

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 32

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. 32 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2014. – 196 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 «Издательская деятельность»

Ил. 86, табл. 36, библиогр. назв. 156.

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; Темлянец 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., СПбГИУ, 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; Спиринов 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

Базайкин В.И.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Быстров В.А.	д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
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
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Протопопов Е.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РЭА, чл.-корр. МАЭН, Си- бГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Селянин И.Ф.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Якушевич Н.Ф.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	8
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ перспективных технологических схем получения железорудных окатышей методом принудительного зародышеобразования	9
<i>В.М. Павловец</i>	
Развитие структурных схем теплосилового напыления влажной шихты на железорудные окатыши.....	17
<i>А.С. Симачёв, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова</i>	
Исследование высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76Ф.....	23
<i>В.И. Базайкин, Л.А. Савина</i>	
Упругие деформации круглого вала в начале его протяжки в плоских бойках.....	28
<i>А.А. Уманский, Ю.А. Мартьянов</i>	
Моделирование процессов течения металла при прокатке в сортовых калибрах с использованием современных программных комплексов.....	33
<i>Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, Р.Е. Крюков, С.Н. Старовацкая, А.В. Роор</i>	
О возможности использования углеродфторсодержащей добавки с флюсом АН-67.....	38
<i>Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, Д.А. Титов</i>	
Влияние углеродфторсодержащей добавки в шихту порошковой проволоки на свойства наплавленного металла.....	45
<i>Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.В. Роор, С.Н. Старовацкая, В.Ф. Игушев</i>	
Влияние керамической углеродфторсодержащей добавки в составе алюминатно-основного флюса на качество сварного соединения.....	49
<i>Н.А. Козырев, Д. А. Титов, С.Н. Старовацкая, О.Е. Козырева, В.М. Шурупов</i>	
Изучение влияния введения в шихту порошковой проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС углеродфторсодержащей добавки и никеля	55
<i>И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.И. Куценко, А.А. Куценко, О.Г. Приходько</i>	
Корреляция активности с физическими свойствами сплавов железа в жидком и твердом состояниях	58
<i>И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, В.Б. Деев, А.А. Куценко</i>	
Псевдопотенциал Слэтера в координатном и обратном пространстве.....	70
<i>В.Б. Деев, К.В. Пономарева, С.А. Цецорина, В.Н. Алхимов, А.В. Прохоренко</i>	
Содержание неметаллических включений в алюминиевых сплавах при литье по газифицируемым моделям.....	77

<i>В.Б. Деев, К.В. Пономарева, С.А. Цецорина, В.Н. Алхимов, В.А. Калинин</i> Рафинирование и термовременная обработка расплавов при получении отливок из алюминиевых сплавов	80
<i>В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, К.В. Пономарева, А.С. Юдин, П.В. Ковальчук</i> Оптимальные температуры перегрева расплава при литье алюминиевых сплавов по газифицируемым моделям	86
<i>В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, К.В. Пономарева, А.С. Юдин, Р.В. Романов</i> Исследование влияния термоскоростной обработки расплава на механические свойства алюминиевых сплавов, изготовленных методом ЛГМ	90
<i>В.Б. Деев, А.С. Юдин, К.В. Пономарева, С.А. Цецорина, В.Н. Алхимов</i> Влияние способа формовки на качество алюминиевых сплавов, изготовленных методом ЛГМ	94
<i>В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко, А.П. Подольский, А.А. Рыбушкин</i> Вихревая форсунка внешнего смешения для сжигания вязкого топлива	98
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	106
<i>И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский</i> Гальванические композиционные покрытия цинк – диборид хрома: электроосаждение и свойства	107
<i>О.А. Полях, В.В. Руднева, Н.Ф. Якушевич, Г.В. Галевский</i> Производство микро- и нанопорошка карбида кремния на основе техногенного микр кремнезёма.....	113
<i>А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева</i> Плазменный синтез карбида титана: научное обоснование, технология, экономическая оценка	122
<i>А.К. Гарбузова, В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Л.С. Ширяева</i> Термодинамическое моделирование процессов плазменного синтеза карбида титана	137
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	146
<i>В.Н. Цвигун, С.А. Куклин, Н.В. Козлов</i> Установки для изучения износо- и трещиностойкости материалов на миниобразцах.	147
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ...	155
<i>В.А. Быстров, Е.С. Вуцан, П.К. Дьяков, Т.Н. Борисова</i> Управление инновационными потоками металлургического предприятия	156
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ	163
<i>Е.П. Волынкина, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, Г.В. Галевский</i> Развитие экологического образования в СибГИУ	164

Т.А. Михайличенко, О.Б. Громова

Блиц-игра как форма интерактивного занятия для контроля сформированности компетенций 180

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ 185

А.М. Анасов, Ч.В. Едешева

Большая руда Бакчара..... 186

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ 195

ПРЕДИСЛОВИЕ

32-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, Московского государственного машиностроительного университета, Юргинского технологического института (филиала) НИ ТПУ, 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 рельсовой стали, влияния различных флюсов и добавок на качество и свойства сварных соединений, синтеза порошковых материалов в плазменном потоке.

Редакционная коллегия благодарит авторов за предоставленные материалы и приглашает принять участие в очередном 33-м выпуске сборника научных трудов.

**МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
И СПЛАВОВ**

В.М. Павловец

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

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ МЕТОДОМ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ

Проанализированы перспективные технологические схемы получения железорудных окатышей методом принудительного зародышеобразования.

Analysis of prospective techno-logical schemes of iron ore pellets by the method of forced nucleation.

Процесс получения сырых окатышей на окомкователе по технологии ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование) включает формирование зародышей методом принудительного зародышеобразования и их доокомкование до окатышей кондиционных размеров. Метод принудительного зародышеобразования предполагает формирование регламентированной двухслойной структуры окатышей на одном устройстве и комплексное управление процессом окомкования за счет организации струйного теплосилового воздействия на сырую шихту в рабочем пространстве окомкователя. Принудительное зародышеобразование опирается на формообразование влажной шихты, осуществляемое теплосиловым напылением материала сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж окомкователя в виде напыленного слоя шихты (НС), с последующим делением НС на зародыши в холостой зоне окомкователя независимо от процессов, протекающих в слое комкуемых материалов [1-3] (рисунок 1). Зародыши, полученные по этой технологии, являются шихтовой матрицей для формирования оболочки окатышей традиционным методом доокомкования, основанного на перекате материала по поверхности шихтового гарнисажа (ШГ) в рабочей зоне окомкователя. В этой технологической схеме от параметров напыления, характеристик напыленного слоя (коэффициент напыления, диаметр и высота) и зародышей (прочность, плотность, влажность) зависят металлургические свойства окатышей и производительность окомкователя и всего технологического передела.

Перспективные схемы формирования напыленного слоя на гарнисаже окомкователя (на схеме показаны делители НС) представлены на рисунке 2.

Схемы деления напыленного слоя на зародыши представлены на рисунке 3. Работоспособность и результативность каждой технической схемы опробована экспериментально в лабораторных условиях. Для сопоставимости результатов исследования опыты проводили на тарельчатом окомкователе (диам. 0,62 м, $\gamma = 45^\circ$, $n = 12$ об/мин) со струйным аппаратом ($d_{ca} = 0,02$ м,

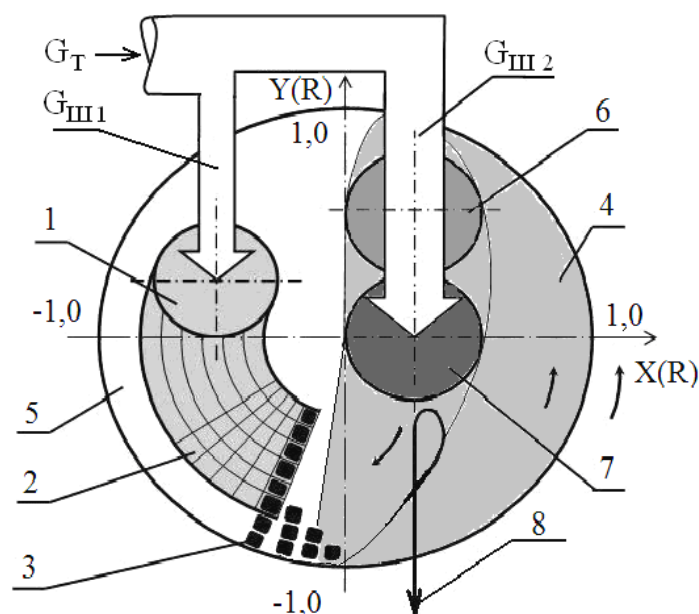


Рисунок 1 – Схема получения окатышей способом принудительного зародышеобразования

