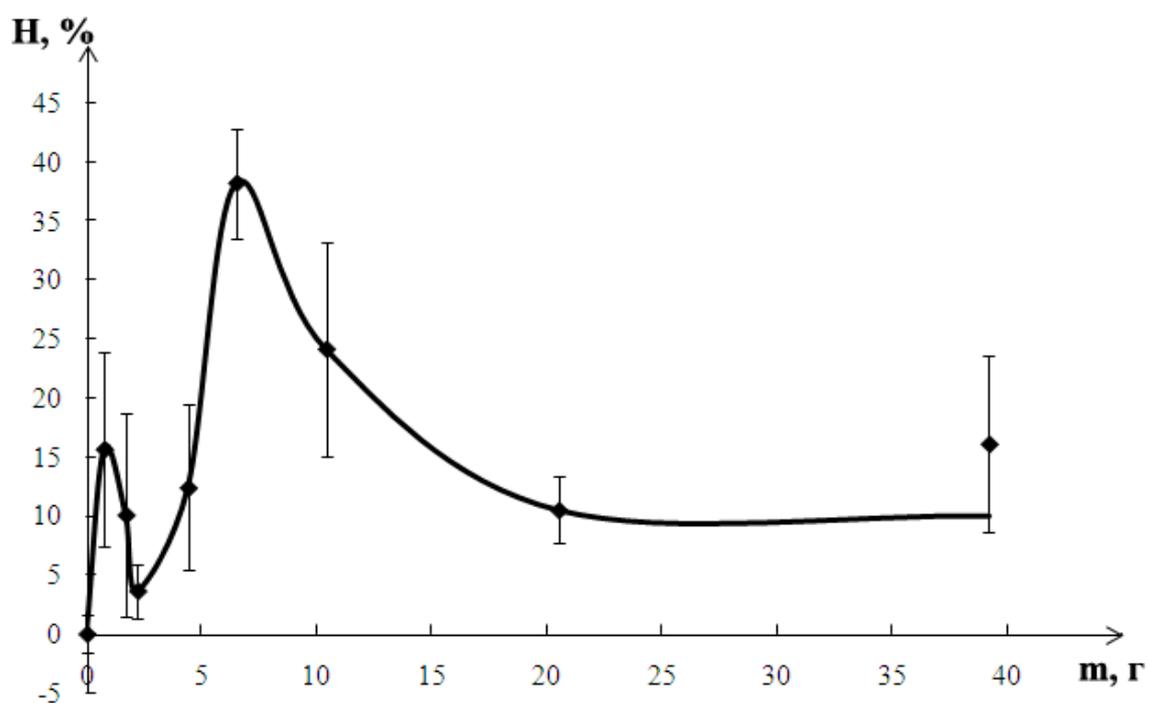


Рисунок 6 – Зависимость относительного изменения нанотвердости Fe от массы подключаемого Zr

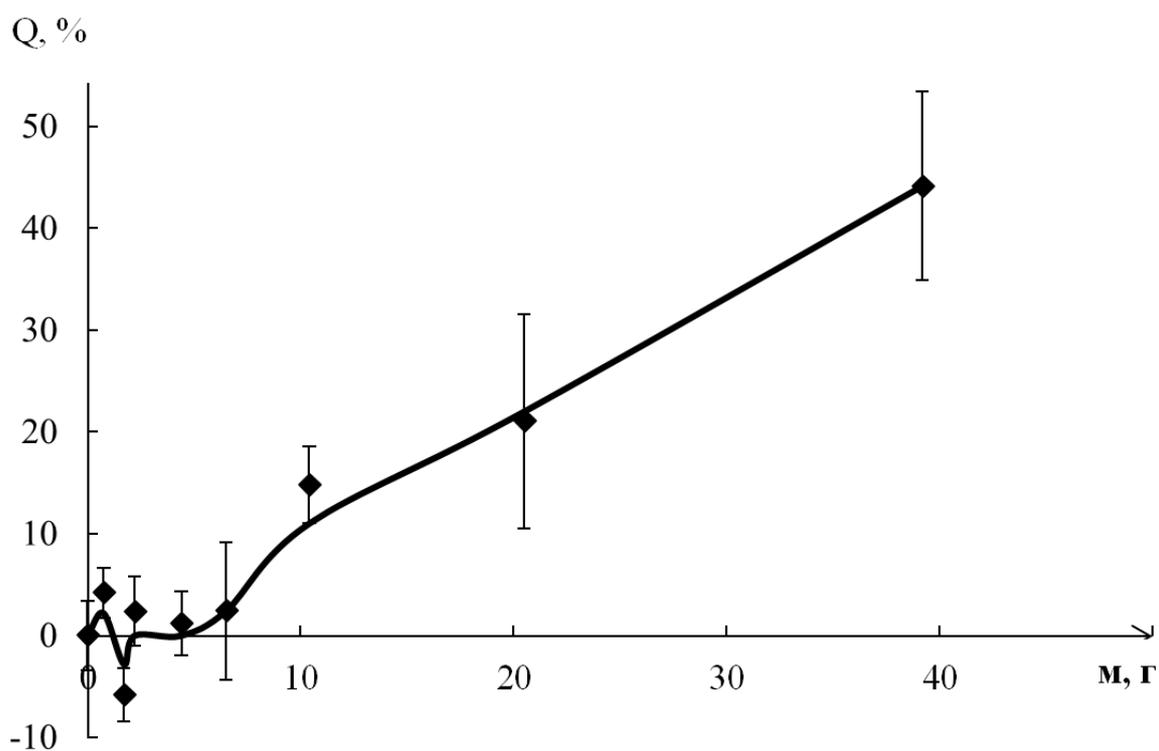


Рисунок 7 – Зависимость относительного изменения нанотвердости W от массы подключаемого Zr

При изучении влияния разных масс циркония на нанотвердость вольфрама можно сделать вывод о том, что нанотвердость увеличивается, начиная

со значения массы подключаемого металла более 6,5 грамм (рисунок 7), меньшие массы не оказывают влияния на значение нанотвердости  $W$ .

Для объяснения установленных в данной работе закономерностей, а также ранее полученных результатов, показывающих влияние электрического потенциала на ползучесть, микротвердость и релаксацию напряжений, обратим внимание на то, что данные для изменения величины деформации ползучести за одинаковое время в зависимости от приложенного к образцу потенциала подчиняются эмпирической зависимости, показанной на рисунке 8.

$$(\varepsilon)^3 \approx k \cdot \varphi^2. \quad (1)$$

В этом соотношении величину  $(\varepsilon)^3$  можно рассматривать как третий инвариант тензора деформаций (произведение главных компонент тензора деформаций  $\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3$ ) [3, 4],  $\varepsilon$  – относительное удлинение,  $\varphi$  – приложенный к образцу электрический потенциал.

Поскольку в дальнейшем необходимо проанализировать связь между механическими характеристиками материала ( $\varepsilon$ ) и электрическим потенциалом ( $\varphi$ ), то удобно использовать при оценках гауссову систему физических единиц (система СГС). Нетрудно убедиться, что в этом случае коэффициент пропорциональности в (1) может быть представлен в виде  $k = 1/F$ , где  $F$  – некоторая сила взаимодействия, возникающая при подведении электрического потенциала к образцу в процессе его деформирования.

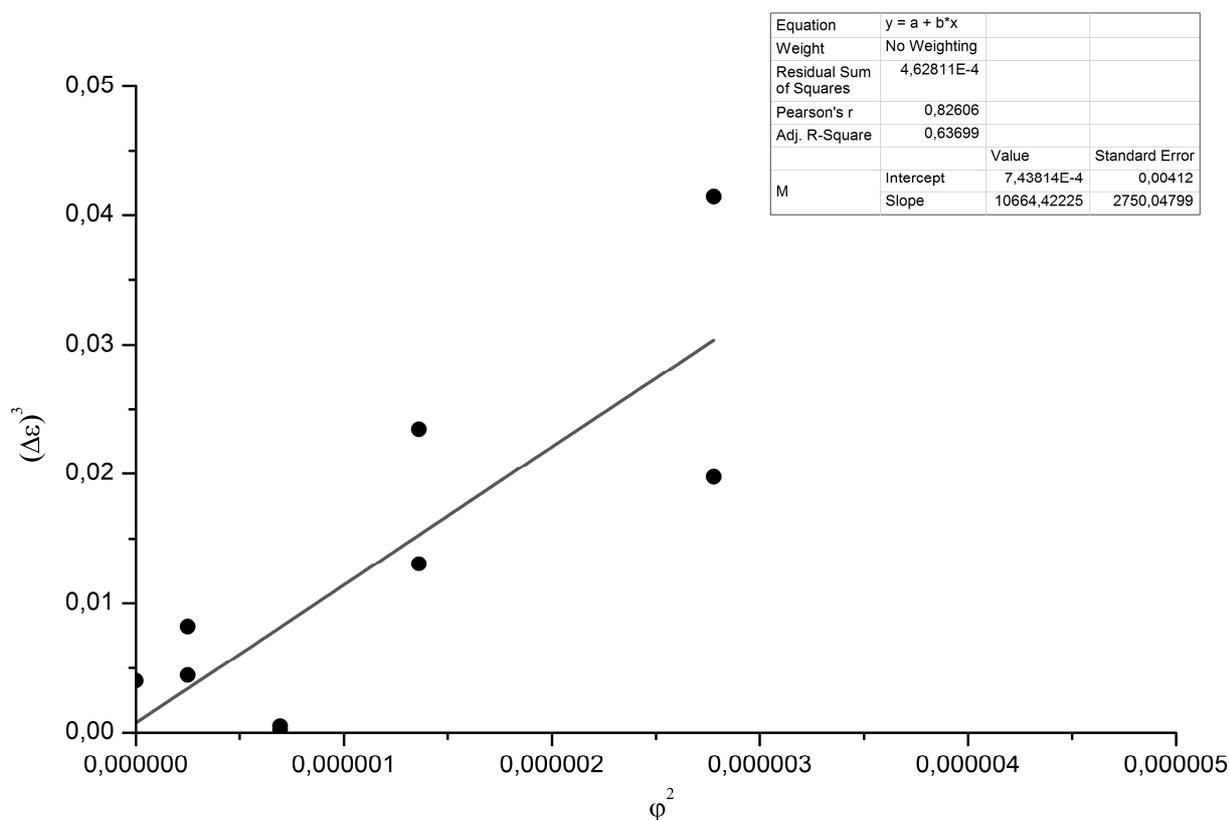


Рисунок 8 – Кривая зависимости  $(\Delta\varepsilon)^3$  от  $\varphi^2$

Выделяя из кривых ползучести алюминия, полученных при приложении различных значений электрического потенциала [1, 2], значения относительного удлинения  $\epsilon$ , соответствующие линейной стадии ползучести был построен график, приведенный на рисунке 8.

Численная оценка показывает, что  $(\Delta\epsilon)^3 = 7,4 \cdot 10^{-4} + 10664 \cdot \varphi^2$ . С достаточной точностью это соотношение может быть сведено к  $(\Delta\epsilon)^3 = 10664 \cdot \varphi^2$ . Следовательно,  $k \approx 10664 \text{ дин}^{-1}$ , и  $F \approx 1/k \approx 9,37 \cdot 10^{-5} \text{ дин} \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$ .

Предполагая, что при подведении электрического потенциала происходит перераспределение электронов на поверхности металла, используем закон Кулона, записанный в системе Гаусса

$$F = e^2/a^2, \quad (2)$$

Учитывая, что в (2) заряд электрона  $e = -4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. СГС и принимая, что  $a \approx 2 \cdot 10^{-8}$  м это величина порядка параметра решетки, получаем, что  $F \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ дин} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Н}$ . Близкое совпадение полученных величин силы позволяет утверждать, что в основе наблюдаемого эффекта могут лежать электростатические явления, связанные с перераспределением электронов в приповерхностном слое металла.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №14-08-00506а и 14-08-00686а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. – 293 с.
2. Коновалов С.В., Филиппьев Р.А., Столбоушкина О.А., Данилов В.И., Громов В.Е. Прочность и пластичность металлов при слабых электрических воздействиях. – Новокузнецк: Изд-во ОАО «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2009. – 180 с.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 491 с.
4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.

А.М. Апасов, А.А. Апасов\*

Юргинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Юрга

\*Строительная компания, г. Юрга

## ДИАГНОСТИКА НЕПРОВАРА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

Представлен краткий анализ состояния вопроса по формированию при сварке непроваров. Установлено, что до сих пор не выявлена физическая природа явления, объясняющего механизм зарождения, формирования, развития непровара в процессе сварки. В связи с этим разработан и предложен один из вариантов физической модели, раскрывающей механизм генерации (зарождения) упругой механической волны в момент формирования структуры металла при непроваре в процессе сварки. С учетом этого был впервые установлен факт возникновения явления акустической эмиссии (АЭ), выявлены ее информативные параметры, характеризующие начало зарождения непровара в реальном масштабе времени на фоне существующих помех. Наличие непровара подтверждено методами рентгенографии, оптической и сканирующей (растровой) электронной микроскопии.

A brief analysis of faulty fusion in welding is presented. It is determined that the nature of the phenomena explaining the mechanism of generation, formation, and development of faulty fusion in welding hasn't been found out heretofore. A physical model revealing the mechanism of generation of elastic mechanical waves which occur at the moment of metal structure formation in faulty fusion is suggested. The developed model was used to carry out a series of experiments during which emission of elastic mechanical waves generated by transformation of weld metal structure characteristic for faulty fusion were repeatedly registered. As a result the phenomenon of inception of acoustic emission was established for the first time ever, the information-bearing parameters characterizing real-time initiation of faulty fusion amid existing disturbances were determined. The occurrence of faulty fusion is proved by methods of X-ray analysis, optical and scanning (focused-beam) electronic microscopy.

### *Введение*

Наличие дефектов в элементах конструкций, сформированных в процессе их изготовления, является в дальнейшем причиной аварий машин и агрегатов [1]. Дефекты сварки, в частности, непровары, при циклическом на-

гружении значительно снижают сопротивление усталости сварных соединений металлов [2-4], особенно, если они расположены в зоне остаточных растягивающих напряжений [4].

В целом вопрос о влиянии непроваров на статическую и циклическую прочность конструктивных элементов не может быть решен только расчетным способом и требует, как правило, экспериментального обоснования.

Самый распространенный ультразвуковой метод контроля, в частности, теневой, зеркально-теневой, эхо-импульсный [5], имеет существенные недостатки: наличие временной мертвой зоны; невозможность диагностирования качества процесса сварки в реальном масштабе времени и определения характера дефекта с помощью ультразвука [6]. Способ регистрации непровара при сварке [7] по сигналам акустической эмиссии (АЭ) обладает следующими недостатками:

1) Не рассматривается физическая природа источников, объясняющих причину зарождения непровара.

2) Не разработан механизм формирования и развития непровара.

3) В качестве информативного параметра используется интенсивность импульсов АЭ, характеризующая скорость появления дефектов, но не установлен тот тип параметра сигнала АЭ, который непосредственно свойственен процессу зарождения и развития непровара, в частности, при импульсной аргодуговой сварке изделий из однородного металла.

Поэтому основной целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование процессов зарождения, формирования, развития непровара и его регистрация в реальном масштабе времени при сварке.

#### *Решение динамической задачи термоупругости на границе основного и наплавленного металла*

Основные результаты, полученные при реализации цели в данной работе, были доложены на 7-ом Международном форуме по стратегическим технологиям IFOST 2012 [8]. Поставленная цель осуществляется следующим образом [9-13]. По границе сплавления основного и наплавленного металла шва при импульсном нагреве и интенсивном охлаждении при сварке изделий из однородного металла быстрое изменение температурного поля вызывает мгновенные термические напряжения (пики). Поэтому данная задача относится к категории нестационарной, в связи с чем необходимо учитывать инерционные члены, так как они будут вносить существенный вклад в окончательное решение. В данном случае решается одномерная задача термоупругости. При этом учитываются инерционные члены в уравнениях движения упругой среды, а искомое выражение сводится к уже известному решению задачи Даниловской [14]. Схема непровара представлена на рисунке 1.