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

$G_{ш} = 0,03 - 0,04$ кг/с, $P_B = 0,2$ МПа, $V_B = 0,6$ м³/мин.), работающем на влажной шихте ($W_{ш1} = 8,20$ %, $d_{ч} = 0,068$ мм, 1 % бентонита) массой садки 5 кг, которая напылялась в течение 160 с на ШГ толщиной 30 мм ($\rho_{шг} = 2230$ кг/м³, $W_{шг} = 8,14$ %) в холостой зоне тарелки с расстояния $L = 0,5$ м при $\Theta_L = 25$ ($\Theta_L = L/d_{ca}$). Для многоструйных технических схем (рисунок 2 в, г) использовали три СА diam. 0,02 м при том же расходе шихты и заданных первоначальных условиях. Для технических схем рисунка 2 определяли коэффициент напыления (K , %), диаметр ($d_{нс}$, м) и высоту НС на его оси (h_o , м). Для определения плотности (ρ , кг/м³), прочности (Π , кПа) и влажности (W , %) НС по его сечению брали образцы методом режущих колец. Методика отбора проб подробно изложена в источниках [1-3]. В ходе экспериментов оценивали равномерность структурных и прочностных свойств НС по его сечению, стабильность работы устройства по налипаемости шихты на рабочие поверхности.

Для каждой технологической схемы были выполнены три эксперимента, что позволило получить интервалы анализируемых величин. Результаты опытов представлены в безразмерном виде (таблица 1).

Аналогичные исходные условия по режиму напыления и формированию НС ($L/d_{ca} = 25$, $L = 0,5$ м) использовали для анализа технических схем, служащих для деления НС на зародыши (рисунок 3). Работоспособность схем оценивали по фракционному составу и прочности зародышей. Стабильность работы технических устройств и сложность технической схемы определяли по склонности шихты к налипанию на узлы делителей. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

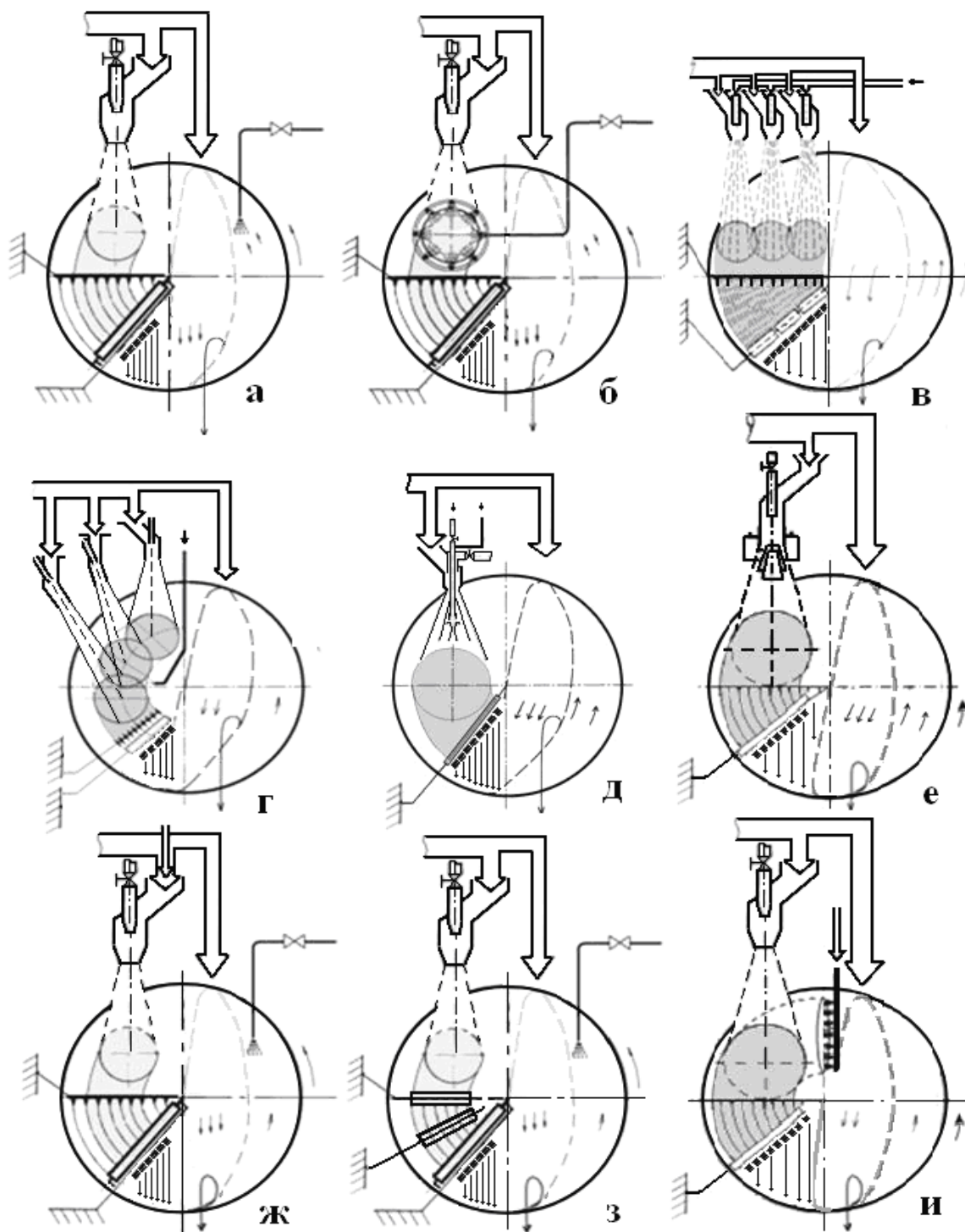


Рисунок 2 – Перспективные схемы формирования напыленного слоя шихты на гарнисаже окомкователя

Схемы формирования НС : а – одной ВШС (патенты РФ №2327750, 2356951), б – тоже с увлажнением зоны напыления (патент РФ №2484150), в – несколькими ВШС с наложением НС по радиусу (патент РФ №2418868), г – тоже с наложением НС по дуге (патент РФ №2464328), д – одной ВШС с вспомогательным потоком воздуха (патент РФ №2294971), е – одной ВШС с отклоняющими насадками на пути ВШС (патент РФ №2430167), ж – ВШС с порообразующими, связующими и прочими добавками (патенты РФ №2377323, 2402619, 2423533), з – дополнительное уплотнение НС вращающимися барабанами (патент РФ №2385351), и – увлажнение ШГ (патент РФ №2430167)

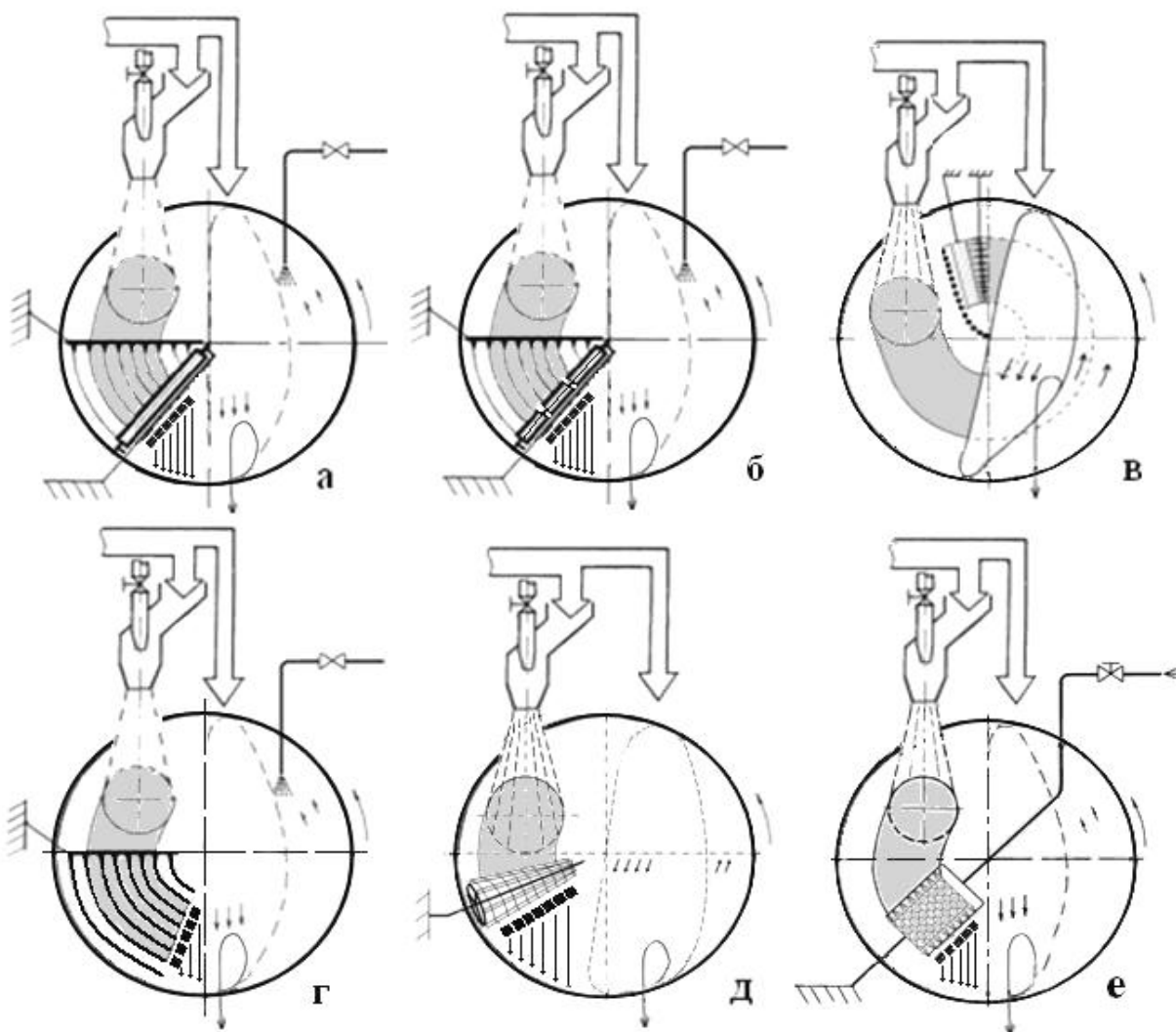


Рисунок 3 – Перспективные схемы деления напыленного слоя шихты на зародыши на гарнисаже окомкователя

Схемы деления напыленного слоя шихты на зародыши: а – продольными пластинчатыми ножами и вращающимся барабаном с поперечными ребрами (патент РФ №2356951), б – тоже составными вращающимися барабанами (патент РФ №2418868), в – деление НС продольными пластинчатыми ножами и вращающимся барабаном с поперечными ребрами на выходе из слоя комкуемых материалов (патент РФ №2453613), г – плужковыми делителями (патент РФ №2327750), д – одним коническим барабаном, снабженным металлической струной (патент РФ №2433194), е – цилиндрическим барабаном, снабженным ребрами с полукруглыми ячейками (патент РФ №2487954), с непосредственным увлажнением ребер барабана

Таблица 1 – Характеристики различных способов напыления шихты на шихтовый гарнисаж окомкователя

Номер схемы на рисунке 2	Геометрические, структурные и прочностные характеристики напыленного слоя шихты					
	К, %	d_{nc} / d_{ca}	d_{nc} / h_o	ρ_o / ρ_{cp}	$W_{cp} / W_{ш}$	Π_{cp} / Π_o
а	80-90	10-11	20-21	0,82-0,84	0,96-0,97	0,82-0,84
б	95-96	11-12	21-22	0,84-0,86	0,98-1,12	0,84-0,86
в	82-90	28-30	94-98	0,90-0,92	0,96-0,98	0,90-0,92
г	82-90	11-12	21-22	0,83-0,85	0,96-0,97	0,83-0,85
д	82-90	14-15	58-60	0,92-0,93	0,96-0,97	0,92-0,93
е	82-90	14-16	58-62	0,92-0,93	0,96-0,97	0,92-0,93
ж	80-90	10-11	20-21	0,82-0,84	0,96-0,97	0,82-0,84
з	80-90	11-12	22-24	0,92-0,95	0,96-0,97	0,92-0,95
и	92-94	11-12	21-22	0,82-0,84	0,96-0,97	0,82-0,84

Схема формирования напыленного слоя, показанная на рисунке 2, а, относится к базовой схеме для сравнения, которая опирается на работу СА, напыляющего предварительно подготовленную влажную шихту на неподготовленный ШГ. Схема, показанная на рисунке 2, б, отличается от базовой интенсивным увлажнением зоны напыления и поверхности НС, что позволяет увеличить К до 95–96 %, повысить плотность, прочность и геометрические размеры НС. Однако переувлажнение НС до $W_{nc} = (0,98-1,12)W_{ш}$, и, соответственно, зародышей, увеличивает продолжительность последующей сушки окатышей, слабо влияя на равномерность структурных свойств НС. Схема, показанная на рисунке 2, в, позволяет повысить равномерность структурных и прочностных свойств НС за счет наложения друг на друга граничных ($\delta=1,0-0,8$)

Таблица 2 – Характеристика различных способов деления напыленного слоя шихты на зародыши (база для исследования – напыленный слой, полученный по схеме одноструйного напыления (рисунок 2, а), $L/d_{ca}=25$, $d_{nc}=0,2$ м, $d_{ч}=0,068$ мм)

Схема на рисунке 3	Фракционный состав зародышей, мм						Прочность зародышей, кПа	Налипаемость шихты на поверхность делителей, %
	0-2	2-4	4-6	6-10	>10	Средний размер		
а	34,1	18,8	18,2	28,1	0,8	4,34	95-105	1,11 - 1,28
б	32,5	18,5	20,2	28,4	0,4	4,21	97-110	1,12 - 1,15
в	33,2	19,5	20,5	26,2	0,6	4,09	108-115	0,95 - 1,15
г	43,4	22,6	15,4	10,4	8,2	2,71	93-102	1,66 - 1,85
д	26,1	18,6	24,6	30,2	0,5	4,51	94-106	0,05 - 0,08
е	25,4	19,3	25,4	29,9	0,0	4,49	97-105	0,10 - 0,13

Примечание. Налипание шихты определяли по отношению массы шихты, оставшейся на рабочей поверхности делителей после 10 минут работы окомкователя, к массе шихты, напыляемой струйным аппаратом на ШГ, %.

зон НС, обладающих низкими структурными свойствами. Размеры комбинированного НС существенно выше и зависят от числа СА. Схема, показанная на рисунке 2, в, отличается от базовой последовательным напылением шихты тремя СА, что увеличивает примерно в три раза длительность силового воздействия ВШС на НС, что повышает прочность и плотность НС на 10–15 %, интенсифицирует влагоудаление из НС, оставляя равномерность свойств на базовом уровне. Следует заметить, что многоструйные схемы технически более сложные по сравнению с одноструйной базовой. Схема, приведенная на рисунке 2, д, направлена на повышение равномерности НС одним СА, работающим на вспомогательном воздухе, подаваемом по оси СА. К достоинствам этой схемы относится увеличение геометрических размеров НС из-за возрастания угла раскрытия струи до 30° , а к недостаткам – более низкие прочностные свойства НС вследствие снижения давления ВШС. Схема, приведенная на рисунке 2, е, позволяет получить НС с характеристиками, близкими предыдущей схеме за счет отклоняющих механических устройств, расположенных на пути ВШС. У этой схемы аналогичные недостатки: более низкие прочность и плотность НС, снижение давления ВШС механическими устройствами. Для выполнения отклоняющих устройств требуются материалы с высокой износостойкостью и с низкой налипающей способностью. Схема, показанная на рисунке 2, ж, отличается от базовой схемы возможностью подачи в ВШС вспомогательного материала (порообразующих, топливных, минеральных, флюсующих и других добавок). Поэтому при небольшом количестве добавок (менее 1 %) геометрические и прочностные характеристики остаются на базовом уровне. При большем количестве добавок физические свойства НС будут зависеть от вида вводимого в шихту материала и его количества. Схема, показанная на рисунке 2, з, основана на дополнительной упрочняющей и профилирующей (выравнивающей по высоте) нагрузке, формируемой с помощью вращающихся барабанов, установленных на поверхности НС. Эта схема позволяет повысить прочность НС и равномерность его геометрических размеров, но технически более сложна и отличается повышенной налипаемостью шихты на металлические барабаны, что требует периодической очистки или применения гидрофобного покрытия на их поверхности. Схема, показанная на рисунке 2, и, отличается от базового решения предварительным увлажнением ШГ перед напылением и по технической сущности и полученным результатам близка схеме, приведенной на рисунке 2, б.