В результате установлено, что при мгновенном (импульсном) нагреве границы упругой среды в ней возникают кратковременные растягивающие и сжимающие напряжения порядка  $sT_0$ . Без учета инерционных членов в уравнениях движения упругой среды напряжения  $X_x$  были бы равными 0.

См.рис.2

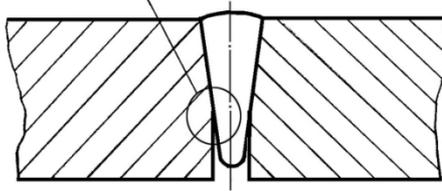


Рисунок 1 – Схема непровара

Следует отметить, что сварочный процесс представляет собой технологическую операцию, в результате которой реализуется атомарная связь на контактных поверхностях двух сварочных заготовок. В связи с этим на рисунке 2 представлена сферолитная модель непровара, на которой наглядно представлено распределение сил межатомного взаимодействия.

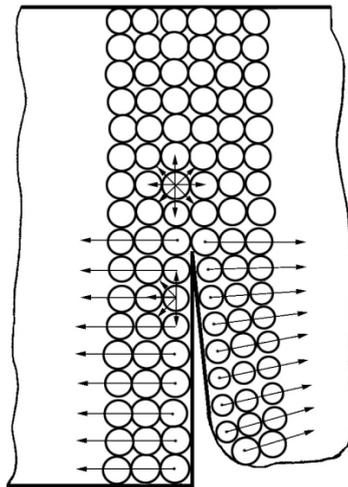


Рисунок 2 – Сферолитная модель непровара с распределением сил межатомного взаимодействия

В частности, внутри кристалла каждый атом удерживается в своем положении силами связи, симметрично распределенными между окружающими его со всех сторон соседними атомами. На свободной поверхности кристалла, имеющейся в результате образования непровара, атом находится рядом с другими, лежащими с ним в одной плоскости и в плоскости, находящейся непосредственно ниже, однако над ним отсутствуют соседние атомы.

Вследствие этого силы, удерживающие поверхностные атомы, несимметричны и эти атомы не могут принять положения, соответствующего равновесному состоянию и наименьшей энергии кристалла. Таким образом, структура кристалла на его свободной поверхности и непосредственно под ней оказывается искаженной. Локальное искажение является признаком запасенной энергии точно так же, как если бы подобные искажения возникли в результате действия внешней нагрузки. Такая форма энергии наблюдается на

всех свободных поверхностях кристалла, поэтому её называют поверхностной энергией. Следовательно, силы межатомного взаимодействия атомов, находящихся на свободной поверхности кристаллов, неуравновешены, а сами атомы на поверхности непровара уже находятся в напряженном состоянии и, тем более, те, которые расположены в устье непровара.

*Расчет энергетического спектра акустической эмиссии от источников зарождения непровара в процессе сварки*

Как указывалось выше, при мгновенном (импульсном) нагреве границы упругой среды (свариваемых кромок) в ней возникают кратковременные сжимающие и растягивающие напряжения порядка  $sT_0$ , которые суммируются с напряжениями, существующими в устье непровара. В результате этого значения амплитуд колебаний атомов в устье непровара превышают предельные, межатомные связи разрываются и испускается пакет упругих механических волн, который и регистрируется пьезопреобразователями акустической эмиссии, установленными на поверхность недалеко от контролируемого сварного соединения.

Следовательно, информативным параметром, наиболее достоверно характеризующим процесс зарождения непровара, является энергетический спектр акустической эмиссии (АЭ), определенный с позиций квантовой теории твердых тел.

В связи с тем, что сварной шов формируется за счет расплавления и кристаллизации металла собственных кромок свариваемых деталей и узлов без присадки, то в первом приближении материал околошовной зоны и сварного шва можно считать однородным и, соответственно, изотропным. Поэтому расчет энергетического спектра волнового пакета акустической эмиссии можно произвести по методике Тверского [15]. Следует отметить, что энергия тепловых колебаний, запасенная при достижении температуры плавления, является потенциальной энергией сил межатомного взаимодействия. При разрыве межатомных связей эта энергия первоначально переходит в вибрационное возбуждение атомов на поверхности разрыва. Каждый возбужденный атом можно рассматривать как колебание трех линейных осцилляторов. Если  $W_0$  – освобождаемая энергия межатомной связи, то для малых значений амплитуд смещения атомов из положения равновесия полную энергию каждого осциллятора можно найти из выражения

$$\frac{1}{3} W_0 = \frac{1}{2} \gamma \xi^2 + \frac{1}{2} M \dot{\xi}^2 \quad (1)$$

Первый член в выражении (1) представляет собой потенциальную энергию деформации, где  $\gamma$  – коэффициент квазиупругой силы. Второй член – кинетическая энергия, причем  $\dot{\xi}$  – колебательная скорость атома,  $M$  – его масса. В системе, совершающей колебания под действием упругих сил, средняя кинетическая энергия равна средней потенциальной. Поэтому

$$\gamma \xi^2 = \dot{\xi}^2 = \frac{1}{3} W_0 \quad (2)$$

Освобождаемая энергия при разрыве каждой межатомной связи не локализуется на отдельном атоме, а распространяется в виде волны смещения. Для некоторой линейной цепочки атомов в плоскости разрыва можно записать

$$\frac{1}{3} W_0 = \frac{1}{2} \gamma \sum_i (\xi_i - \xi_{i+1})^2 + \frac{1}{2} M \sum_i \dot{\xi}_i^2 \quad (3)$$

Здесь суммирование ведется по всем атомам в цепочке. Граничные условия можно представить в виде жесткого закрепления краевых атомов

$$\xi_0 = \xi_{n+1} = 0, \quad (4)$$

где предполагается, что цепочка содержит  $N+2$  атомов и имеет длину  $l = (N+2) \cdot a$  ( $a$  – межатомное расстояние).

Представление о характере колебательного процесса можно получить, сравнив его с колебаниями струны, закрепленной на концах. Длина волны такого колебания равна  $2l$ . Поэтому волне смещений можно поставить в соответствие волновое число  $k = 1/(2l)$ . Очевидно, что

$$k_a = \frac{1}{N+2} \ll 1 \quad (5)$$

Иначе говоря, от разрыва каждой связи с плоскости разрыва рождается длинноволновое акустическое колебание или фонон.

Число рождаемых фононов определим из условия предполагаемого равенства потенциальной энергии возбуждения атомов и потенциальной энергии электронов проводимости, приходящихся на атом, то есть положим, что

$$u(k_{\max}) = 2\mu m^* c^2 \quad (6)$$

Здесь  $m^*$  – эффективная масса электрона в решетке;  $c$  – скорость электромагнитных волн в вакууме;  $\mu$  – относительная концентрация электронов проводимости на один атом.

Окончательно получим

$$f = \frac{3\sqrt{3}}{2} (\mu \eta)^{-1} m \lambda^2 N_A^2 A^{-2} (\rho E)^{1/2} x, \quad (7)$$

где  $f$  – частота колебаний в моде;  $\mu$  – относительная концентрация электронов проводимости на один атом;  $\eta = \frac{m^*}{m}$  – относительная эффективная масса электрона;  $m^*$  – эффективная масса электрона в решетке;  $m$  – масса электрона;  $N_A$  – число Авогадро;  $A$  – атомная масса материала;  $\rho$  – плотность материала;  $\lambda$  – длина волны Комптона для электрона;  $x = \alpha \cdot k$  – безразмерный аналог частоты;  $E$  – энергия газа осцилляторов в единице объема.

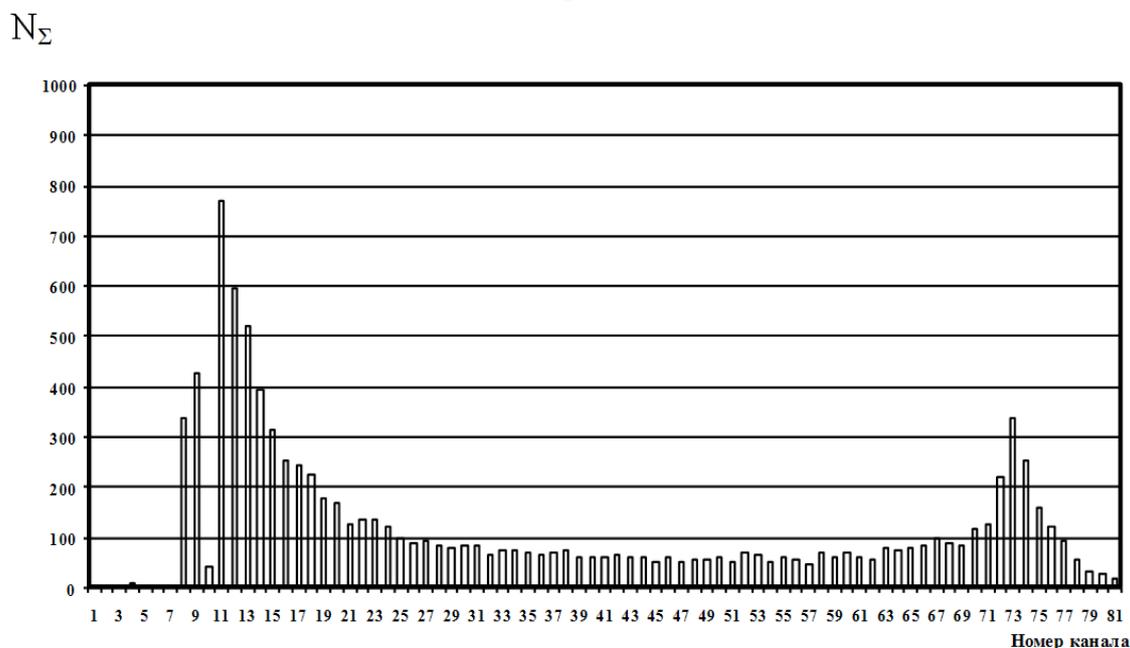
Таким образом, характеризуя объемную плотность энергии межатомных связей модулем нормальной упругости и учитывая, что для большинства металлов эффективная масса электрона близка к массе свободного электрона и что величина концентрации электронов проводимости в металлах близка к

концентрации атомов, можно вычислить частоту колебаний фононов в моде или эффективную ширину спектра АЭ.

*Исследование параметров АЭ, характеризующих процесс возникновения и формирования непровара при сварке*

В процессе сварки установлено, что при работе на режимах, которые ведут к непровару [16], число импульсов АЭ, зарегистрированных в 73 канале, существенно меньше, чем при трещинообразовании, и составило  $N_{\Sigma} = 335$  (рисунок 3).

Процесс трещинообразования при сварке характеризуется резким увеличением числа импульсов АЭ в 70-80 каналах амплитудного анализатора, что свидетельствует об очень высокой энергетике процесса зарождения, развития и формирования трещин по сравнению с плавлением и кристаллизацией металла при сварке. Максимальное число импульсов АЭ  $N_{\Sigma} = 606$  приходится на 73 канал, амплитуда которых равна 356,24 мВ.



Время цикла 12 сек (1/2 об.),  $L_{дат} = 240$  мм,  $I_{св} = 40$  А  
Рисунок 3 – Амплитудное распределение сигналов АЭ от непровара, возникающего в процессе сварки.

Наличие непровара подтверждено металлографическими исследованиями. На рисунке 4 представлена фотография микроструктуры металла с непроваром в корне сварного шва, полученная с экрана австрийского микроскопа фирмы «REICHERT», а на рисунке 5 – фотография того же непровара, наблюдаемого в растровом электронном микроскопе РЭМ-200.

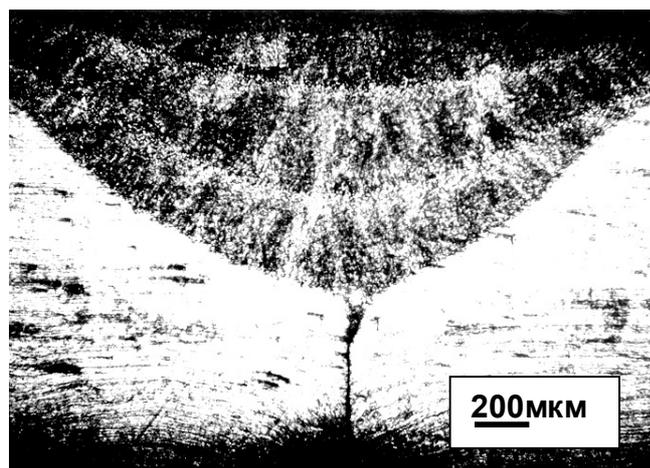


Рисунок 4 – Микроструктура металла с непроваром в корне сварного шва: сталь 08X18H10T;  $\times 50$ ; микроскоп фирмы «REICHERT»

На основе полученных экспериментальных данных по регистрации непровара АЭ-методом разработан метод обнаружения непровара. Он заключается в приеме сигналов акустической эмиссии (АЭ), возникающих в сварном соединении в процессе сварки деталей, выборе информативного параметра, по изменению которого судят о качестве сварного шва, причем, в качестве информативного параметра выбирают амплитудное распределение сигналов АЭ, возникающих при колебании атомов в устье непровара. При этом разделение сигналов АЭ от процессов формирования непровара и трещинообразования, зарегистрированных в одном и том же канале амплитудного анализатора, производят по числу импульсов АЭ.

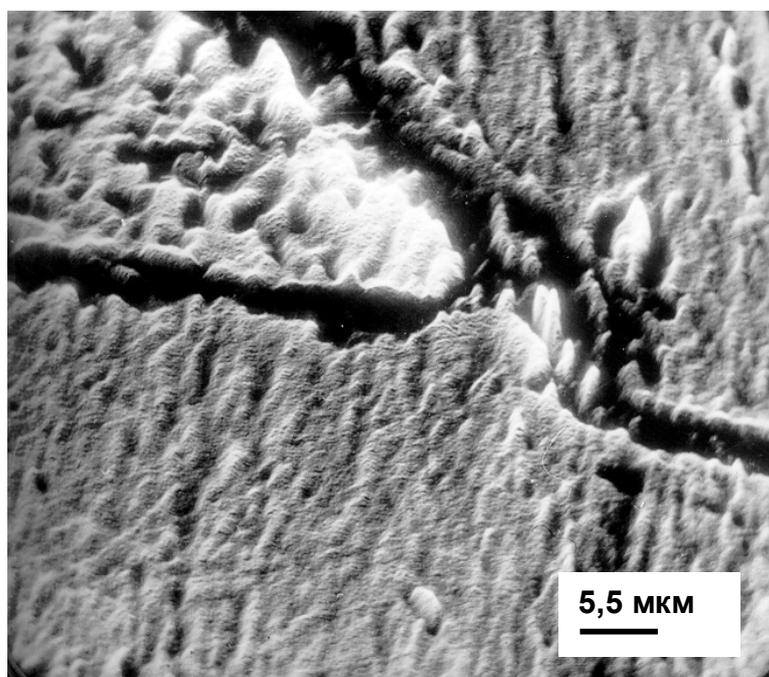


Рисунок 5 – Микроструктура металла с непроваром в корне сварного шва: сталь 08X18H10T;  $\times 1800$  в режиме с модуляцией; микроскоп РЭМ-200

### *Выводы*

1. Показано, что при автоматической импульсной аргодуговой сварке аустенитной стали и интенсивном охлаждении околошовной зоны (по границе сплавления) в металле при кристаллизации возникают кратковременные сжимающие и растягивающие напряжения, которые суммируются с напряжениями в устье непровара, что приводит к разрыву межатомных связей и испусканию упругой механической волны, интерпретируемой как акт АЭ.