Эксперименты показали неоднозначность полученных результатов. В частности, для улучшения равномерности свойств НС целесообразно рекомендовать технические схемы, приведенные на рисунках 2, в и 2, з. Для повышения максимальных значений плотности, прочности и коэффициента напыления следует использовать схемы, реализованные с использованием более интенсивного увлажнения зоны напыления (рисунок 2, б) или шихтового гарнисажа перед напылением (рисунок 2, и).

Характеристика экспериментально опробованных технических схем деления напыленного слоя на зародыши, приведенная в таблице 2, опирается на

фракционный состав зародышей и сложность технической схемы по налипаемости шихты на рабочие поверхности делителей. Следует отметить, что опытные схемы «а – д» (рисунок 3) позволяют получить на выходе из ячеек делителя зародыши в виде сферопрзмы размерами 10×10 мм и высотой 5–12 мм (высота НС). Схема «е» позволяет получить таблетированные зародыши диаметром 8–10 мм и такой же высоты. Однако различные условия деления НС и последующего переката зародышей приводят, как отмечено выше, к их частичному разрушению и изменению фракционного состава материалов. При этом, как видно из таблицы 2, средний размер зародышей уменьшается до 4,09 – 4,51 мм. Колебания прочности зародышей в форме сферокуба с размером граней 10 мм при этом сравнительно невысоки. В большей степени подвержена изменению стабильность работы делителей по причине налипания шихты на рабочие поверхности делителей и забивание шихтой делительных ячеек. Схема, показанная на рисунке 3, а (базовая для сравнения), основана на применении металлических пластинчатых ножей, покрытых бакелитовым лаком, и вращающегося цилиндрического барабана с продольными ребрами. Эта схема отличается от схемы, приведенной на рисунке 2, а, наличием сквозных отверстий в ножах и ребрах делителей, уменьшающих налипаемость шихты на их поверхности, оставляя практически неизменным фракционный состав зародышей. Схема, приведенная на рисунке 3, б, отличается от базовой схемы деления наличием составных барабанов для поперечного деления НС, позволяющих учесть различие в окружных скоростях НС, что облегчает деление НС и приводит к повышению прочности зародышей на 5 %, что снижает содержание мелочи до 33,2 % и уменьшает налипаемость шихты на рабочие поверхности барабана. Схема, показанная на рисунке 3, в, позволяет обеспечить деление НС на выходе из слоя комкуемых материалов и дает возможность существенно (на 8–15 %) повысить прочность зародышей при достаточно равномерном фракционном составе. Работа окомкователя по схеме, показанной на рисунке 3, г, позволяющая делить НС криволинейными плужковыми делителями, дает возможность получать зародыши в большом диапазоне размеров, включая большое количество мелочи фракции 0 – 2 мм (43,4 %) и крупных кусков, размером более 10 мм. К недостаткам этой схемы относится повышенное налипание шихты на металлические делители из-за их большой длины и криволинейности поверхности, что затрудняет их очистку. К достоинствам этой схемы относится простота конструктивной схемы исполнения плужковых делителей. В схеме, показанной на рисунке 3, д, в качестве рабочего делительного органа используется тонкая металлическая струна, натянутая на конический барабан, которая одновременно выполняет функции продольного и поперечного деления НС и дает возможность существенно снизить усилия, прикладываемые к НС при его делении. Эта схема позволяет получить зародыши с наиболее равномерным фракционным составом и минимальным содержанием мелочи и характеризуется наименьшим налипанием шихты на рабочие органы делителя. Сложность этой схемы заключается в трудности натяжения металлической струны на барабан и в обеспечении ста-

бильного расстояния между соседними струнами. В схеме деления НС, приведенной на рисунке 3, е, в качестве делителя используется вращающийся цилиндрический барабан с волнообразными ребрами, позволяющими вырезать из НС зародыши таблетированной формы, которые обладают меньшей разрушаемостью и более высокой способностью к перекату в слое комкуемых материалов. Повышенная налипаемость шихты устраняется интенсивным увлажнением ребер барабана водой перед непосредственным делением НС на зародыши. К недостаткам этой схемы можно отнести повышенную влажность зародышей, что, безусловно, интенсифицирует процесс последующего доокомкования зародышей, но устраняет одно из преимуществ технологии ЗНД – получение окатышей с пониженным содержанием влаги в центральной части окатыша.

Можно заключить, что по критерию равномерности фракционного состава все опытные схемы (за исключением схемы «г») дают близкий результат. По уровню стабильности работы делителей НС наиболее высокие показатели дает схема «а», которую можно дополнить операцией равномерного увлажнения рабочих поверхностей поперечных ребер барабана, характерной для схемы «е».

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.

В.М. Павловец

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

РАЗВИТИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ТЕПЛОСИЛОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ВЛАЖНОЙ ШИХТЫ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ОКАТЫШИ

Проанализированы перспективные схемы теплосилового напыления влажной шихты на железорудные окатыши.

In the article the principles of the technological scheme of forced nucleation during the production of iron ore pellets.

В рамках расширения функциональных возможностей агрегатов для производства окучкованного сырья на окомкователе организовано формирование регламентированной двухслойной структуры окатышей на одном устройстве за счет организации струйного теплосилового воздействия на слой комкующихся материалов в рабочем пространстве окомкователя. Это позволяет воздействовать на структурно-прочностные характеристики оболочки окатышей и улучшить металлургические свойства железорудного сырья [1–3]. При напылении влажной шихты на комкуемые материалы в рабочей зоне окомкователя возможно напыление шихты на окатыши нисходящего слоя и на окатыши восходящего слоя материалов (рисунок 1). Схема формирования напыленного слоя шихты на отдельном окатыше в нисходящем слое материалов (первая схема) для технологии ЗОН показана на рисунке 2, а. Схема формирования напыленного слоя шихты на отдельном окатыше в восходящем слое материалов (вторая схема) для технологии ЗОН показана на рисунке 2, б. На рисунке 2, в, г – показаны схемы формирования напыленного слоя шихты по технологии ЗОНД. Технология получения окатышей по схеме ЗОНД (зародышеобразование окомкованием, напыление и доокомкование) предполагает операцию доокомкования, а схема ЗОН – исключает операцию доокомкования [3]. Для организации воздушно-шихтовой струи (ВШС) по схеме ЗОН и ЗОНД из загружаемой шихты G_T ($G_T = G_{ш1} + G_{ш2}$, где G_T – производительность окомкователя, т/ч) поток $G_{ш1}$ поступает к струйному аппарату (СА), ориентированному на слой комкуемых материалов. Остальная часть шихты с расходом $G_{ш2}$ ($G_{ш2} = G_T - G_{ш1}$) загружается в окомкователь свободно падающей шихтой (СПШ) в нижнюю часть холостой зоны тарели.

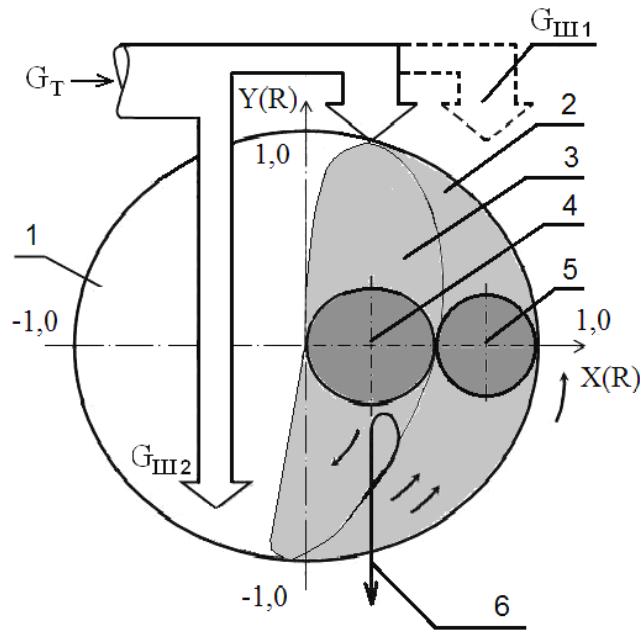


Рисунок 1 – Схема получения окатышей способом напыления шихты на слой комкующихся материалов

1 – окомкователь; 2 – восходящий слой материалов; 3 – нисходящий слой материалов; 4, 5 – области напыления в нисходящем и в восходящем слое материалов, соответственно; 6 – годные окатыши

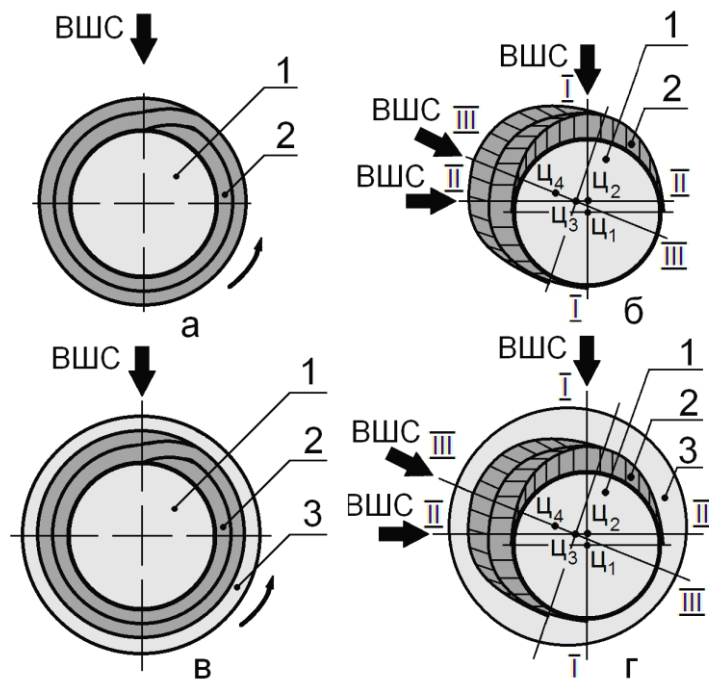


Рисунок 2 – Схема получения окатышей по технологии ЗОН (а, б) и по технологии ЗОНД (в, г) напылением шихты на окатыши нисходящего (а, в) и восходящего (б, г) слоя материалов

1 – напыляемые окатыши; 2 – напыленный слой; 3 – оболочка окатышей; ВШС – воздушно-шихтовая струя

По первой схеме (рисунок 2, а) напыление идет на вращающиеся окатыши, на поверхности которых формируется непрерывная многослойная кольцевая оболочка в зоне раскрытия воздушно-шихтовой струи (ВШС). По второй схеме напыление шихты идет на невращающийся окатыш восходящего слоя, который совершает поступательное движение в зоне действия ВШС. При этом напыленный слой имеет форму своеобразной шапки, расположение которой меняется в зависимости от положения окатыша, у которого в процессе напыления смещается центр тяжести. На рисунке 2, б положение центров тяжести обозначено буквами Ц₁, Ц₂, Ц₃, а оси I, II, III совпадают с направлением напыления шихты ВШС. Указанные особенности напыления накладывают отпечаток на процесс получения окатышей по каждой технологической схеме, показанной на рисунке 3.

Целью настоящей работы было исследование и анализ параметров работы различных технологических схем напыления влажной шихты на железорудные окатыши, комкующиеся в рабочей зоне окомкователя.

Работоспособность и результативность каждой технической схемы опробована экспериментально в лабораторных условиях. Для сопоставимости результатов исследования опыты проводили на тарельчатом окомкователе (диам. 0,62 м, $\gamma = 45^\circ$, $n = 12$ об/мин) со струйным аппаратом ($d_{ca} = 0,02$ м, $G_{ш} = 0,03\text{--}0,04$ кг/с, $P_b = 0,2$ МПа, $V_b = 0,6$ м³/мин, $\mu = 10$), работающем на влажной шихте ($W_{ш1} = 8,20$ %, $d_{ч} = 0,068$ мм, 1 % бентонита) массой садки 5 кг, которая напылялась в течение 140 с на слой окатышей диам. 8–10 мм ($\rho_{ок} = 2930\text{--}2980$ кг/м³, $P_{ок} = 5,56$ Н/окат., $W_{ок} = 8,14$ %) массой 10 кг в рабочей зоне тарели при $\Theta_L = 15$. Для многоструйной технической схемы (рисунок 3, в) использовали три СА диам. 0,02 м при том же общем расходе шихты и первоначальных условиях. В процессе экспериментов определяли коэффициент напыления (K , %), оценивали диаметр ($d_{нс}$, м) и высоту НС на его оси (h_o , м), фракционный состав окатышей. Плотность (ρ , кг/м³), прочность (Π , кПа) и влажность (W , %) кондиционных окатышей диам. 14–16 мм после напыления определяли по известной методике [1–3]. В ходе экспериментов оценивали стабильность работы устройства по наличию выбросов шихты и окатышей из рабочего пространства окомкователя и сложность технической схемы. Для каждой технологической схемы были выполнены три эксперимента, что позволило получить интервалы анализируемых величин. Для упрощения анализа результаты опытов представлены в безразмерном виде (таблица 1).

Схема, приведенная на рисунке 3, а, работает на принципе напыления влажной шихты на окатыши нисходящего слоя, выполняющих функцию напыляемой основы или зародышей. Главный недостаток этой схемы – повышенная деформируемость нисходящего слоя и раздув (выброс) окатышей из рабочей зоны, в результате чего часть шихты (20–25 %) напыляется на ШГ окомкователя, а другая часть шихты отскакивает от вращающейся поверхности окатышей и величина K не превышает 55 %.

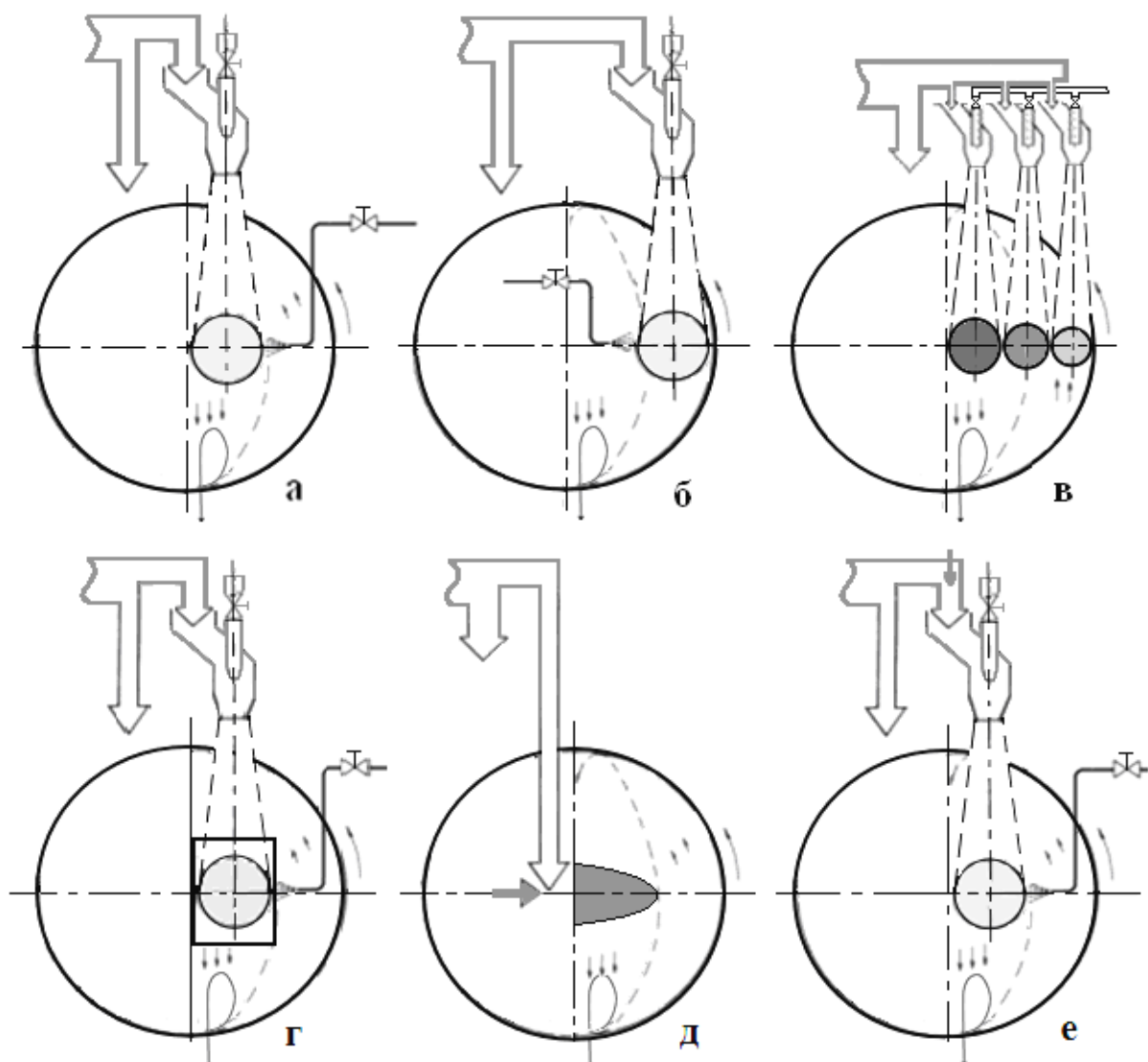


Рисунок 3 – Перспективные схемы напыления влажной шихты на комкующиеся материалы в рабочей зоне окомкователя