2. Установлено, что разделение сигналов АЭ при сварке осуществляется по амплитудному признаку.

3. Определено, что разделение сигналов АЭ от процессов зарождения, формирования и развития непровара и процесса трещинообразования, зарегистрированных в одном и том же канале амплитудного анализатора, производится по числу импульсов АЭ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Ч.2. – Киев: Наукова думка, 1994. – 704 с.

2. Большова К.М. Магнитный метод определения предела усталости // Заводская лаборатория. – 1947. – № 1. – С. 58-64.

3. Лебедев Г.А., Маринец Т.К., Ефремов А.И. Исследование циклической прочности металлов методом записи диаграмм усталости / Циклическая прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С.141-146.

4. Писаренко Г.С., Красовский А.Я., Йокобори Т. Экспериментальное изучение и анализ кинетики пластической зоны. – Киев, 1980. – 66 с. (Препр. АН Украины ИПП).

5. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Г.С.Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

6. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алёшин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.

7. Белов В.М., Болотин Ю.И. Способ контроля качества сварного соединения. – Авт. свид. 567128. – Бюлл. изобр., 1977, № 28.

8. Apasov A.M. Acoustic Emission Diagnostics of Faulty Fusion in Welding / A.M. Apasov, A.A. Apasov // Proceedings of The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012. – September 17-21, 2012. – Tomsk Polytechnic University, 2012. – Volume II. – P. 164-168.

9. Апасов А.М., Апасов А.А. Метод обнаружения непровара в процессе сварки. Труды XIV научной конференции, посвященной 300-летию инженерного образования в России: Юрга, Филиал ТПУ, 2001. – С. 62.

10. Апасов А.М., Апасов А.А. Способ обнаружения непровара. – Патент № 2212030. – Бюлл.изобр., 2003. № 25. – С. 564.

11. Апасов А.М., Апасов А.А. Механизм зарождения, формирования и диагностика непровара в процессе сварки, Ч.1 // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 1.– Т. 308. – С. 158-162.
12. Апасов А.М., Апасов А.А. Механизм зарождения, формирования и диагностика непровара в процессе сварки, Ч.2 // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 2.– Т. 308. – С. 120-126.
13. Апасов А.М., Апасов А.А. Механизм зарождения, формирования и диагностика непровара в процессе сварки, Ч.3 // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 3.– Т. 308. – С. 132-135.
14. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагрева его границы. – Прикладная математика и механика, 1950. Т.ХIV, вып. 3. – С.316-318.
15. Тверской В.С. К инженерному расчету энергетического спектра акустической эмиссии – Дефектоскопия, 1981, № 4. – С.62–67.
16. Апасов А.М. Активная диагностика разрушения и предотвращение техногенных катастроф: монография / А.М. Апасов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 216 с.

**ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА  
ПРЕДПРИЯТИЯХ**

С.Г. Галевский

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,  
г. Санкт-Петербург

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕМИИ ЗА РИСК ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕКУЩЕЙ СТОИМОСТИ БУДУЩИХ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ

Выполнен анализ эффективности учета рисков в ставке дисконтирования. Показана целесообразность их учета в значении денежных потоков.

The analysis of the effectiveness of a risk in the discount rate executed. The expediency of taking them into account in the value of the cash flows.

В настоящее время большая часть финансовых решений основана на методе дисконтированных денежных потоков (DCF). Метод DCF применяется при анализе инвестиционных проектов, оценке стоимости активов и бизнеса, в иных сферах финансового менеджмента. Соответственно, необходимо развитие и совершенствование данного метода для повышения эффективности принимаемых управленческих решений в сфере финансов.

Кратко суть данного метода можно представить в виде следующей формулы:

$$PV = \sum_{i=1}^n \frac{FCF_i}{(1+k)^i} \quad (1)$$

где  $PV$  – текущая стоимость будущих денежных потоков;  $FCF_i$  – ожидаемый чистый денежный поток  $i$ -го года;  $k$  – требуемая доходность (ставка дисконтирования);  $n$  – срок, в течение которого ожидаются денежные потоки.

Поскольку получение чистых денежных потоков отдалено во времени от момента оценки их текущей стоимости, сама величина потоков носит вероятностный характер. Следовательно, пользователь данного метода сталкивается с риском того, что фактическая величина денежного потока будет отличаться от прогнозной. Если понимать риск как нечто негативное (то есть в значении «чистый риск»), то в данном случае риском является получение чистого денежного потока меньшего, чем ожидаемый.

Очевидно, что риск должен быть учтен в расчетах, и чем он выше, тем меньше должна быть величина текущей стоимости. На данный момент наиболее распространенным, применяющимся в подавляющем большинстве случаев способом этот риск учесть является увеличение требуемой доходности. Подразумевается, что инвестор готов согласиться с большим риском денежных потоков при условии, что он может рассчитывать на большую доходность.

Данный способ учета рисков получил широкое распространение, в первую очередь, за счет простоты реализации и высокой наглядности. В финансовом сообществе прочно закрепился тезис «высокий риск – высокая доходность», и к настоящему времени разработано множество способов определения рисков составляющей ставки дисконтирования. Оставляя за рамками данной статьи обоснованность и объективность этих методов, рассмотрим принципиальную возможность учета рисков в ставке дисконтирования.

На первый взгляд, увеличение ставки дисконтирования приводит к снижению текущей стоимости каждого чистого денежного потока и, как следствие, к снижению текущей стоимости всех предполагаемых поступлений. Однако уже на этом этапе рассуждений необходимо отметить, что, строго говоря, рост требуемой доходности ведет не к снижению текущей стоимости, а к ее обнулению. В силу математических особенностей процедуры дисконтирования увеличение ставки дисконтирования не способно поменять знак чистого денежного потока, а может вести лишь к уменьшению его абсолютной (по модулю) величины. Поэтому утверждение «большая требуемая доходность означает меньшую текущую стоимость всех чистых денежных потоков» справедливо только, если все чистые денежные потоки имеют положительное значение. В этом случае увеличение ставки дисконтирования действительно приводит к снижению их текущей стоимости, в то время как для отрицательных потоков большая ставка приведет к увеличению их текущей стоимости (приближит их к нулю).

На первый взгляд, это наблюдение не имеет принципиального значения, поскольку большинство финансовых решений предполагают анализ положительных чистых денежных потоков. Так, например, нет никакой необходимости анализировать инвестиционный проект, по которому предполагаются исключительно отрицательные денежные потоки. Однако в том случае, если в проекте чередуются потоки положительные и отрицательные, учет рисков в ставке дисконтирования может привести к парадоксальным результатам. Рассмотрим следующий пример.

Правительство предлагает фармацевтической компании 500 млрд. рублей на разработку и запуск производства социально значимого лекарственного препарата. Срок реализации проекта оценивается в пять лет. Из-за больших затрат на проведение научно-исследовательских разработок первые три года проекта чистые денежные потоки будут отрицательны. Прогнозные денежные потоки и их дисконтированная величина представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, предложенный инвестиционный проект оказывается выгоден при ставке дисконтирования 30 %, но невыгоден при меньшей ставке (20 %). Таким образом, если руководство фармацевтической компании оценивает требуемую доходность на уровне 20 %, то проект необходимо отклонить, однако если руководством компании риск оценивается выше и адекватной нормой доходности считается 30 %, то проект следует принять. Очевидно, что такие выводы противоречат здравому смыслу.

Таблица 1 – Прогнозные денежные потоки и их текущая стоимость

Показатель	0	1	2	3	4	5	Сумма
Чистый денежный поток, млрд. рублей	500	-500	-300	-100	200	200	0
Дисконтированный чистый денежный поток при требуемой доходности 20%, млрд. рублей	500	-416,66	-208,33	-57,87	96,45	80,37	-6,04
Дисконтированный чистый денежный поток при требуемой доходности 30%, млрд. рублей	500	-384,61	-177,51	-45,51	70,02	53,86	16,24

Источник: Составлено автором

Этот парадокс наблюдается из-за значительных отрицательных денежных потоков в первые три года реализации проекта. Однако означает ли это, что учет рисков в ставке дисконтирования нецелесообразен только в отдельно взятом случае – при наличии существенных отрицательных чистых денежных потоков? Для ответа на этот вопрос необходимо еще раз обратиться к сущности риска, возникающего из-за неопределенности будущих денежных потоков.

Как уже было отмечено ранее, в чистом виде риск означает уменьшение фактических поступлений по сравнению с ожидаемыми. Однако подобное уменьшение может произойти по двум причинам. Поскольку чистый денежный поток представляет собой разницу поступлений (притоков) и выбытий (оттоков) денежных средств, то и снижение чистого денежного потока может быть обусловлено как снижением притоков, так и увеличением оттоков. Назовем это риском первого и второго рода.

Чтобы определить, адекватно ли увеличение требуемой доходности отражает влияние рисков первого и второго рода, представим формулу (1) в следующем виде:

$$PV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i^+ - CF_i^-}{(1+k)^i} = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i^+}{(1+k)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{CF_i^-}{(1+k)^i} \quad (2)$$

где  $PV$  – текущая стоимость будущих денежных потоков;  $CF_i^+$  – ожидаемый приток  $i$ -го года;  $CF_i^-$  – ожидаемый отток  $i$ -го года;  $k$  – требуемая доходность (ставка дисконтирования);  $n$  – срок, в течение которого ожидаются денежные потоки.

Из формулы (2) видно, что рост ставки дисконтирования приводит к снижению как притоков, так и оттоков. Таким образом, увеличение требуемой доходности адекватно отражает риск первого рода (риск уменьшения притоков), но не риск второго рода (риск увеличения оттоков). Рост ставки приводит к снижению в абсолютном выражении отрицательных денежных потоков, и, следовательно, отражает не увеличение, а уменьшение риска второго рода. Соответственно, приходится констатировать, что включение дополнительной премии за риск в ставку дисконтирования не является адекватным способом учета всех приисков, связанных с прогнозируемыми денежными потоками. Причем эта проблема характерна для любых денежных потоков, наравне с притоками предполагающих и оттоки – то есть, по сути, обозначенная проблема носит универсальный характер.

В связи с этим представляется необходимым пересмотреть утвердившуюся концепция «большой риск – большая требуемая доходность» и отказаться от учета рисков в ставке дисконтирования. Единственной альтернативой данному подходу является учет рисков непосредственно в значении денежных потоков. Следует отметить, что такой подход представляется наиболее верным и с позиции понимания самого риска как, в конечном итоге, возможности недополучения денежных средств. Ведь участвующий в проекте инвестор, собственник бизнеса или владелец любого другого актива рискует именно вложенными деньгами, и уже только его риски должны находить выражение в денежных единицах, а не в субъективных корректировках процентной ставки.

Л.В. Думова, К.Б. Фокин

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

## ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КОРПОРАТИВНОЙ СОЦИАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Приведена краткая характеристика методик оценки эффективности систем корпоративной социальной ответственности (КСО) предприятий. Выделено три группы методик оценки в зависимости от вида используемых критериев. Показано, что наиболее предпочтительными являются методики, учитывающие влияние количественных и качественных параметров. Разработана модель оценки эффективности функционирования системы КСО с использованием интегрального показателя, включающего качественные и количественные критерии оценки. Приведен перечень качественных параметров. Критерии количественной оценки эффективности КСО по объекту приложения разбиты на две группы: персонал предприятия и местное сообщество.

A brief description of methodologies for evaluating the effectiveness of systems of corporate social responsibility businesses. Three groups of valuation techniques, depending on the criteria used. It is shown that the most preferred methods that take into account the influence of the quantitative and qualitative parameters. A model for evaluating the performance of the system using the integrated indicators, including quantitative and qualitative evaluation criteria. A list of the quality parameters. Criteria for the quantitative evaluation of the effectiveness of systems of corporate social responsibility on the project applications are divided into two groups: the staff of the enterprise and the local community.

Трансформация отношений между государством, бизнесом и обществом привела к изменению роли бизнеса в системе общественных отношений. Ответственность за экономическое развитие территории, на которой ведется бизнес, за поддержание благосостояния работников и развитие социальной политики, за поддержание экологического равновесия – это те современные требования, которые в настоящее время предъявляются на международном уровне к компаниям, экспортирующим свою продукцию. Таким образом, крупные компании, действуя в рыночных условиях, оказались перед необходимостью четко формулировать цели и задачи своей социальной политики и формировать отчетность, раскрывающую их достижения в данной сфере. Вместе с тем, расхо-

ды, несмотря на то, что они осуществляются в целях развития социальной политики, должны давать результат. В связи с этим для каждой компании на первый план выступает проблема оценки эффективности системы корпоративной социальной ответственности (КСО).

В настоящее время можно выделить два основных подхода к оценке эффективности социальных программ:

1) с помощью количественных и качественных показателей социальной деятельности. При этом предполагается выбор определенного перечня параметров деятельности предприятия в области КСО и затем, как правило, расчет некоего интегрального показателя, характеризующего совокупное влияние выбранных параметров. При этом показатели, влияющие на эффективность функционирования системы КСО, подразделяются в зависимости от формы их оценки на два вида: качественные – оцениваются только по наличию или отсутствию, количественные – соответственно имеющие количественное измерение;

2) по воздействию на финансовые и производственные показатели деятельности предприятия. В качестве показателей финансовой деятельности рассматривают выручку предприятия, валовую или чистую прибыль, а производственную деятельность оценивают по общей или удельной производительности.

Второй подход обладает рядом существенных недостатков: большая зависимость результатов финансовой деятельности предприятий от внешнеэкономических условий и некоммерческий характер социальной деятельности [2]. Производственные показатели деятельности предприятия, в свою очередь, зависят от финансовой составляющей и могут определяться изменениями в организации производства носящими чисто технический или технологический характер. Таким образом, более целесообразным представляется подход, когда для оценки эффективности системы КСО применяется расчетный показатель, учитывающий влияние факторов социальной деятельности предприятия.

При использовании указанного подхода на первый план выходит задача выбора конкретных параметров деятельности предприятия в области КСО, оказывающих наиболее значимое влияние на эффективность социальной деятельности.

При построении системы показателей, отражающих эффективность функционирования системы КСО может применяться количественная, качественная или смешанная их оценка.

Качественная оценка эффективности системы КСО производится по наличию или отсутствию определенных условий в деятельности предприятия из заранее сформированного перечня. То есть используется двоичная система оценки (да/нет). [3] В результате, чем большее число заранее определенных критериев присутствуют, тем более эффективной считается система КСО на предприятии. Но при этом невозможной становится сравнительная оценка эффективности деятельности различных предприятий в области КСО при нали-

чии у них одних и тех же признаков. Кроме того, нельзя считать все параметры одинаково важными.

Количественная оценка параметров, позволяет исключить указанные выше недостатки. Однако при этом зачастую отсутствует возможность объективной количественной оценки тех или иных показателей. Базой для проведения анализа в данном случае являются данные публичных отчетов о работе предприятия, в которых представлен очень ограниченный объем информации о социальных расходах. При этом формат представления данных в различные периоды может в значительной степени отличаться, что еще более затрудняет анализ.

При смешанной оценке эффективности системы КСО применяются как количественные, так и качественные показатели. То есть для определения влияния факторов, не поддающихся численной оценке, применяют качественные показатели, а для остальных параметров используют количественную оценку [1]. Таким образом, методики, основанные на использовании смешанных показателей оценки эффективности системы КСО, позволяют учитывать влияние более полного перечня показателей.