Схемы напыления шихты на комкующиеся материалы: а – одной ВШС на комкующиеся материалы в нисходящем слое материалов с увлажнением зоны напыления (патент РФ №2294971), б – тоже в восходящем слое материалов с заданным давлением ВШС (патент РФ №2225888), в – несколькими ВШС с расходом шихты, зависящим от скорости движения окатышей (патент РФ №2270875), г – одной ВШС, ориентированной на эластичный экран, расположенный на слое материалов (патент РФ №2343214), д – одной ВШС с боковой ориентацией к нисходящему слою (патент РФ №2309995), е – одной ВШС, содержащей порообразующие добавки (патент РФ №2280085)

Уменьшить этот недостаток можно более интенсивным увлажнением зоны напыления и снижением давления ВШС, но в этом случае плотность и прочность напыленной оболочки и всего окатыша снижаются. Схема, приведенная на рисунке 3, б, лишена этого недостатка, поскольку восходящий слой более плотный и преимущественно состоит из наиболее крупных окатышей, раздув которых потоком воздуха затруднен.

Таблица 1 – Характеристика различных способов напыления шихты на комкующиеся материалы (окатыши диам. 8–10 мм, $W_{ок} = 8,14 \%$, $\Pi_{ок} = 5-6$ Н/окат., $L/d_{ca} = 15$; $\mu = 10$)

Схема на рисунке 3	Характеристика напыленного слоя и окатышей							Сложность технической схемы
	Фракционный состав для окатышей диаметром			K, %	$\Pi/\Pi_{ок}$	$\rho/\rho_{ок}$	$W / W_{ок}$	
	10-12	12-14	14-16					
а	82	18	0	55	-	-	-	Не требует сложного оборудования
б	76	16	8	92	2,0-2,2	1,06-1,18	0,95-0,96	Тоже
в	48	28	24	98	2,0-2,1	1,05-1,16	0,96-0,98	Требует расходного распределителя шихты
г	85	15	0	-	2,2-2,3	1,14-1,19	1,0-1,02	Не требует сложного оборудования
д	74	24	2	82	1,8-1,9	1,03-1,06	0,95-0,96	Требует координатного устройства
е	64	29	14	95	2,1-2,2	1,12-1,15	1,03-1,05	Требует тракта подачи порообразователя
Примечание. Значение Π , ρ , W определяли для напыленных окатышей диаметром 14–16 мм								

Поскольку окатыши восходящего слоя в меньшей степени подвержены раздуву, то напыление на их поверхность позволяет увеличить рост массы окатышей, их прочность, плотность и обеспечить частичное влагоудаление из оболочки окатышей. Регламентированное давление ВШС позволяет сформировать в слое воздушную полость оптимальных размеров и исключить выброс окатышей. Достоинством этой схемы напыления является простота аппаратного оформления. Недостаток схемы – малая площадь напыления и низкая скорость окатышей восходящего слоя, что ограничивает расход шихты некоторым пределом, поскольку окатыши способны расти от заданного размера (8–10 мм) до предельного диаметра, равного 14–16 мм. Следующая схема (рисунок 3, в), отличающаяся многоструйным напылением шихты и учитывающая скорость напыляемых окатышей и их размер, позволяет увеличить площадь напыления примерно в 1,3–1,5 раза и оптимизировать скорость роста массы окатышей и их прочностные характеристики в зависимости от поступательной скорости окатышей. Однако трехпоточная схема подачи шихты в СА с регулируемым расходом достаточно сложна на практике. Подача ВШС на эластичную ленту (рисунок 3, г) позволят организовать процесс окомкования с внешним пригрузом слоя окатышей, но при этом полностью исключено напыление шихты на окатыши и взаимодействие воздуха со слоем. Вместе с

этим, схема позволяет использовать ВШС с высоким (максимальным) давлением, не приводя к формированию глубокой воздушной полости и выбросам окатышей из слоя. Это дает возможность в максимальной степени повысить прочность и плотность окатышей и не требует сложного оборудования. Боковая ориентация ВШС к нисходящему слою (рисунок 3, д) повышает площадь напыления и формирует дополнительную боковую нагрузку, позволяя при этом уплотнить окатыши слоя и уменьшить раздув материалов. К недостаткам этой схемы можно отнести низкое давление ВШС, ориентированной под углом к поверхности слоя, что снижает характеристики окатышей, и формирует частичное напыление материала на ШГ, что уменьшает коэффициент напыления до 82 %. Использование порообразующих добавок, как правило, требует увлажнения зоны напыления (рисунок 3, е) для увеличения К, например, до 90–95 %. К недостатку этого метода напыления можно отнести местное переувлажнение ($W/W_{ок}=1,03-1,05$) слоя окатышей. Отсутствие дополнительного увлажнения в этой схеме с применением, например, угольной мелочи может снизить К до 50–70 % в зависимости от содержания порообразователя.

Как видно из полученных результатов, все опробованные способы напыления шихты на комкующиеся материалы сравнительно просты в конструктивном исполнении и позволяют получать окатыши достаточно высокой прочности, с низким влагосодержанием, обеспечивая им высокую скорость роста массы (схемы «б», «в», «е»). Желание в еще большей степени улучшить эти характеристики наталкивается на ограничения по раздуву слоя и выбросы окатышей из рабочей зоны. Устранив отмеченные недостатки (схема «г»), можно потерять преимущества в скорости роста массы окатышей и в пониженном влагосодержании окатышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Напыление влажной шихты на железорудные окатыши / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2003. – № 12. – С. 7 – 11.
2. Павловец В.М. исследование структурных характеристик шихтового покрытия, напыленного на поверхность железорудных материалов / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 4. – С. 7 – 12.
3. Павловец В.М. Сравнение способов получения комбинированных окатышей путем напыления шихты низкотемпературными струями сжатого воздуха / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 11 – 17.

УДК 669.017:539.2:[669.14.018.294.2]

А.С. Симачёв, М.В. Темлянцев, Т.Н. Осколкова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ Э76Ф

В статье представлены результаты исследования высокотемпературной пластичности рельсовой стали марки Э76Ф в диапазоне температур 950 – 1250 °С. Установлено, что наибольшее значение пластичности соответствует температуре 1150 °С.

In the article the outcomes of research of high-temperature plasticity of rail steel of the mark Э76Ф in range of temperatures 950 – 1250 °С are shown. It is established, that the greatest value of plasticity meets to temperature 1150 °С.

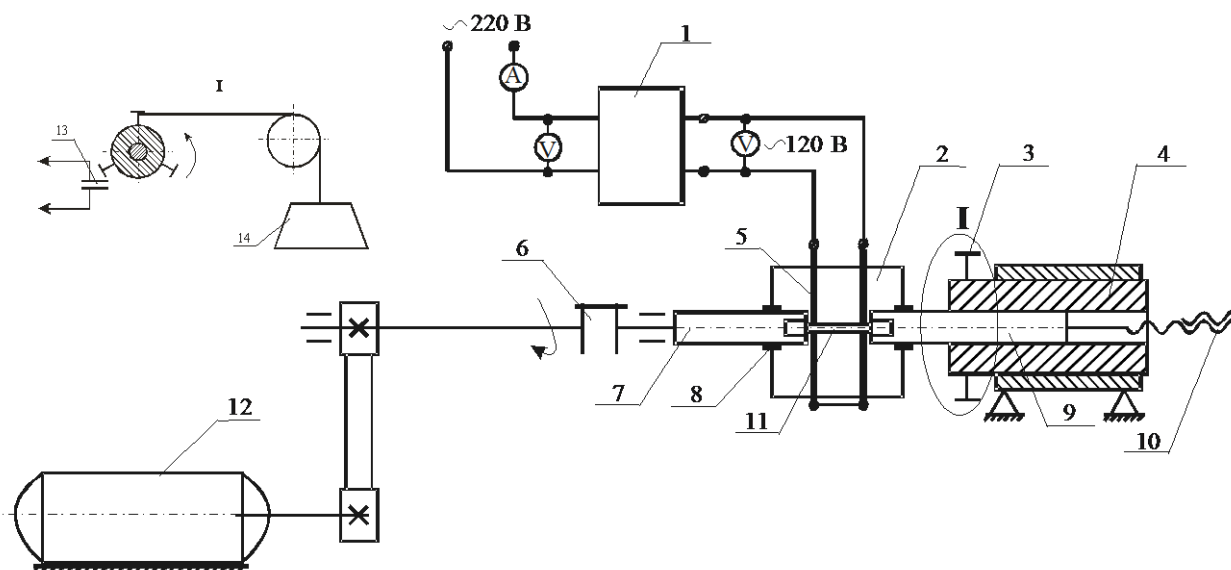
При обработке давлением пластичность стали является одной из наиболее важных характеристик, предопределяющих режимы деформации и качество готовой металлопродукции. Помимо традиционных параметров, таких как химический состав стали, температура, скорость деформации, напряженное состояние и история нагружения, пластичность весьма чувствительна к структуре стали и некоторым факторам, которые связаны с особенностями выплавки, внепечной обработки, раскисления и разлива стали [1]. В связи с этим даже стали одинакового химического состава, выплавленные в конвертере и дуговой сталеплавильной печи, модифицированные разными элементами при прочих равных условиях могут иметь различную пластичность. Характерно, что металл корковой и осевой зоны одного слитка или непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) также имеет различную пластичность. Эти особенности пластичности объясняются морфологией и фазовым составом неметаллических включений, наличием ликваций, осевой пористости и неоднородностью химического состава слитка и целым рядом других факторов. Все перечисленные обстоятельства приводят к тому, что для оптимизации и рационализации температурных и деформационных режимов прокатки стали, требуются максимального достоверные сведения о пластичности стали конкретного текущего производства с его особенностями и нюансами.

Исследованию пластичности рельсовой стали посвящено относительно мало работ. В частности, в работе [2] представлены результаты исследования пластичности методом горячего скручивания мартеновской рельсовой стали марок М75 и М76, разлитой в изложницы, влияния на нее вида и расхода раскислителя. Установлено, что для литого металла пластичность ниже, чем для катанного, интервал максимальной пластичности соответствует температурам 1050 – 1150 °С. По данным работы [3], методом испытаний на осадку уста-

новлено, что при температурах нагрева до 1200 °С признаки перегрева на образцах рельсовой стали отсутствуют полностью. При 1250 °С наблюдаются первые признаки перегрева, однако, при осадке на 1/3 цилиндрических образцов диам. 25 и высотой 50 мм, нагретых до 1250 – 1300 °С, надрывов и разрывов металла не происходило. Нагрев до 1350 °С и осадка на 1/3 высоты приводят к образованию незначительных надрывов. Авторы работы [3] считают, что в интервале 900 – 1300 °С рельсовая сталь, разлитая в слитки или на машине непрерывного литья заготовок, имеет удовлетворительную пластичность.

За последние 10 лет в технологии производства рельсов, нагрева и прокатки рельсовой стали произошли значительные изменения [4, 5] в связи с этим назрела актуальность исследования пластичности рельсовой стали Э76Ф, микролегированной ванадием и азотом текущего производства.

В данной работе проведены исследования пластичности рельсовой стали марки Э76Ф, химический состав которой соответствует ГОСТ 51685 – 2000. Образцы для исследований вырезали из НЛЗ одной плавки из трёх зон по сечению (корковая зона, зона столбчатых кристаллов и осевая зона равноосных кристаллов) заготовки. Испытания на высокотемпературное кручение проводили по ГОСТ 3565 – 80 при температурах 950, 1050, 1150, 1250 °С. Время выдержки образцов при постоянной температуре составляло 5, 10 и 15 мин. Эксперименты проводили на установке, схема которой представлена на рисунке 1.



- 1 – трансформатор; 2 – печь; 3 – стопорный винт; 4 – корпус для неподвижного вала; 5 – силитовые нагреватели; 6 – фиксатор количества оборотов; 7 – вращающийся вал; 8 – огнеупорное уплотнение; 9 – неподвижный вал; 10 – винт-гайка; 11 – образец; 12 – электродвигатель; 13 – размыкающий контакт; 14 – груз

Рисунок 1 – Схема установки для исследования высокотемпературной пластичности металлов и сплавов

В качестве критерия пластичности стали использовали число оборотов до разрушения образца. На рисунке 2 представлены результаты экспериментов на горячее скручивание.

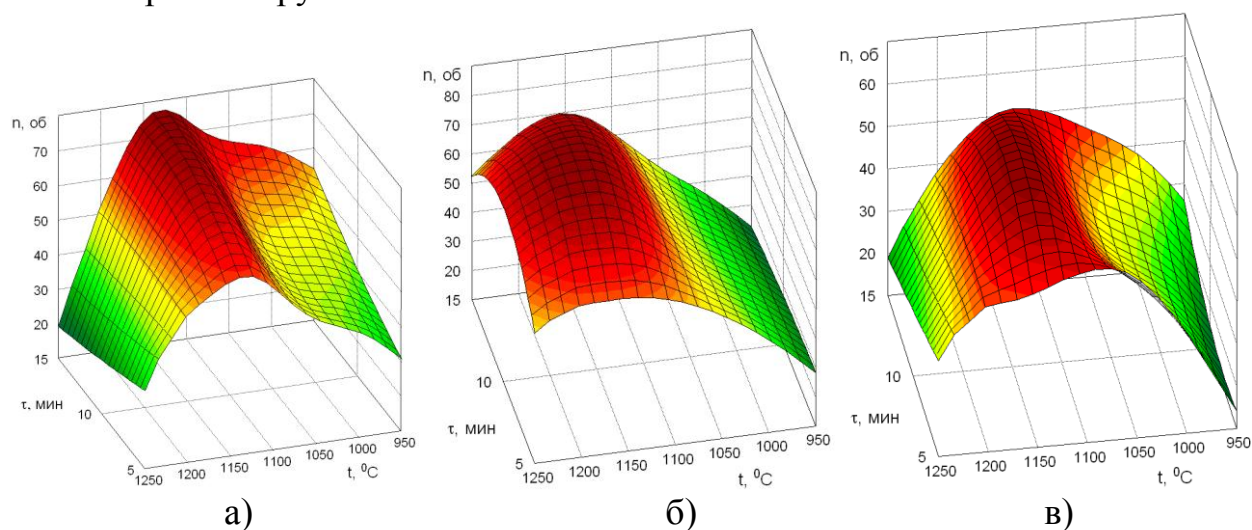


Рисунок 2 – Зависимости количества оборотов до разрушения от температуры нагрева и времени выдержки для образцов из корковой зоны а), зоны столбчатых кристаллов б) и осевой зоны равноосных кристаллов в)

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что для всех исследованных зон и времени выдержки максимальную пластичность исследуемая сталь показывает при температуре 1150 °С. Для корковой зоны максимальное количество оборотов составило 77 при температуре 1150 °С и времени выдержки 15 мин. Для зоны столбчатых кристаллов максимальное количество оборотов составило 87 и соответствует температуре 1150 °С и времени выдержки 10 мин. Пластичность осевой зоны равноосных кристаллов значительно ниже. Ее максимум составляет 60 оборотов и соответствует температуре 1150 °С и времени выдержки 10 мин. Характерно, что при увеличении температуры нагрева от 1150 до 1250 °С пластичность металла корковой и осевой зон снижается практически в два раза, в то время, как для зоны столбчатых кристаллов число оборотов до разрушения снижается менее резко.

Непрерывнолитая рельсовая сталь Э76Ф по сравнению с разлитой в слитки М76 имеет более высокую пластичность. В частности, для последней максимальное количество оборотов 48 соответствует температуре 1100 °С [2]. Рельсовая сталь М75, разлитая в слитки, имеет более высокие значения пластичности по сравнению с М76, максимальное количество оборотов достигает 60, причем при температуре 1050 °С [2].