В предлагаемой модели оценки эффективности системы КСО на предприятии показателем, характеризующим уровень развития КСО, является интегральный коэффициент, определяющий совокупное влияние качественных ( $K_{КАЧ}$ ) и количественных ( $K_{КОЛ}$ ) параметров:

$$K_{ИНТ} = K_{КАЧ} \cdot K_{КОЛ} . \quad (1)$$

Перечень предлагаемых качественных признаков эффективности КСО, основанный на положениях международной организации «Глобальная инициатива по отчетности», включает в себя [4]:

- 1) наличие трудового договора;
- 2) наличие общих документов, регламентирующих социальную деятельность предприятия;
- 3) наличие ежегодных публичных отчетов о деятельности предприятия в области КСО в открытом доступе;
- 4) наличие в организационной структуре специализированного подразделения, отвечающего за социальную деятельность.

В зависимости от наличия или отсутствия набора параметров из приведенного выше перечня, анализируемые предприятия в соответствии с уровнем развития системы КСО относятся к одной из трех групп [5], для каждой из которых устанавливается величина качественного коэффициента  $K_{КАЧ}$  (таблица 1).

Количественные показатели, определяющие уровень развития системы КСО, по сферам воздействия разбиты на две группы: производственный персонал предприятия и местное сообщество.

Таблица 1 – Величина качественного параметра модели в зависимости от уровня развития КСО

Уровень развития системы КСО	Характеристики	Величина коэффициента качественных параметров, (K <sub>КАЧ</sub> )
Низкий	Наличие не более одного признака	0,3
Средний	Наличие двух-трех признаков	0,6
Высокий	Наличие всех признаков	1,0

Таким образом, коэффициент, учитывающий влияние количественных параметров будет определяться из выражения:

$$K_{КОЛ} = \frac{K_{ПЕРС} + K_{СООБЩ}}{2}, \quad (2)$$

где K<sub>ПЕРС</sub> – коэффициент эффективности социальной политики по отношению к персоналу;

K<sub>СООБЩ</sub> – коэффициент эффективности социальной политики по отношению к местному сообществу.

В предлагаемой модели эффективность социальной работы с персоналом определяется изменением следующих параметров:

- среднемесячная заработная плата (ЗП);
- количество рабочих мест (ССЧ);
- затраты на внутренние социальные программы (СОЦ);
- доля работников, прошедших обучение и переподготовку (ПП);
- доля работников, получивших производственные травмы (ТР).

Эффективность социальной политики по отношению к местному сообществу определяется изменением таких параметров, как:

- затраты на внешние социальные программы (СП);
- затраты на экологические программы (ЭК).

Для количественного описания изменения указанных параметров вводятся коэффициенты, величина которых определяется отношением величин соответствующих параметров в анализируемом и базовом периодах (таблица 2). При этом для параметров, измеряемых в стоимостных единицах, учитывается текущий уровень инфляции за счет использования коэффициента дисконтирования (K<sub>Д</sub>). При использовании разработанной методики анализ эффективности системы КСО производится по динамике показателей в период не менее трех лет.

При определении коэффициентов, учитывающих эффективность социальной политики по отношению к персоналу предприятия и по отношению местному сообществу, вводятся поправочные коэффициенты (a<sub>i</sub>), учитывающие значимость каждого параметра при оценке общего уровня эффективности КСО. Величина указанных поправочных коэффициентов определяется методом экспертных оценок и зависит от специфики конкретного анализируемого предприятия, что делает модель более универсальной.

Таблица 2 – Коэффициенты измерения количественных параметров эффективности работы системы КСО на предприятии

Наименование группы параметров	Наименование коэффициента	Формула для определения коэффициента
Социальная работа с персоналом	коэффициент изменения среднемесячной заработной платы работающих	$K_{ЗП} = \frac{ЗП_i}{ЗП_{БАЗ}} \cdot K_D$
	коэффициент изменения среднесписочной численности работающих	$K_{ССЧ} = \frac{ССЧ_i}{ССЧ_{БАЗ}}$
	коэффициент изменения затрат на внутренние социальные программы	$K_{СОЦ} = \frac{СОЦ_i}{СОЦ_{БАЗ}} \cdot K_D$
	коэффициент изменения доли работников, прошедших обучение и переподготовку	$K_{ПП} = \frac{ПП_i}{ПП_{БАЗ}}$
	коэффициент изменения доли работников, получивших производственные травмы	$K_{ТР} = \frac{ТР_{БАЗ}}{ТР_i}$
Социальная работа с местным сообществом	коэффициент изменения затрат на внешние социальные программы	$K_{СП} = \frac{СП_i}{СП_{БАЗ}} \cdot K_D$
	коэффициент изменения затрат на экологические программы	$K_{ЭК} = \frac{ЭК_i}{ЭК_{БАЗ}} \cdot K_D$

В результате формулы для расчета коэффициента эффективности социальной политики по отношению к персоналу предприятия (КПЕРС) и по отношению к местному сообществу ( $K_{СООБЩ}$ ) примут вид:

$$K_{ПЕРС} = K_{ЗП} \cdot a_{ЗП} + K_{ССЧ} \cdot a_{ССЧ} + K_{СОЦ} \cdot a_{СОЦ} + K_{ПП} \cdot a_{ППК} + K_{ТР} \cdot a_{ТР}, \quad (3)$$

$$K_{СООБЩ} = K_{СП} \cdot a_{СП} + K_{ЭК} \cdot a_{ЭК}. \quad (4)$$

Соблюдение условия, когда коэффициент, учитывающий влияние количественных параметров (формула 2), в анализируемом периоде имеет величину, превышающую единицу, означает, что компания осуществляет активные социально направленные действия; соответственно, значение данного коэффициента меньше единицы означает, что руководство компании уделяет недостаточное внимание вопросам КСО.

В целом модель позволяет определить динамику развития системы КСО на предприятии по величине интегрального коэффициента (формула 1). Сравнение значений интегрального коэффициента в анализируемом и базовом периодах позволяет выявить тенденцию КСО на предприятии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинов И.А. Управление внутренними социальными ресурсами промышленного предприятия на основе их комплексной оценки (на примере черной металлургии) [Текст]: автореф. дис. канд. экон. наук / Литвинов И.А.; Моск. ин-т стали и сплавов. – Москва, 2009. – 24 с.

2. Литовченко С.Е. Доклад о социальных инвестициях в России за 2004 год [Текст] / Литовченко С.Е. – Москва: Ассоциация менеджеров, 2004. – 80 с.
3. Шихвердиев А.П. Качественный индекс социальных инвестиций как показатель эффективности корпоративной социальной ответственности / Шихвердиев А.П., Серяков А.В. // Вестник Научно-исследовательского центра корпоративного права и венчурного инвестирования Сыктывкарского государственного университета. – 2008. – № 1. – С. 106-123.
4. Думова Л.В. К вопросу о формировании социальной ответственности экономических субъектов в России [Текст] / Думова Л.В.: сб. науч. тр. «Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии» № 22. – Новокузнецк : Издательство СибГИУ, 2008. – С. 240-246.
5. Думова Л.В. О реализации социальной политики промышленных предприятий в России [Текст] / Думова Л.В.: сб. науч. тр. «Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов». – Новокузнецк, 2009. – С. 341-347.

# **ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

О.А. Полях, Г.В. Галевский, Л.Б. Павлович, Р.Я. Шарафутдинов,  
С.В. Морин

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## ПОВЫШЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ И СОХРАНЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ

Проведена оценка интеграционных процессов взаимодействия высшего профессионального образования и производственной сферы: СибГИУ – ЕВРАЗ ЗСМК. Показана актуальность развития и сохранения инженерно-технологических компетенций специалистов коксохимического производства. Приведены результаты освоения обучающей программы: итоги компьютерного тестирования и анкетирования слушателей.

An assessment of the integration processes of interaction of higher vocational education and the production sector: SibGIU – EVRAZ ZSMK. The urgency of development and conservation engineering and technological competencies specialists coke production. Shows the results of the development of the training program: results of computer-based testing and questioning hearings.

Стремительное развитие наукоёмких технологий, увеличение доли междисциплинарных исследований оказывают серьёзное влияние на роль инженера (специалиста) в высокотехнологической промышленности. Возникают технологические потребности владения более широким спектром ключевых компетенций, чем освоение узкоспециализированных профессиональных и специальных дисциплин. Важнейшей задачей подготовки специалистов является формирование нужных для предприятия компетенций, позволяющих развивать инновационную восприимчивость, а также создавать его потенциал. Создание информационного канала знаний об инновационных технологиях в профессиональной сфере направлено на развитие предприятия.

В апреле-мае 2014 года в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) реализован проект «Школа коксохимического производства», представляющий собой совместную программу повышения квалификации специалистов КХП ОАО «ЕВРАЗ Объединённый Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК») «Современные направления совершенствования и развития коксохимического производства». В разработке и реализации программы принимали участие специалисты ЕВРАЗ ЗСМК и ведущие преподаватели СибГИУ: д.т.н., профессор М.Б. Школлер;

д.т.н., профессор Л.Б. Павлович; к.т.н., профессор Ю.Г. Сильвестров; к.э.н., доцент В.Е. Воронин; к.т.н. доцент В.И. Ливенец; к.т.н., доцент М.В. Кипервассер; к.т.н., доцент В.И. Кожемяченко; к.т.н., доцент О.А. Полях; к.т.н., доцент А.К. Соловьёв; доцент В.В. Логинов; доцент Н.Л. Лысенко; ст. преподаватель И.Г. Великовская. Коллегиальная деятельность комбината и университета направлена на сохранение и развитие инженерно-технологических компетенций молодых специалистов ЕВРАЗ ЗСМК, имеющих опыт практической работы на производстве.

Первый этап – теоретическое обучение, осуществлялся профессорами и доцентами Сибирского индустриального университета и завершился итоговым компьютерным тестированием. Второй этап обучения предполагает применение новых знаний уже на практике под руководством экспертов (лучших в профессии, авторитетных специалистов предприятия), работающих на ЕВРАЗ ЗСМК. После окончания курса, каждый из слушателей будет защищать и реализовывать свой собственной проект, направленный на решение определенной проблемы в той или иной сфере деятельности.

Программа повышения квалификации инженерно-технического персонала ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» включает 80 часов аудиторных занятий по 9 разделам, 32 темам (таблица 1).

Таблица 1 – Структура программы «Современные направления совершенствования и развития коксохимического производства»

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов
1	Технология подготовки шихты и углеобогащения	10
1.1	Технологические проблемы шихтоподготовки	2
1.2	Современное состояние и перспективы развития в Кузбассе технологии обогащения рядовых углей	4
1.3	Методы обогащения угольного шлама класса крупности (0-3 мм)	2
1.4	Влияние на процессы обогащения ситового состава углей	2
2	Современное состояние производства кокса	24
2.1	Современное состояние и перспективы развития базы коксующихся углей. Классификация углей	4
2.2	Тенденции развития коксохимического и металлургического производства	4
2.3	Состояние печного фонда коксохимических предприятий России	4
2.4	Современные технологии процесса коксования: отечественный и зарубежный опыт	4
2.5	Актуальные проблемы в производстве кокса	4
2.6	Требования к качеству кокса для использования в	2

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов
	доменном производстве с технологией вдувания ПУТ	
2.7	Ресурсо- и энергосбережение в коксохимическом производстве	2
3	Улавливание и переработка химических продуктов коксования	10
3.1	Современные технические решения в улавливании химических продуктов коксования	2
3.2	Влияние режима работы коксовых печей на качественные показатели каменноугольной смолы	2
3.3	Современные технические решения в переработке каменноугольной смолы	4
3.4	Состояние производства каменноугольного пека и способы улучшения его качества	2
4	Экологические проблемы коксохимического производства	14
4.1	Воздействие предприятий черной металлургии на окружающую среду	2
4.2	Сравнительные качественные и количественные характеристики различных пределов металлургического производства по уровню загрязнения окружающей среды	2
4.3	Экологические риски коксохимического производства	2
4.4	Технологические приемы снижения воздействия коксохимического производства на окружающую среду	2
4.5	Современные технологии очистки коксового газа.	2
4.6	Современные технические решения пылеулавливания в коксохимическом производстве	2
4.7	Природоохранное законодательство. Ответственность за нарушение природоохранного законодательства	2
5	Современное состояние автоматизации технологических процессов коксохимического производства	4
5.1	Информационные технологии в подготовке, обогащении угля и производстве кокса	2
5.2	Системы дистанционного управления в химических цехах	2
6	Управление качеством продукции в коксохимическом производстве	4
6.1	Контроль качества продукции	2

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов
6.2	Разработка мероприятий по предупреждению выпуска несоответствующей продукции. Работа с претензиями по качеству	2
7	Энергоэффективность и учет энергоресурсов в коксохимическом производстве	8
7.1	Оборотное водоснабжение и очистка сточных вод. Охлаждение оборотной воды коксохимического производства	4
7.2	Паро- и электроснабжение коксохимического производства	2
7.3	Учет энергоресурсов	2
8	Основы экономики коксохимического производства	2
9	Итоговая аттестация	4
9.1	Ознакомление с технологией компьютерного тестирования. Тренинг	2
9.2	Контрольное компьютерное тестирование	2

Для итоговой аттестации слушателей программы разработаны тестовые задания «Современные направления совершенствования и развития коксохимического производства». Целью создания банка тестов является обеспечение возможности контроля знаний в форме обычного («бумажного») или компьютерного тестирования в системе компьютерного тестирования СибГИУ, работающей в рамках корпоративной сети. Путем тестирования по соответствующим разделам может проводиться аттестация знаний (итоговая аттестация), самостоятельная работа обучающихся в так называемом режиме «тренировки» [1, 2].

Основными задачами контроля знаний в форме тестирования являются:

- усвоение и закрепление знаний по программе;
- создание информационной базы, отражающей уровень подготовки обучающихся или ее динамики при неоднократном тестировании;
- развитие у обучающихся навыков работы с тестовыми системами;
- гарантия личного выполнения заданий благодаря обязательной регистрации пользователя и текущему мониторингу.

Тестовые задания составлены в виде текстового документа (файла формата RTF в текстовом редакторе Word), импортированного в модуль «База вопросов» системы компьютерного тестирования ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». Банк тестов включает в себя 400 заданий по всем разделам программы.

Каждое тестовое задание характеризуется принадлежностью к определенному разделу (теме), а также категорией, что позволяет производить дополнительную дифференциацию. Категория – это уровень сложности вопроса, который определяется разработчиком теста, в данном случае используется

градация: простой, обычный, сложный. Тест для каждого обучающегося включает 35 заданий различной категории (5 сложных, 15 простых, 15 обычных) из всех разделов программы. Тестовые задания предполагают несколько возможных типов ответов:

- «один ответ» (тестируемый может выбрать только один ответ из списка предложенных вариантов, оптимальное количество которых 4 – 6);
- «несколько ответов» (тестируемый может выбрать несколько ответов (или все) из списка предложенных).

При составлении тестовых заданий задаются коэффициенты ответа: ответ с положительным коэффициентом считается правильным, с отрицательным – неправильным, с нулевым – незначимым. В случае нескольких ответов сумма коэффициентов правильных ответов должна равняться принятому для данной категории максимальному балу (единице).

Оценка результатов тестирования может проводиться двумя способами (способ оценивания задается разработчиком в шаблоне теста):

- «один неправильный ответ – полностью неправильный вопрос». Если дан хотя бы один неправильный ответ, то общий ответ считается неправильным, количество баллов за данный вопрос приравнивается к нулю. Суммарный результат теста может образовывать только возрастающую последовательность;
- «сумма коэффициентов». Оценка ответа на вопрос производится по сумме коэффициентов выбранных ответов, поэтому суммарный результат теста в ходе его проведения может как увеличиваться, так и уменьшаться, т.е. накладывается «штраф» за выбор неправильного ответа.

При создании шаблона теста разработчиком задаются проценты ответов, определяющие границы оценок. Для данной программы были применены следующие диапазоны: 0÷34,99% - соответствует неудовлетворительной оценке, 35÷64,99% – удовлетворительной, 65÷84,99% – хорошей, 85÷100% – отличной.

После завершения контрольного мероприятия каждому тестируемому на экран выдавалась информация о результатах теста (оценка) и правильности ответов на вопросы, что позволило сделать самостоятельные выводы об успешности своей работы. Для преподавателя формировались отчеты, позволяющие анализировать результаты тестирования. Распределение оценок при способе оценивания «один неправильный ответ - полностью неправильный вопрос», %:

1) в режиме «тренировка»

«отлично» – 76,5; «хорошо» – 23,5; «удовлетворительно» – 0; «неудовлетворительно» – 0.

2) в режиме «тест»

«отлично» – 95; «хорошо» – 5; «удовлетворительно» – 0; «неудовлетворительно» – 0.

Для оценки качества программы проводилось анкетирование слушателей, контингент которых состоял из руководителей и специалистов в возрасте

26–38 лет, окончивших высшее учебное заведение 5–15 лет назад. Основными мотивирующими факторами были названы потребность в повышении уровня профессиональной компетентности (85 %) и перспектива карьерного роста (95 %). Организация учебного процесса была высоко оценена (5 баллов по пятибалльной системе) 100 % количеством слушателей по следующим параметрам:

- использование необходимых раздаточных материалов, технических средств;
- эффективное использование времени в рамках занятия;
- поддержка интереса к теме занятия посредством совместных рассуждений, вопросов и т.п.

Слушатели программы отметили, что за период прохождения обучения их знания были систематизированы, изучены новые вопросы и современные тенденции; учебный процесс был достаточно гибким в соответствии с запросами обучающихся, преподаватели умели вызывать интерес к изучаемым вопросам и создавали условия для взаимного обмена опытом.

Таким образом, важнейшей качественной характеристикой современного этапа системы подготовки специалистов выступают интеграционные процессы взаимодействия высшего профессионального образования и производственной сферы. В настоящее время происходит накопление опыта социального партнёрства между образовательными учреждениями и промышленными предприятиями. Реализация инновационной программы, основанной на дуальном подходе, будет способствовать переходу на качественно новый уровень подготовки (переподготовки) высококвалифицированных специалистов для производства, развитию инженерно-технологических компетенций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полях О.А. Разработка тестовых заданий и анализ результатов компьютерного тестирования студентов по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» // О.А. Полях, В.И. Кожемяченко // Сб. науч. тр. "Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии"/ СибГИУ. - Новокузнецк:, 2007. – Вып. 19. – С. 202-209.

2. Полях О.А. Комплект тестовых заданий по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»: компьютерная разработка / О.А. Полях, Г.В. Галевский, В.В. Руднева. – М.: ВНИИЦ, 2006. – № 7002. – № Г.Р. 50200601768.

УДК 349.2

Н.Е. Анохина

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

**ОСОБЕННОСТИ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ТРУДОВОЕ ПРАВО» СТУДЕНТАМ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ 034700: «КАДРОВОЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВО И АРХИВИРОВАНИЕ ДОКУМЕНТОВ»**

Проанализированы особенности преподавания дисциплины, основные ошибки, иногда допускаемые работниками кадровой службы организации, на которые следует обращать внимание студентов во время лекций и практических занятий.

Features of teaching of discipline, the main mistakes are analysed allowed by employees of personnel service of the organization, to which it is necessary to pay attention of students in time of lectures and practical training.

Дисциплина «Трудовое право» изучается студентами бакалаврами в 3 семестре. По учебному плану на изучение этого раздела законодательства отводится 108 часов (18 часов – лекции, 36 часов – практические занятия). Завершается изучение курса сдачей студентами экзамена.

В ходе изучения предмета студенты – будущие работники кадровой службы предприятия, должны усвоить главное правило: внимательное отношение к предписаниям закона позволяет избежать множества проблем. Когда в организацию устраивается новый работник, задача кадровика – правильно, юридически безупречно оформить с ним трудовые отношения. А для этого особое внимание следует уделять документам: как тем, которые сотрудник предъявляет при приеме на работу, так и документам, которые впоследствии оформляются кадровой службой организации.

В кадровой работе не бывает мелочей, поэтому ошибочно указанная или не указанная вообще информация может привести к самым серьезным правовым последствиям. У кадровика предприятия огромный объем работы, поэтому часто при оформлении трудового договора и других документов по личному составу некоторые, на первый взгляд вроде бы незначительные, детали могут ускользнуть от его внимания. А это, впоследствии может привести к нарушению прав работника, его обращению с иском в суд с целью защиты своих прав.

Во время практических занятий следует научить студентов составлять основные документы, присутствующие в кадровой работе: трудовой договор, приказы, должностные инструкции, штатное расписание и т. п. Преподаватель должен обучить студентов заполнять трудовую книжку, раскрыть секреты

личной карточки. Перед тем, как студенты будут самостоятельно составлять, например, трудовой договор, следует обратить их внимание на основные ошибки, которые допускаются иногда кадровиками при оформлении трудового договора. Рассмотрим некоторые ошибки более подробно.

Статьей 56 ТК РФ установлено, что трудовой договор – соглашение между работодателем и работником, в соответствии с которым работодатель обязуется предоставить работнику работу по обусловленной трудовой функции, обеспечить условия труда, предусмотренные трудовым законодательством, коллективным договором, соглашениями, локальными нормативными актами, содержащими нормы трудового права, своевременно и в полном размере выплачивать работнику заработную плату, а работник обязуется лично выполнять определенную этим соглашением трудовую функцию, соблюдать действующие в организации правила внутреннего распорядка.

1. Наиболее распространенной ошибкой, допускаемой при заключении трудового договора с гражданами моложе 16 лет, является отсутствие надлежащим образом оформленного письменного согласия законных представителей. Наиболее простой (но вместе с тем юридически безупречный) способ оформления подобного согласия – виза на трудовом договоре.

2. В трудовой договор строго в соответствии со структурой и штатной численностью, штатным расписанием (форма Т-3) вписываются наименование структурного подразделения и должность, специальность, профессия с указанием разряда, квалификации, категории. Наименование профессий (должностей) рекомендуется определять в соответствии с Единым тарифно-квалификационным справочником (ЕТКС) или тарифно-квалификационными характеристиками. Квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других служащих утвержден постановлением Минтруда России от 21.08.98 г. № 37 и в него регулярно вносятся дополнения. Если по должности, специальности, профессии предусмотрена так называемая льготная пенсия, то наименования структурного подразделения, должности (профессии) должны строго соответствовать ЕТКС. Малейшие отклонения в трудовом договоре, штатном расписании организации, приказе о приеме на работу, трудовой книжке и должностной инструкции работника могут привести к самым серьезным последствиям: Пенсионный фонд при оформлении пенсии откажется засчитывать этот период в стаж, дающий право на льготную пенсию.

3. Если работник принимается на основное место работы и проработал более 5 дней, сотрудник отдела кадров организации вносит запись о приеме на работу в его трудовую книжку. Рекомендуется проявлять особую настойчивость в вопросах соблюдения сроков предъявления работником трудовой книжки (вплоть до наложения дисциплинарного взыскания при их несоблюдении). Это связано с тем, что на практике довольно часто по вине работника возникают противоправные ситуации, в которых страдает не только он, но и организация-работодатель. Например, работник принят по трудовому договору на основное место работы, но по каким-либо причинам затягивает с предъявлением подлинника трудовой книжки. При этом он оформлен на работу и в

табеле учета рабочего времени ему ставятся «восьмерки», а не 16 часов в неделю, как предполагает прием на работу по совместительству. Время идет, кадровик нервничает, и, наконец, работник, проработавший определенный (порой весьма значительный) срок в данной организации (по основному месту работы), приносит трудовую книжку, в которой дата увольнения с предыдущего места работы обозначена... вчерашним, относительно даты предъявления подлинника трудовой книжки, днем. Далее кадровому специалисту предприятия остается ломать голову над тем, каким образом ему предстоит нарушить закон еще раз, выбирая для записи в трудовую книжку дату приема на работу.

4. В разделе «Оплата труда» трудового договора указывается должностной оклад (тарифная ставка), надбавки, доплаты (например, за совмещение профессий или должностей), поощрительные выплаты. При всех условиях получаемое вознаграждение не может быть ниже МРОТ, установленного государством на всей территории РФ (с 1 января 2014 г. – 5554 руб.). Более высокий размер, например, в Кемеровской области, установлен Кузбасским региональным соглашением между Федерацией профсоюзных организаций Кузбасса, Коллегией Администрации Кемеровской области и работодателями Кемеровской области на 2013 – 2015 годы. По данному Соглашению заработная плата должна быть не ниже 1,5 величины прожиточного минимума трудоспособного населения Кемеровской области определенной за 4 квартал 2012 г. (т. е. 9183 руб.), а доля постоянной (гарантированной) части в структуре заработной платы должна составлять не менее 60 – 70 %. Максимальным размером заработная плата не ограничивается. Иногда с целью «сохранения коммерческой тайны» в этом разделе даются ссылки на штатное расписание и Положение о премировании. Делается это также с целью экономии времени: при изменении размера заработной платы можно ограничиться внесением изменений в штатное расписание, издать приказ директора без внесения последующих изменений в трудовой договор работника. Такие же ссылки даются и в приказе о приеме на работу. Это ошибки. Можно даже не говорить о том, какую путаницу такая «предусмотрительность» вносит в информационно-справочную работу в текущем делопроизводстве и в дальнейшем при выдаче архивных справок при оформлении пенсии. К тому же, наличие таких ссылок в трудовом договоре противоречит обычной логике: получается, что работника при приеме на работу необходимо под расписку знакомить со штатным расписанием организации, а лучше выдавать его копию (что, конечно же, никто не делает), иначе вообще непонятно, под чем он ставит свою подпись в последнем разделе трудового договора «Адреса сторон и подписи».

5. В содержание трудовых договоров нередко включаются условия, ограничивающие (а то и нарушающие) законные права гражданина, поступающего на работу, что является грубым нарушением трудового законодательства (ст. 9 ТК РФ):

- лишаящие работника права на расторжение (по своей инициативе) трудового договора до истечения срока испытания при приеме на работу;

- обязывающие работника отработать после обучения, проводившегося не за счет средств работодателя, определенное трудовым договором время;
- нарушающие право работника на получение оплаты труда в порядке, определенном трудовым законодательством (в частности, превышение доли заработной платы, разрешенной к выплате в не денежной форме, установление максимального размера заработной платы вне связи с результатами труда работника и т.п.) (ст. ст. 131 и 132 ТК РФ).

Такие условия не подлежат применению с момента включения в содержание трудового договора. При выявлении в содержании условия, ограничивающего (либо прямо нарушающего) законные права работника, перезаключать трудовой договор не требуется - достаточно оформить письменное соглашение об изменении условий трудового договора (в данном случае - об исключении из него соответствующего условия). Ошибки технического характера или опечатки обнаруживаются (при более или менее внимательном ознакомлении с трудовым договором) и в его условиях, и во включаемых в него сведениях. Кроме того, весьма часто допускаются ошибки в нумерации частей, пунктов и подпунктов документа (сбой или пропуск нумерации). Однако практически любая техническая ошибка в содержании трудового договора может обернуться для его сторон нежелательными правовыми последствиями. Это касается в первую очередь опечаток в сведениях, идентифицирующих работодателя и работника, а также в любых цифровых сведениях (дата начала работы, размер оплаты труда, продолжительность предоставляемого отпуска и т.д.). Недопустимы опечатки в наименовании вида и названии нормативного акта, его регистрационных данных (дата, номер), если на таковой в трудовом договоре имеется ссылка. В целях предупреждения ошибок технического характера настоятельно рекомендуется до подписания трудового договора произвести его предварительную вычитку и при необходимости корректуру (это касается как основного текста документа, так и приложений к нему).

Помимо оформления кадровой документации, желательно чтобы преподаватель имел представление сам и уделил внимание во время практических занятий основам заполнения некоторых кадровых документов с помощью компьютерной программы 1С Предприятие, в частности, такому ее разделу как «Зарплата и Управление Персоналом», так как данная программа позволяет вести учет сотрудников предприятия, заполнять более быстро многие кадровые документы, такие как штатное расписание, графики работы и т.п.

## **ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ**

С.Г. Коротков, Е.П. Волюнкина, М.В. Темлянцев, Г.В. Галевский  
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк

## К 80-ТИ ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ СИБГИУ

В 30-е годы прошлого столетия правительством СССР был принят курс на создание угольно-металлургического комплекса за Уралом, где ранее промышленность практически отсутствовала. Это привело к индустриальному развитию обширных территорий на Урале, в Западной и Восточной Сибири.

Строительство Кузнецкого металлургического комбината (КМК) привлекло тысячи рабочих, однако нехватка технического персонала среднего и высшего звена значительно сдерживала темпы возведения, пуск и эффективную эксплуатацию горно-металлургических предприятий.

По инициативе выдающегося ученого, главного инженера Кузнецкстроя Ивана Павловича Бардина, решением Совета народных комиссаров и Центрального исполнительного комитета СССР от 23 июня 1930 г. принято решение о создании Сибирского института черных металлов (СИЧМ), который позже был преобразован в Сибирский металлургический институт (СМИ), затем в Сибирскую государственную горно-металлургическую академию (СибГГМА), а позднее в Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кафедра теплоэнергетики и экологии (ранее: кафедра металлургических печей, кафедра металлургических печей и теплогазоснабжения, теплотехники печей и газоочистки, а затем кафедра теплофизики и промышленной экологии) была создана в августе 1934 г., спустя четыре года после открытия в 1930 г. Сибирского института черных металлов.

Первым заведующим кафедрой металлургических печей стал доцент М.С. Спиридонов (1934 – 1939 гг). В те годы кафедра была общетехнической, за ней были закреплены дисциплины «Металлургические печи», «Топливо и огнеупоры», «Общая теплотехника», «Гидравлика», впоследствии к ним добавили курс «Контрольно-измерительные приборы». При кафедре функционировали учебно-исследовательские лаборатории по топливу и огнеупорам, в которых при участии работников кафедр металлургии чугуна и физической химии проводились исследования свойств кузнецких углей и других шихтовых материалов, а также местного сырья для огнеупорного цеха КМК и заводов строительной промышленности [1 – 3].

Новое развитие кафедра получила с 1940 г., когда к руководству пришел к.т.н. доцент Иван Савельевич Назаров, возглавлявший ее до 1962 г. Благодаря его таланту ученого, педагога и администратора удалось сформировать на кафедре мощный научный потенциал, педагогические традиции, определившие ее высокий авторитет не только в СМИ, но и на всей территории Советского Союза.

В 1941 г. выходит одна из главных его работ – книга «Основы теории промышленных печей», которая приобрела большую популярность у студентов, ученых и инженерно-технических работников предприятий.

Во время Великой отечественной войны И.С. Назаров вошел в группу ученых СМИ, которая решала задачи, связанные с переводом КМК на оборонные заказы, проектированием и выбором печей для обжига бронелиста в термическом цехе, повышением производительности обжиговых печей для увеличения объемов производства динаса и шамота [4].

В 1951 г. в свет выходит уникальное издание того времени – учебник «Металлургические печи», авторский коллектив которого в составе В.А. Баума, Д.В. Будрина, А.И. Ващенко, М.А. Глинкова, Б.Л. Грановского, Б.И. Китаева, М.А. Кузьмина, А.Я. Михайленко, И.С. Назарова, Л.А. Плотникова, И.Д. Семикина, Н.Ю. Тайца, С.Г. Тройба был сформирован из ученых ведущих научных центров металлургической теплотехники: Московского института стали и сплавов, Уральского политехнического института, Днепропетровского металлургического института, Московского института цветных металлов и золота, Ленинградского политехнического института, Сибирского металлургического института и Государственного научно-исследовательского института цветных металлов. Учебник включал в себя все последние достижения теории печей, печестроения и являлся фактически общесоюзным изданием, которое вышло в свет благодаря организаторским способностям его научного редактора профессора М.А. Глинкова. И.С. Назаровым в этом учебнике в соавторстве с профессорами М.А. Глинковым и Б.И. Китаевым был написан раздел «Общие принципы конструирования печей».

С 1953 по 1955 гг. И.С. Назаров работал в Китае по организации высшего металлургического образования, а в 1955 г. им был организован первый набор студентов по специальности «Металлургические печи». С этого момента кафедра стала специальной, выпускающей. В 1960 г. состоялся первый выпуск 14 инженеров-теплотехников, четверо из них – Э.Р. Брувер, Ю.Ф. Бердюгин, Я.П. Калугин, В.С. Стариков защитили впоследствии кандидатские и докторские диссертации.

В 1957 г. И.С. Назаров возглавил работу по организации редакции и типографии для выпуска нового журнала «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия», став первым его главным редактором. Сотрудники кафедры принимали активное участие в редактировании и оформлении статей, научной пропаганде нового журнала [5].

Под руководством и при непосредственном участии И.С. Назарова на кафедре металлургических печей был создан мощный парк полупромышленных камерных печей скоростного нагрева, на базе которого были проведены масштабные эксперименты в активно развивающемся в то время научном направлении – скоростном нагреве стали. Уникальные эксперименты по исследованию трещинообразования, окисления и обезуглероживания стали при скоростном нагреве послужили основой кандидатских и докторских диссертационных исследований сотрудников кафедры В.С. Старикова, Е.И. Корочкина и др. И.С. Назаровым были предложены и осуществлены на практике конструкции электрических безынерционных печей.

И.С. Назарову удалось реализовать себя как крупного ученого-теплотехника, фактически основателя Сибирской научно-педагогической школы металлургической теплотехники. Научной общественности И.С. Назаров известен как специалист в области теории и практики тепловой работы металлургических агрегатов.

В 1959 г. кафедра металлургических печей выделила из своего состава часть преподавателей для подготовки специалистов по автоматизации металлургического производства, которую возглавил, образовав новую кафедру автоматизации металлургического производства, д.т.н., профессор П.М. Масловский.

С 1962 по 1974 гг. кафедрой заведовал доцент Евгений Иванович Корочкин. Под его руководством были реконструированы и переоснащены лаборатории механики газов, теплопередачи и др., закончено строительство и оборудование лабораторий металлургических печей. По его инициативе были созданы условия для специализации части студентов-теплотехников на проблемах очистки промышленных газов. Рост объемов производства металлургических предприятий, необходимость борьбы с загрязнениями атмосферы предопределили актуальность и востребованность специалистов данного профиля, поэтому в 1982 г. была открыта новая специальность «Улавливание и утилизация пылей и газов».

Профессиональный и педагогический опыт Е.В. Корочкина был направлен на развитие образовательного процесса, решение проблем педагогики высшей школы, внедрение ЭВМ и информатизации в учебном процессе. В этот период подготовлено 334 специалиста-теплотехника.

В 1974 г. кафедре было поручено организовать подготовку инженеров по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция».

В 1982 г. кафедра теплогазоснабжения и вентиляции стала самостоятельной и впоследствии вошла в состав строительного факультета со своими лабораториями и с хорошим методическим обеспечением. На новую кафедру перешли работать опытные специалисты Л.И. Ускова, О.Я. Логунова, А.И. Кореньков, З.В. Нойкос, В.И. Иванов.

С 1974 по 2002 гг. кафедрой заведовал профессор Геннадий Иосифович Черныш, вернувшийся из Арабской республики Египет, куда в 1972 г. был командирован в качестве преподавателя в Эль-Таббинский металлургический институт для подготовки магистров наук.

В 70 – 80-е годы резко возросла потребность в подготовке высококвалифицированных педагогических кадров для собственных нужд. Кафедра стремительно развивалась, увеличивался штат профессорско-преподавательского состава, требовались «остепененные» металлурги-теплотехники – специалисты в области теории и конструкций металлургических печей.

Для решения этой задачи Г.И. Чернышом в аспирантуру, на родственную кафедру Уральского политехнического института, которой в то время заведовал профессор Ю.Г. Ярошенко, были направлены выпускники СМИ Н.А. Драничников, В.П. Зайцев, Н.И. Трофимов, В.М. Павловец, А.К. Соловьев, М.Н. Башкова. Под чутким руководством Юрия Гавриловича СМИчи успешно защитили кандидатские диссертации и, вернувшись в родные стены, составили основной костяк кафедры.

Во время руководства кафедрой Г.И. Чернышом пришелся один из самых нелегких для высшего профессионального образования и России в целом период 90-х годов. Несмотря на сложные социально-экономические изменения в стране, отток кадров из высшей школы, Геннадию Иосифовичу удалось сохранить высокий кадровый потенциал кафедры, многолетние традиции, преумножить ее достижения.

В 1995 г. доцентом кафедры В.С. Стариковым в диссертационном совете Уральского государственного технического университета была успешно защищена докторская диссертация на тему «Форсированные энергосберегающие технологии нагрева стальных заготовок в металлургических печах».

В 2000 г. профессором кафедры К.А. Черепановым в диссертационном совете при Иркутском государственном техническом университете была защищена докторская диссертация на тему «Разработка научных и практических основ ресурсосберегающих технологий переработки и утилизации твердых дисперсных отходов горнорудной и металлургической промышленности (на примере Кузбасса)».

С 2002 г. по настоящее время кафедрой заведует к.т.н. доцент Сергей Георгиевич Коротков. Кафедра продолжает готовить инженеров по специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей» (специализации: «Теплофизические основы конструирования и эксплуатация промышленных печей» и «Промышленная экология»). В 2003 г. произведен первый набор, а в 2008 г. первый выпуск инженеров по новой специальности «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», специализация «Переработка комплексного и техногенного сырья».

В 2011 г. организована подготовка бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», профили «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей» и «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», начат прием студентов на заочную форму обучения. В 2011 г. также начата подготовка бакалавров по направлению «Техносферная безопасность», профиль «Инженерная защита окружающей среды». В 2012 г. открыта подготовка бакалавров по направлениям: «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика» (по очной, заочной и очно-заочной формам подготовки); «Экология и природопользование», профиль «Экология». Открыта магистратура по направлению: «Экология и природопользование», программа «Ресурсосбережение и утилизация отходов».

На кафедре функционирует аспирантура по специальностям 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов, 05.17.01 – Технология неорганических веществ, 15.16.07 – Металлургия техногенных и вторичных ресурсов.

В 2007 г. доцентом Е.П. Волынкиной защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» на тему «Развитие концепции управления отходами и разработка методологии ее реализации на металлургическом предприятии». В этом же году доцентом кафедры М.В. Темлянцевым защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Сибирском государст-

венном индустриальном университете на тему «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали».

Кафедра «Теплоэнергетика и экология» – одна из крупнейших выпускающих кафедр университета. В настоящее время в ее составе: 5 профессоров, 10 доцентов, 3 старших преподавателя, 4 доктора и 11 кандидатов наук.

Хорошая лабораторная база – во многом заслуга коллектива учебно-вспомогательного персонала, заведующего лабораториями, учебных мастеров и лаборантов. Кафедра располагает современными лабораториями: механики жидкости и газов; топлива; тепломассообмена; тепловых агрегатов; газоочистных установок; исследования теплофизических процессов; энергосбережения; техногенных и вторичных ресурсов; рециклинга материалов; экологии и природопользования.

Всего на кафедре по направлениям подготовки обучаются 210 – 230 студентов, кроме того, ежегодно кафедра обучает 350 – 400 студентов других институтов и специальностей. Учебный процесс реализуется по 16 учебным планам, включающих в совокупности более 200 рабочих программ дисциплин, по которым работает кафедра.

Для обеспечения качественной профессиональной подготовки специалистов и бакалавров за последние 5 лет подготовлено и издано: 3 монографии, 2 учебника, 35 учебных пособий, 76 учебно-методических разработок. Среди них «Окисление и обезуглероживание стали в процессе нагрева под обработку давлением», «Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения стали и сплавов», «Металлургические электропечи», «Расчеты методических печей», «Расчеты камерных печей», «Окатыши в технологии экстракции металлов и руд», «Оборудование для очистки газов», «Рекуператоры для промышленных печей», «Огнеупорные материалы», «Экологические проблемы горно-металлургического региона: Кузбасс», «Природоохранная деятельность предприятия», «Металлургические технологии переработки промышленных и бытовых отходов», «Проектирование полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов» и др.

Обучение ведется квалифицированными преподавателями и специалистами городских энергетических и экологических служб. Процесс обучения построен таким образом, чтобы полученные знания и практические навыки обеспечили как можно более широкие возможности для последующего трудоустройства на предприятиях любого профиля в качестве теплотехников, экологов и теплоэнергетиков: на специализированных предприятиях, осуществляющих сбор, транспортировку, переработку, обезвреживание и захоронение отходов; в консалтинговых экологических компаниях; в природоохранных контролируемых организациях; в теплотехнических лабораториях и лабораториях экологического мониторинга; в проектных и научно-исследовательских организациях. Кроме этого, даются знания, необходимые для будущего предпринимателя в сфере энергетики и переработки отходов, что открывает возможности для открытия своего дела еще в стенах вуза.

Программа обучения предусматривает прохождение всех видов практики на металлургических, энергетических и специализированных предприятиях по переработке, обезвреживанию и захоронению отходов. Среди них ОАО «Евраз

ЗСМК»; ОАО «Челябинский МК»; ОАО «Кузнецкие ферросплавы»; ОАО «Кузнецкая ТЭЦ»; Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка; ЦОФ «Щедрухинская»; ОАО «СУЭК-Кузбасс»; ЗАО «Водоканал»; Кузбасская Ассоциация переработки отходов; ОАО «Эколэнд»; ООО «Экологический региональный центр»; ОАО «РУСАЛ Новокузнецк»; ООО «Недра Сибири»; ОАО «Северсталь»; Шорский национальный парк; Управления Росприроднадзора, Ростехнадзора, Роспотребнадзора и др.

На старших курсах студенты активно занимаются научно-исследовательской работой (НИРС), которая является составной частью учебных планов по всем направлениям подготовки. Ряд НИРС в дальнейшем развитии становятся выпускными квалификационными работами. Перечень укрупненных тем НИРС следующий:

1. Влияние технологических факторов металлургических процессов на образование вредных выбросов.

2. Исследование образования оксидов азота при сжигании топлива.

3. Влияние энергопотребления на экологическую ситуацию в городе.

4. Каталитическая очистка выбросов металлургического производства.

5. Разработка катализаторов очистки выбросов на базе металлургических шлаков.

6. Использование отходов коксохимического производства для разработки материалов коррозионной защиты.

7. Оценка экологических рисков производственной деятельности черной металлургии.

8. Анализ промышленных отходов в г. Новокузнецке и возможности их вторичного использования.

9. Очистка газообразных выбросов в атмосферу биохимически очищенной водой коксохимического производства.

10. Снижение экологических рисков в теплоэнергетике.

11. Система очистки отходящих газов при термической утилизации твердых бытовых отходов.

12. Уменьшение потерь тепла через окна при использовании поглощающих газов.

13. Исследование процесса слоевой сушки окатышей струями сжатого воздуха.

14. Исследование процесса окисления различных марок сталей.

15. Разработка технологии производства брикетов из железосодержащих мелкодисперсных отходов.

16. Исследование возможности прямого получения железа из тонкодисперсных железосодержащих отходов твердофазным восстановлением.

17. Разработка технологии извлечения и обезвреживания биогаза свалки твердых бытовых отходов г. Новокузнецка.

18. Разработка технологии разделения и утилизации твердых бытовых отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах.

Результаты практически всех НИРС по их завершении публикуются в ежегодных сборниках «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых».

Наиболее активные студенты выезжают на Всероссийские научно-практические конференции, семинары и форумы в города Санкт-Петербург, Екатеринбург, Иркутск, Новосибирск, Кемерово и др., являются стипендиатами Экологического Фонда им В.И. Вернадского, губернаторских стипендий, дипломантами конференций с международным участием.

Научно-исследовательские дипломные работы составляют 15 – 35 % от общего количества выполняемых выпускных квалификационных работ.

Дипломные проекты направлены на решение актуальных практических проблем действующих предприятий Кузбасса. Как правило, темы проектов согласуются непосредственно с предприятиями, и выпускники после защиты дипломов имеют возможность трудоустройства на эти предприятия в качестве специалистов экологических и теплотехнических служб. Государственные аттестационные комиссии представлены ведущими учеными и специалистами в области металлургической теплотехники, экологии и металлургии техногенных и вторичных ресурсов.

Лучшие выпускники вместе с дипломами получают рекомендательные письма от членов ГАК, помогающие им найти работу по специальности.

За прошедшие годы количество выпускников кафедры превысило 2200 человек, 232 человека из них закончили ВУЗ с отличием.

Благодаря высокому качеству обучения, приобретенным в университете практическим знаниям, тесному сотрудничеству кафедры с металлургическими, энергетическими и другими промышленными предприятиями, Кузбасской ассоциацией переработчиков отходов, экологическими службами, федеральными и муниципальными природоохранными организациями, выпускники имеют широкие возможности для трудоустройства по специальности.

Преподаватели кафедры участвовали в подготовке национальных инженерных и научных кадров в Китайской Народной Республике (И.С. Назаров), Арабской Республике Египет (Г.И. Черныш, В.В. Стерлигов), Алжирской Народно-демократической Республике (Н.А. Драничников).

Научная деятельность является одним из приоритетов кафедры. За 80-летнюю историю коллективу приходилось решать весьма широкий спектр научных задач и проблем для многих промышленных предприятий г. Новокузнецка, Кузбасса, России и др. государств.

Основные научные направления кафедры:

- 1) горение, аэромеханика и массоперенос в металлургических агрегатах;
- 2) развитие теплотехнологий в производстве железорудного сырья с целью повышения его качества и производительности технологического оборудования;
- 3) развитие ресурсосберегающих технологий тепловой обработки стали;
- 4) энергосбережение в промышленности, в бюджетной и жилищной сферах;
- 5) снижение вредных выбросов в атмосферу от энергетических и промышленных объектов;
- 6) разработка энергогенерирующих технологий и комплексов;
- 7) разработка технологии получения безобжиговых теплоизоляционных и огнеупорных изделий на основе отходов металлургии и теплоэнергетики;

8) исследование процессов твердо- и газофазного восстановления в составе железосодержащих брикетов;

9) разработка технологии получения самовосстанавливающихся брикетов на основе железосодержащих и органических отходов;

10) разработка новых видов синтетических шлакообразующих материалов на основе отходов алюминиевого производства;

11) разработка новых видов альтернативного топлива на основе органических отходов;

12) разработка технологии утилизации накопленных отходов горнометаллургического комплекса;

13) исследование закономерностей формирования техногенного месторождения на территории шламохранилища металлургического предприятия и способов его переработки.

Профессором П.М. Масловским проводились исследования тепловой работы мартеновских печей на основе теории подобия; на Кузнецком заводе ферросплавов доцентом В.Д. Мароном и профессором Г.В. Самохваловым проводились исследования, направленные на улучшение работы ферросплавных печей в условиях ограничения электропотребления; В.В. Юшкиным был исследован температурный режим лещадей доменных печей КМК в процессе их износа. При освоении новых мощностей ЗСМК выполнены исследовательские работы на нагревательных колодцах и по изучению окисления стали в цикле производства, определению стоимости нагрева по переделам (доценты Е.И. Корочкин, Е.Л. Медиокритский, Ю.Е. Михайленко). Совместно с институтом «Теплопроект» разработаны и внедрены новые конструкции компактных радиационных рекуператоров для нагревательных печей металлургического и машиностроительного производства (Е.Л. Медиокритский). По данным, полученным кафедрой совместно с работниками теплотехнической лаборатории КМК, институтом «Стальпроект» была разработана серия плоскопламенных горелок для газовых смесей на основе коксового и доменного газов. Горелки этого типа были установлены на нагревательных печах КМК и ЗСМК, на зажигательных горнах аглоизвесткового производства ЗСМК, где они успешно работают и в настоящее время, обеспечивая качественное зажигание шихты и значительную экономию топлива.

Вопросам скоростного нагрева, окисления и обезуглероживания стали посвящены исследования профессоров И.С. Назарова, Г.В. Самохвалова, В.В. Стерлигова, В.С. Старикова, М.В. Темлянцева, доцентов Е.И. Корочкина, Ю.Е. Михайленко. Разработке новых топливосжигающих устройств — автогенных, плоскопламенных, высокоскоростных топливо-кислородных горелок — посвящены работы профессоров И.С. Назарова, Г.В. Самохвалова, Г.И. Черныша, В.В. Стерлигова, доцента С.Г. Короткова.

Под руководством Г.И. Черныша сотрудниками кафедры проводились: исследования теплового способа бурения крепких горных пород в Кузбассе; исследование реактивных горелок и фурм для промышленных установок Кузнецкого и Западно-Сибирского металлургических комбинатов, Кузнецкого завода ферросплавов, Красноуральского, Чимкентского и Алмалыкского заводов цветной металлургии; исследование пылегазовых выбросов Новокузнецкого стекольного завода, Кузнецкой ТЭЦ, ТЭЦ Западно-Сибирского металлургического комбината,

заводов «Сантехлит» и «Новокузнецксельмаш», предприятий Барнаула, Рубцовска и др. Результаты большинства исследований переданы для внедрения и использования на Магнитогорский и Нижне-Тагильский металлургические комбинаты, заводы «Красный Октябрь» (Волгоград), «Большевик» (Ленинград), Макеевский, Енакиевский, Серовский и Бекабадский металлургические заводы. По ряду из них составлены технико-экономические обоснования для проектирования систем газоочистки в городах Новокузнецк, Барнаул, Рубцовск.

Проблемами экологии и использования вторичных ресурсов занимаются профессор К.А. Черепанов, Е.П. Волынкина, Л.Б. Павлович.

Л.Б. Павлович исследованы и разработаны технологии: гидрогенизационной очистки коксохимического нафталина; каталитической очистки выбросов ряда цехов коксохимического производства; производства катализаторов глубокого окисления органических выбросов и оксида углерода на базе шлаков черной металлургии; утилизации техногенных и химических отходов коксохимического производства (КХП) и других отраслей промышленности в шихте на коксование; утилизации химических отходов КХП в виде модифицирующих добавок в дорожном строительстве, в производстве технического углерода и др.; производства новых материалов противокоррозионной защиты на базе отходов фталиевого ангидрида – порошковые краски, полиэферы, алкидные грунтовки и другие; утилизация сточных вод КХП; исследование состава выбросов технологических источников КХП; оценка экологических рисков в металлургическом производстве.

Основная тема научных исследований К.А. Черепанова – решение проблемы устойчивого развития посредством замены природных ресурсов промышленными отходами в области металлургии, строительной индустрии и теплоэнергетики.



Коллектив кафедры 2009 г.

Профессором Е.П. Волынкиной решен комплекс теоретических, прикладных и экспериментальных задач по развитию теории управления отходами и разработке методов ее реализации на металлургическом предприятии, включая методы оптимизации доменного и конвертерного процессов в направлении снижения потребления природных ресурсов и образования отходов; технологии переработки отходов металлургического производства и смежных отраслей; способов обезвреживания и безопасного захоронения отходов; разработке принципов устойчивого развития техногенных систем; создания новых видов сырья, топлива и восстановителей для металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевых заводов и твердых бытовых отходов; разработке технологии глубокого обезвреживания токсичных отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах; разработке и реализации инновационного проекта по созданию производства новых видов синтетических флюсов для металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевых заводов.

Разработка и совершенствование ресурсо- и энергосберегающих технологий в производстве высококачественного железорудного сырья для металлургической промышленности является основным направлением научной деятельности доцента В.М. Павловца.

Под руководством д.т.н., профессора, проректора по научной работе и инновациям М.В. Темлянцева продолжаются работы по направлению «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали». Много творческой энергии и души он вкладывает в подготовку научно-педагогических кадров.

По результатам научно-исследовательских работ коллективом кафедры получено более 200 авторских свидетельств и патентов. За последние 5 лет организованы и проведены 3 международных научно-практических конференции, получено 34 патента, опубликовано 260 научных работ в ведущих изданиях РФ, защищено 5 диссертаций кандидатов технических наук.



Коллектив кафедры 2011 г.

У кафедры сложились творческие связи со многими педагогическими и научными коллективами: Московским институтом стали и сплавов (Национальным исследовательским технологическим университетом); Южно-Уральским государственным университетом; Магнитогорским государственным техническим

университетом; Днепропетровским металлургическим институтом; Национальным минерально-сырьевым университетом «Горный»; Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом; Научно-исследовательским институтом металлургической теплотехники – ВНИИМТ; Сибэнергочерметом и др.

Кафедра активно сотрудничает с зарубежными природоохранными и научно-исследовательскими организациями. В 2006 г. при поддержке Агентства охраны окружающей среды США (EPA) и международного партнерства «Метан на рынки» («MethanetoMarkets») под руководством Е.П. Волынкиной выполнен проект «Инвентаризация полигонов ТБО в России и оценка их метанового потенциала». Впервые в России создана база данных, включающая подробную информацию о 866 свалках и полигонах ТБО на территории России. Выполнена предварительная оценка образования свалочного метана по каждой свалке. Изучена практика создания систем дегазации и утилизации свалочного газа. Это привело к началу исследований и проработке возможности организации извлечения и утилизации свалочного метана со свалок ТБО в городах Новокузнецке и Кемерово.

С 2005 г. организуются и проводятся Международные научно-практические конференции «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе» с участием ученых из Польши, Украины, США, на которых представляются разработки в области эколого-экономических, нормативно-правовых, санитарно-гигиенических, социальных аспектов обращения с отходами, технические разработки в области сбора, транспортировки, разделения, обезвреживания, переработки отходов.

В рамках конференции в 2010 г. совместно с Агентством охраны окружающей среды США (EPA) организовано проведение тренингового семинара «Организация извлечения и утилизации метана со свалок ТБО» для персонала полигонов ТБО Кемеровской области и местных администраций.

Сотрудники кафедры и студенты ведут активную общественную деятельность в области экологического просвещения и энергосбережения. Ведется пропаганда грамотного потребления энергии, управления отходами. Разработаны, изданы и распространяются популярные брошюры «Скажем мусорным свалкам нет», «Инструкция по управлению отходами на предприятиях и в организациях», буклеты «10 правил обращения с бытовыми отходами», календари, плакаты, листовки.

Студенты-экологи всех курсов — с первого по пятый — объединены в студенческий экологический отряд «ЭКОС». «ЭКОС» – это общественное объединение будущих экологов с целью осуществления уже в период студенчества просветительской и практической деятельности в сфере управления отходами и охраны окружающей среды.

Деятельность «ЭКОСа» широко известна не только в г. Новокузнецке и Кемеровской области, но и в других регионах России. Студенты пропагандируют раздельный сбор бытовых отходов, организуют сбор макулатуры в университете, выпускают собственную газету «ЭКОТАЙМ», ставят экологи-

ческие спектакли по собственным сценариям (наиболее известен спектакль «Экосити — город будущего»), которые демонстрируют в вузах, школах, на предприятиях города, проводят экологические акции в городе, экологические уроки в школах. Активисты экологического отряда "ЭКОС" принимают активное участие в ежегодном Российском студенческом экологическом семинаре в г. Екатеринбурге, где выступают с докладами на Всероссийской студенческой научно-практической конференции. За активную природоохранную деятельность отряд «ЭКОС» и его участники были неоднократно отмечены почетными грамотами, благодарственными письмами и грантами Губернатора Кемеровской области.

На кафедре действовал студенческий клуб энергосбережения EnNet. Главные задачи объединения – изучение, пропаганда и реализация правовых организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии. В настоящее время в связи с истощением ресурсного и энергетического потенциала, задача энергосбережения – сохранение природных ресурсов.

Кафедра гордится своими выпускниками – видными учеными и организаторами производства, директорами, главными инженерами и ведущими специалистами крупных заводов, общественными деятелями, успешными бизнесменами, творческими личностями, профессорами, доцентами, докторами и кандидатами технических наук, всеми, кто верой и правдой посвящает свою жизнь служению выбранной профессии, и просто достойными людьми. Среди них генеральный директор ЗАО «Калугин» д.т.н. Я.П. Калугин [6], заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН им. Кутателадзе в.н.с, д.т.н. В.И. Попов, генеральный директор ОАО «Амурсталь» С.И. Сафонов, генеральный директор ОАО «Кузбассшахтострой» Ю.А. Коробкин, генеральный директор ООО «Сибирские товары» С.Г. Сидельников, директор по персоналу ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» А.Г. Абраменко, руководитель спасательного центра по югу Кузбасса, президент городской ассоциации туристов Р.Э. Брувер, председатель комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка И.Н. Савина, руководитель Роспотребнадзора по Кемеровской области И.А. Климовская, главный теплотехник ОАО «Евраз ЗСМК» Е.А. Колотов, главный специалист по теплоэнергетике СЭнЛ ОАО «Евраз ЗСМК» В.В. Семахин, начальник цеха обжига извести аглоизвесткового производства ОАО «Евраз ЗСМК», член Союза писателей России С.Н. Стрельников, главный технолог прокатного производства ОАО «Евраз ЗСМК» В.Г. Перекопский, главный эколог ООО Сибстройпроект А.Г. Миролюбов, главный эколог «Евраз ЗСМК», почетный металлург РФ, председатель экологической комиссии Совета народных депутатов г. Новокузнецка А.А. Попов, ведущий специалист комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Админи-

страции г. Новокузнецка А.П. Панэ, эколог разреза «Ерунаковский» ОАО «Кузбассразрезуголь» А.А. Микрюкова и др. [7].

В теплотехнических службах ОАО «Евраз ЗСМК» трудятся выпускники: К.В. Размахнин, Г.В. Булычев, А.С. Козлов, А.Г. Голишев, А.С. Горбунов, А.Ю. Сюсюкин, Д.Г. Голишев, М.В. Матвеев.



Коллектив кафедры 2014 г.

В специализированной энергетической лаборатории ОАО «Евраз ЗСМК» трудятся выпускники: А.А. Кузьмин, А.А. Арапов, Г.В. Золотарев, Н.А. Полежаева, С.В. Пашинская (Романова), Н.С. Казанцева, О.А. Уварова (Кислицина), З.Н. Фейлер (Мосейкина), И.П. Кукалев, Л.А. Куергашева, Ю.Ю. Фрешер (Шнитко), Т.В. Казиминова (Азанова), И.В. Семахина, Н.А. Мельникова, И.В. Мирный.

Славная 80-летняя история становления и развития кафедры теплоэнергетики и экологии – это добросовестный, повседневный труд ее сотрудников, тех, кто трудится сейчас и кто работал на ней в прежнее время. Это: Абрамович О.С., Аникин А.Е., Афанасьев Ф.Н., Башкова М.Н., Бащенко Л.П., Брувер Р.Э., Вознесенский А.А., Воложин Я.С., Волынкина Е.П., Водолеев А.С., Воронцов В.Г., Гайко В.П., Гладких И.В., Динельт В.М., Драничников Н.А., Зайцев В.П., Иванов В.В., Каган С.М., Кореньков А.И., Коровкина Г.М., Коротков С.Г., Корочкин Е.И., Кузнецов В.В., Курганова Н.В., Легаева В.В., Ливенец В.И., Лобочева Т.Л., Логунова О.Я., Григорьева С.А., Марон В.Д., Масленников М.И., Масловский П.М., Медведская Е.В., Меджибожский М.Я., Медиокритский Е.Л., Мизгирева Е.М., Митрофанов А.Н., Михайленко А.С., Михайленко Ю.Е., Михайлец С.Н., Михайличенко Т.А., Назаров И.С., Нойкас З.В., Осипов В.Т., Павловец В.М., Павлович Л.Б., Панов Б.П., Руденков А.П., Руль Г.А., Салита В.А., Самохвалов Г.В., Семенов С.А., Сельский Б.И., Сергеев Г.В., Соловьев А.К., Спиридонов М.С., Стариков В.С., Стерлигов В.В., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В., Темлянцева Е.Н., Титова О.О., Трофимов Н.И., Труфанов В.П., Ускова Л.И., Федосеев В.С., Фишман Б.Д., Хисамутдинов Н.Е. Хузеев В.В., Черепанов К.А., Черныш Г.И., Чубейко М.В., Шадринцева Д.А., Шляров В.И., Юшкин В.В. и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Кафедра теплофизики и промышленной экологии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2000. № 8. С. 5, 6.
2. Самохвалов Г.В., Коротков С.Г. Кафедре теплофизики и промышленной экологии СибГИУ – 70 лет // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2004. Вып.13. С. 9 – 12.
3. СМИ – СибГИУ. 75 лет. Хроника. Люди. События: очерки истории СибГИУ / Н.М. Кулагин, С.М. Кулаков, В.А. Воскресенский и др. – Кемерово: Кузбасс, 2005. – 304 с.
- 4 Берлин А.Б. Сибирский металлургический институт. Дела и люди. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1992. – 224 с.
5. Сибирский государственный индустриальный университет: Страницы истории. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 160 с.
6. Якову Прокопьевичу Калугину – 70 лет // Сталь. 2007. № 6. С. 12.
7. Кафедра теплофизики и промышленной экологии СибГИУ. 75 лет в образовании и науке / СибГИУ; под. ред. М.В. Темлянцева, С.Г. Короткова, В.В. Стерлигова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. – 163 с.

УДК 378.12:544(09)

В.В. Васильев

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

**КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ТЕОРИИ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИБГИУ: СТАНОВЛЕНИЕ,  
РУКОВОДИТЕЛИ, ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ И НАУЧНЫЕ  
ДОСТИЖЕНИЯ. К 75-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ**

### *Становление кафедры*

Образование кафедры физической химии в Сибирском металлургическом институте состоялось приказом № 188 от 19 декабря 1939 года директора СМИ профессора Д.Г. Горшенина. В приказе констатируется: «На основании приказа ВКВШ при СНК СССР от 29 ноября с/г за № у/158а утвердить кафедру физической химии с включением в нее курса теории металлургических процессов». В этом 2014 году кафедре 75 лет!

*Руководители кафедры*

Хронологически кафедрой руководили следующие заведующие:

Кожеуров Владимир  
Александрович  
1939 – 1957 гг.



Воложин Яков  
Соломонович  
1957 – 1967 гг.



Воронцов Евгений  
Степанович  
14.04.67 – 01.09.67 гг.



Бурылев Борис  
Петрович  
1967 – 1970 гг.



Лаптев Дмитрий  
Мартемьянович  
1970 – 1981 гг.



Шакиров Ким  
Муртазович  
1981 – 2004 гг.



Пошевнева Анна Ивановна



2004 – 2014 гг. (до объединения с кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии)

За развитием кафедры можно проследить по количеству преподавателей:

годы	число преподавателей
1939 – 1941	2
1941 – 1944	3
1945 – 1951	4
1951 – 1952	4
1953 – 1959	6
1960 – 1968	7
1969 – 1971	11
1971 –	13

Рост числа преподавателей связан с увеличивающимся приемом студентов.

Проводилась работа по качественному развитию кафедры. Так, по инициативе зав. кафедрой профессором Б.П. Бурyleвым в 1968 году из Уральского политехнического института были приглашены трое молодых защитившихся ученых – К.М. Шакиров, А.А. Плышевский и И.Е. Добровинский. Оставались на кафедре и защитившиеся аспиранты. Максимум преподавательского состава кафедры пришелся на 1971 год и сохранялся еще некоторое время. Далее число преподавателей стало уменьшаться в силу разных причин. В 2013-2014 учебном году работало только четверо.

#### *Педагогическая и воспитательная деятельность сотрудников*

Педагогическая деятельность многогранна: это не только процесс преподавания и его совершенствование, но и занимающий особое место процесс воспитания студентов. Остановлюсь в этой связи на некоторых моментах кафедральной жизни.

Признанными мастерами преподавания физической химии в 60-х и далее годах были Дмитрий Мартемьянович Лаптев и Виктор Иванович Дубинский. Глубокое знание предмета, блестящий литературный язык, вежливое общение со студентами остались, наверное, в памяти многих. Курсы лекций этих преподавателей посещали и молодые сотрудники кафедры, постигая методиче-

ские тонкости как чтения лекций, так и глубины логики раскрытия тем. Забавно отвечал на какой-либо вопрос по работе профессор М.С. Хрущев: – «А у меня как у Димитрия Мартемьяновича». Вот так!

Кроме прочего, Д.М. Лаптев экспериментировал и с методикой преподавания, отходя от канонического изложения, что вводило в затруднение других, работающих с ним преподавателей. Но и это обстоятельство обогащало их педагогический опыт. Постепенно и они становились мастерами своего дела.

Всегда приходилось (здесь применю появившийся новый термин) *принуждать* часть студентов удовлетворительному освоению курса физической химии. В значительной мере это уходило в сферу воспитания ответственности у студентов.

В истории кафедры был такой интересный эпизод. Во время существования литейного факультета с его студентами работал В.И. Дубинский. Он был человеком бескомпромиссным и оценивал знания студентов адекватно. Успеваемость была низкой, и с деканом Василием Ивановичем Бедаревым были постоянные трения. Как я понимаю, это вынудило В.И. Дубинского работать с родителями студентов. Он стал писать родителям письма и приглашать на беседы. Какой от этого был эффект? Небольшой, и все закончилось сменой лектора, но В.И. Бедарев был недоволен и другим преподавателем. Требовательность к знаниям студентов на кафедре была всегда высокой.

Д.М. Лаптев был последовательным в стремлении к здоровому образу жизни и методично призывал студентов отказаться от курения. Все происходило на моих глазах, т.к. я, приступив к преподавательской деятельности, сел за парту и снова (как в студенчестве) в течение года прослушал полный курс его лекций. В бытность посещения общежитий этой теме посвящались специальные беседы в читальной комнате при общежитской библиотеке, где собирались приглашенные студенты и сотрудники кафедры. Может быть, кого-то это подвигло на мужественный поступок отказа от курения.

После своей научной поездки в ГДР, Д.М. Лаптев совместно с кафедрой организовал в общежитии незабываемую встречу со студентами. Подробный рассказ об увиденном, учебном процессе и студенческой немецкой жизни, с показом слайдов, вызвал неподдельный интерес у студентов.

Когда в учебных планах была выделена как категория «самостоятельная работа» со значительным числом часов, то встал вопрос о заполнении этой части работы и о контроле ее выполнения. Группа сотрудников кафедры изложила свое видение проблемы в статье сборника научных трудов «Современные вопросы теории и практики обучения в вузе». В организации планового контроля за самостоятельной работой высказали мнение, что необходимо принуждать студентов к выработке и формированию у них личной ответственности за выполнение работы или части ее к плановому сроку.

В этой связи часто приходится напоминать студентам знаменитый *первый закон Паркинсона* (опубликован в 1955 г) – *«работа заполняет время, отпущенное на нее»*. Закон не обойти. Иначе, работа требует свое время: не

затратил его – работу не сделал. Что касается студента: не усвоил учебный материал; не выполнил плановое задание.

В русской культуре еще в 1656г при царе *Алексее Михайловиче* это было записано так – «*делу время и потехе час*». Как видим, проблема давняя.

Следует отметить нетерпимость сотрудников кафедры к матерной брани. Несдержанных студентов одергиваем, не делая вида, что мы не слышим.

Меня часто спрашивают – а какие сейчас студенты? Я отвечаю – они всегда одинаковы. Одни, небольшая часть, пришли мотивированными на учебу, а другие неизвестно зачем. В полемике о проблемах высшего образования весной этого года первые оценены величиной в 5%. А на риторический вопрос: – «Что делают остальные, дан ответ – мешают учиться первым!»

#### *Методические и научные достижения. Созданные научные школы*

Методическая работа, как часть профессиональной деятельности, состоит в плановой работе по обеспечению лабораторного практикума и практических занятий. Проводится обновление методических указаний с включением в них новых работ, если появляется современное оборудование. Здесь следует отметить работу профессора Н.М. Кулагина с потенциальными спонсорами. В 2013 году его усилия увенчались помощью кафедре от Королева Николая Владимировича, директора ЗАО «Топпром». На сумму около 1мл рублей было закуплено современное оборудование для лабораторий. Техническое качество и практические результаты выполняемых работ существенно повысились. Сейчас на кафедре функционирует 15 методических указаний по лабораторному практикуму и 7 по выполнению РГР.

Создание учебно-методического комплекса по физической химии пополнилось конспектами лекций по разделам: химическая термодинамика; химическая кинетика; термодинамика растворов; поверхностные явления; электрохимия. Написан конспект лекций для УМК магистров по дисциплине «Прикладная термодинамика и кинетика». В этих конспектах обобщил свой опыт В.В. Васильев.

Научные интересы и опыт преподавания сотрудников кафедры отражены в следующих изданиях:

Термодинамика металлургических шлаков (1955г). Статистическая термодинамика (1975г). Автор В.А. Кожеуров;

Задачи и упражнения по термодинамике растворов (1965г). Химическая термодинамика. Вып.1 (1974г). Термодинамика металлургических растворов (1992г). Химическая термодинамика (2010г). Автор Д.М. Лаптев. Это последнее учебное пособие издано после ухода Дмитрия Мартемьяновича;

Кинетика гетерогенных процессов. Развернутое кинетическое уравнение быстрых обратимых гетерогенных реакций в потоке (2012г). Автор К.М. Шакиров;

Сборник задач по химической термодинамике (1974г). Сборник задач по химической кинетике (2005г). Автор В.И. Дубинский и другие сотрудники кафедры. Второй сборник издан после ухода Виктора Ивановича.

В 1968г за работу «Об устойчивости галогенидных ацидокомплексов в водных растворах» В.И. Дубинскому присуждена премия «Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева».

На кафедре в соответствующее время были созданы научные направления и школы с защитой диссертаций:

профессором **В.А. Кожеуровым** – «Статистико-термодинамические теории растворов и применение их к металлургическим шлакам и металлическим расплавам». Защищены 2 докторские и 4 кандидатские диссертации;

профессором **Д.М. Лаптевым** (при участии профессоров Н.М. Кулагина и В.Ф. Горюшкина) – «Термодинамические и физические свойства чистых хлоридов редкоземельных элементов высшей и низшей степени окисления и их бинарных расплавов  $\text{LnCl}_3 - \text{LnCl}_2$ ». Защищены 2 докторские и 5 кандидатских диссертаций;

профессором **Д.М. Лаптевым** – «Термодинамика и кинетика кремневосстановительных процессов». Защищена 1 докторская диссертация;

профессором **К.М. Шакировым** – «Физико-химическая гидродинамика в металлургии». Защищены 3 докторские и 6 кандидатских диссертаций.

доцентом **А.А. Плышевским** – «Кинетика окислительно-восстановительных процессов на графитовом и платиновом электродах в расплавленных шлаках». Защищены 2 кандидатские диссертации;

профессором **М.С. Хрущевым** – «Кинетика процессов в системе Si - O - C при производстве кремнистых сплавов».

Научная школа по галогенидам лантаноидов подняла престиж кафедры и ее создателей-ученых в научном мире. Состоялось сотрудничество с научно-исследовательскими лабораториями Института высоких температур РАН, Химфака МГУ имени М.В. Ломоносова, Института общей и неорганической химии РАН, Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Института неорганической химии СО РАН, Ивановского государственного химико-технологического университета (ИГХТУ, г. Иваново). Совместные исследования способствовали развитию фундаментальной химии и термодинамики галогенидов РЗМ (опубликовано около 50 работ в соавторстве с учеными г. Москвы и г. Иваново).

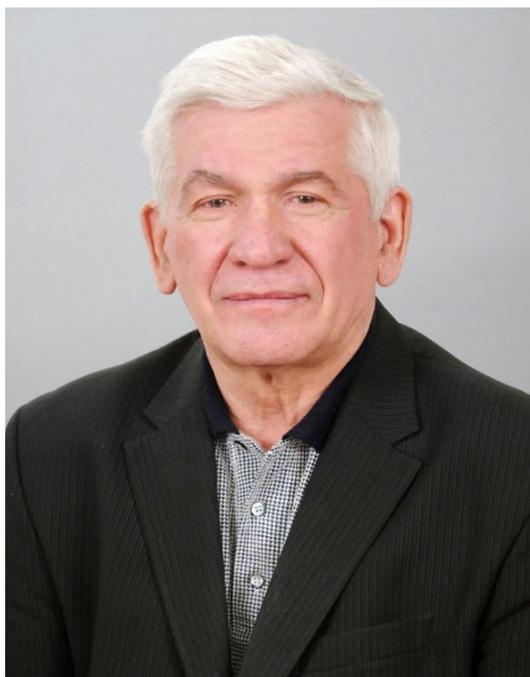
На базе собственных и литературных экспериментальных данных в СибГИУ была создана система взаимно согласованных величин стандартных энтальпий образования и стандартных энтропий кристаллических три - и дихлоридов лантаноидов. Часть, из полученных термодинамических свойств хлоридов лантаноидов, была включена в вышедший в 1978 г. восьмой выпуск справочника «Термические константы веществ» изданного АН под редакцией академика В.П. Глушко (выпуск полностью был посвящен соединениям редкоземельных металлов), а затем и в базу данных Термоцентра РАН.

Определены кристаллохимические характеристики синтезированных три - и дихлоридов лантаноидов и их соединений. Проведено рентгенографическое исследование иодидов РЗМ. Дифракционные данные и кристаллохимические свойства включены в картотеку PDF объединенного комитета по

порошковым дифракционным стандартам США. Диаграммы фазовых равновесий галогенидов лантаноидов нашли отражение в справочном издании «Gmelin Handbook of inorganic Chemistry».

По материалам исследований школы опубликовано 180 работ.

Работа сплоченного коллектива кафедры была всегда системной, продуманной, эффективной и востребованной вузом. В настоящее время, после реорганизации, преподаватели кафедры физической химии и теории металлургических процессов стали членами кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии Института металлургии и материаловедения.



Кулагин Николай Михайлович  
канд.химич.наук, профессор



Пошевнева Анна Ивановна  
канд.химич.наук, профессор



Васильев Владимир Владимирович  
канд.технич.наук, профессор



Толкунова Ирина Николаевна  
канд.технич.наук, доцент

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Сборник научных трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» подготавливается к печати Сибирским государственным индустриальным университетом совместно с отделением металлургии горно-металлургической секции РАЕН.

В сборник могут быть представлены работы по направлениям:

- металлургия черных и цветных металлов и сплавов;
- порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия;
- физика металлов и металловедение;
- экономика, управление и экология на предприятиях;
- проблемы высшего образования;
- отклики, рецензии и биографии.

Рукописи статей, оформленные в соответствии с нижеизложенными требованиями, направляются в Сибирский государственный индустриальный университет.

К рукописи прилагаются:

- разрешение ректора или проректора вуза на опубликование результатов работ;
- рекомендация соответствующей кафедры высшего учебного заведения или научного семинара академических институтов или отраслевых НИИ;
- рецензия, подготовленная специалистом, имеющим ученую степень, заверенная по месту работы рецензента,
- акт экспертизы, подтверждающей возможность опубликования работы в открытой печати;
- сведения об авторах (Ф.И.О. полностью, уч. степень, звание, вуз, служебный и домашний адрес, телефон).

Рукописи направляются в редакцию в одном экземпляре. Текст рукописи должен быть отпечатан на одной стороне стандартного листа белой бумаги формата А4 с полями 25 мм с каждой стороны. Объем статьи (включая аннотацию, иллюстрации, таблицы, библиографический список) не должен превышать 6-8 страниц машинописного текста, напечатанного через 1,5 интервала, размер шрифта 14 пт. Последнюю страницу рекомендуется занимать полностью.

Текст аннотации на русском и английском языке объемом порядка 1/4 страницы печатается через 1 интервал и помещается после заглавия статьи. Текст аннотации должен содержать только краткое описание публикуемого материала.

Иллюстрации представляются в одном экземпляре; они должны быть выполнены тушью на белой бумаге или кальке и скомпонованы на одном или двух стандартных листах формата А4 (с полным их заполнением). Размер иллюстрации (иллюстраций) вместе с наименованием, поясняющей надписью и номером не должен превышать 250×170 мм. Страницы, занятые

иллюстрациями, включают в общую нумерацию страниц.

Цифровой материал оформляется в виде таблиц, имеющих заголовки и размещаемых в тексте по мере упоминания. Не рекомендуется делить головки таблиц по диагонали и включать графу «№ п/п».

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-84: 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, название статьи, полное название журнала, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборника – фамилии и инициалы авторов, название статьи, название сборника, место издания, издательство, год издания, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, библиографическом списке фамилии авторов, название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

В начале статьи указывается индекс УДК (ББК). Название организации приводится полностью и размещается после фамилии авторов. Первая страница рукописи подписывается внизу всеми авторами статьи. Число авторов не должно превышать пяти; количество публикаций одного автора – не более двух в одном выпуске.

Для создания современного облика настоящего сборника, улучшения качества печати предусмотрен компьютерный набор. Поэтому, наряду с вышеуказанными документами и отпечатанными на бумаге статьями, в адрес редколлегии необходимо выслать дискету с текстом статьи, включая таблицы и подрисовочные подписи. Набор текстового файла осуществляется в редакторе *Microsoft Word for Windows (ver. 6.0, 7.0. 97, 2000)*. Графические объекты представляются в файлах (любого графического формата). При отсутствии такой возможности высылаются рисунки, выполненные тушью на бумаге, фотографии – в оригинале.

Сборник научных трудов реферируется в РЖ «Металлургия», зарегистрирован в Международном центре «Международной стандартной нумерации сериальных изданий (International standard serial numbering – ISSN)», ему присвоен ISSN 2073–2848. Дополнительная информация о сборнике научных трудов представлена на сайте СибГИУ <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания».

Срок представления материалов для следующего выпуска «Вестника горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» – до 1 марта 2015 г. Статьи направлять главному редактору по адресу: ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, г. Новокузнецк, Кемеровской обл., ул. Кирова, 42.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.  
Отделение металлургии**

*Сборник научных трудов*

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 10.12.2014 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 11,1 Уч.-изд.л. 11,8 Тираж 300 экз. Заказ № 767

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
Издательский центр СибГИУ