На рисунке 3 показаны микроструктуры исследуемых образцов при времени выдержки 10 мин. Образцы из различных зон НЛЗ, нагретые до 1150 °С и подвергнутые высокотемпературному кручению, имеют обезуглероженный слой глубиной порядка 0,2 – 0,3 мм. По мере продвижения вглубь образца толщина сплошной тонкой ферритной сетки по границам зёрен уменьшается и переходит на глубине ~ 0,3 мм в разорванную. Величина зерна в данной области, определенная по ГОСТ 5639-82 соответствует № 4 – № 5.

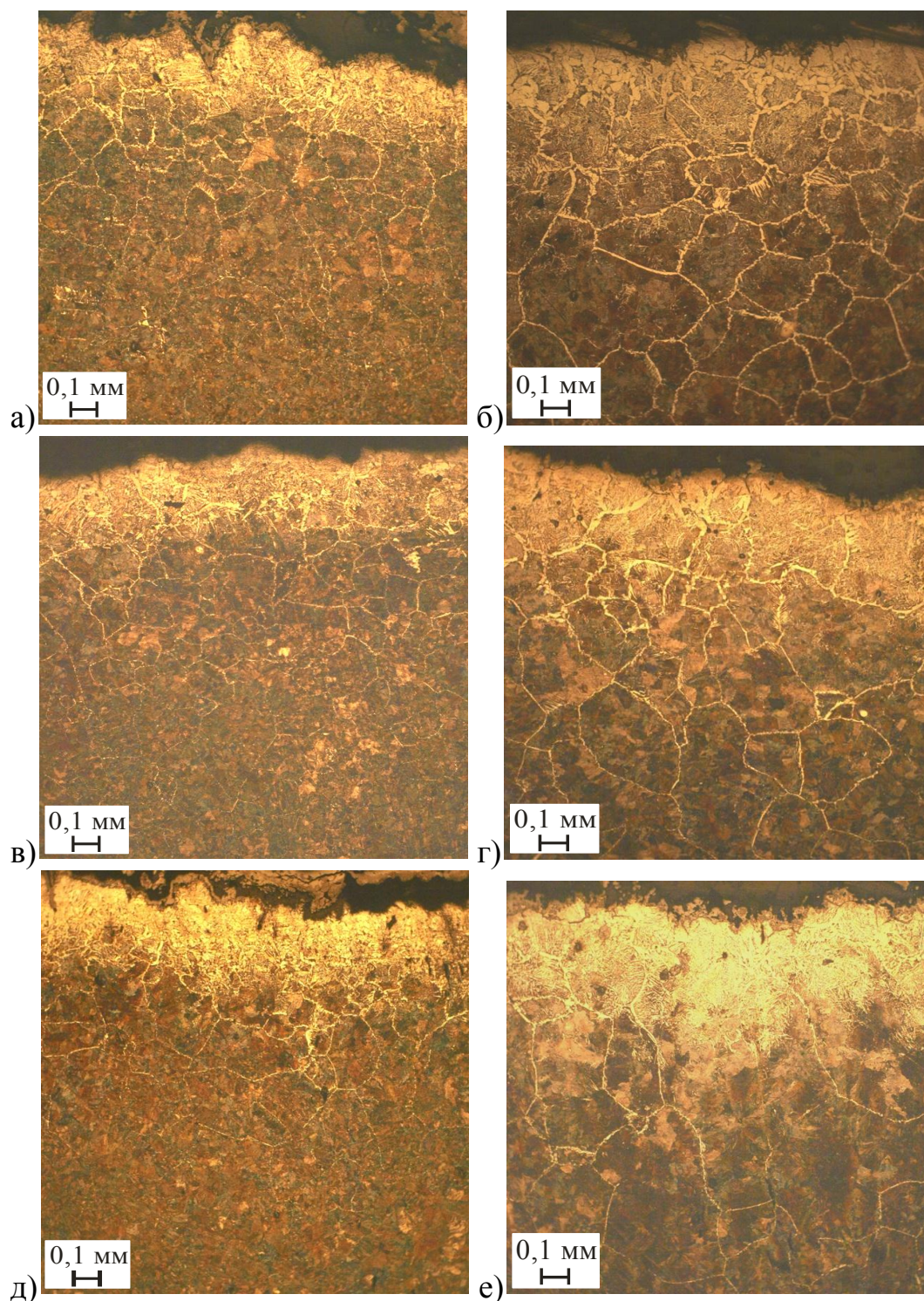


Рисунок 3 – Микроструктура образцов из стали Э76Ф после высокотемпературного кручения при 1150 °С а), в), д) и 1250 °С б), г), е); а), б) корковая зона; в), г) зона столбчатых кристаллов; д), е) осевая зона НЛЗ

Образцы из трёх зон НЛЗ, нагретые до 1250 °С и подвергнутые высокотемпературному кручению, имеют несколько различающееся строение. У образцов из корковой зоны поверхностный обезуглероженный слой толщиной 0,15 – 0,2 мм представлен структурой видманштедт (игольчатый феррит). Далее располагается слой частичного обезуглероживания толщиной 0,5 мм с

крупным зерном (№ 3), плавно переходящий в структуру основного металла, с такой же величиной зерна. У образцов из зоны столбчатых кристаллов, выявлено частичное обезуглероживание на расстоянии 0,5 мм от поверхности, под которым располагается структура рельсовой стали, но с крупным зерном (№ 2). Ещё большее поверхностное обезуглероживание имеет образец, вырезанный из центральной зоны НЛЗ, его глубина достигает 0,6 – 0,7 мм. Глубже располагается структура стали по всему сечению образца с величиной зерна № 1, характеризующая перегретое состояние металла. Формирование дефектных структур с большой величиной зерна способствует потере пластичности стали, что подтверждается полученными экспериментальными данными.

Выводы. Оценка температуры максимальной пластичности, проведенная в настоящей работе позволяет сделать вывод, что для рельсовой стали Э76Ф, микролегированной азотом и ванадием, она соответствует температуре 1150 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ворожищев В.И. Состав и технология производства рельсов повышенной работоспособности. – Новокузнецк: Новокузнецкий полиграфический комбинат, 2008. – 351 с.
3. Исследование технологической пластичности рельсовой стали, разлитой в изложницы и на установке непрерывной разливки / Е.Р. Браунштейн, Т.П. Гуляева, В.С. Стариков, Н.М. Сорокин // Актуальные проблемы материаловедения в металлургии: Сб. тез. докл. – Новокузнецк: Изд. СибГГМА, 1997. С. 180.
4. М.В. Темлянцев, Е.А. Колотов, А.Ю. Сюсюкин, В.В. Гаврилов Разработка технологии нагрева рельсовых заготовок в методической печи с шагающими балками // Сталь. 2006. № 12. С. 33 – 35.
5. В.В. Павлов, М.В. Темлянцев, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.

В.И. Базайкин¹, Л.А. Савина²

¹ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Новокузнецкий филиал, г. Новокузнецк

УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ КРУГЛОГО ВАЛА В НАЧАЛЕ ЕГО ПРОТЯЖКИ В ПЛОСКИХ БОЙКАХ

С использованием известных решений задач Мичела и Фламана получены распределения компонент тензора упругих деформаций в заготовке круглого сечения в начале её соприкосновения с плоскими бойками в операции протяжки вала-заготовки. Показано, что в безразмерных координатах форма распределения не зависит от усилияковки заготовки; сохраняется форма приконтактной зоны в сечении заготовки с большим градиентом деформаций. Возникает возможность установить границу упругой и пластической зон, положение которой зависит от значения параметра нагружения.

With use of known decisions of problems of Muchell and Flamant the form of distribution of elastic deformations on cross-section section of a forge ingot of round section in its beginning hammer in plane anvil blocks, not dependent on parametre size loading of ingot is established. The estimation of the size of a zone of transition of a material in a plastic condition depending on effort size hammer is possible.

Моделируется начальный этап протяжки заготовки круглого сечения при свободной ковке валов как задача плоской деформации. Представляет интерес переход зоны упругого контакта заготовки с параллельными бойками в предельное состояние, которое можно считать пластическим, в зависимости от усилий на бойках.

Будем исходить из решения частной задачи Мичела [1] симметричного сжатия упругого клина сосредоточенным усилием P , приложенной к его вершине. Как известно [1], при свободных от нормальных напряжений гранях клина и с использованием функции Эри тензор T плоских упругих напряжений в плоскости X_1, X_2 сечения клина имеет вид:

$$T = -\frac{P}{k} \cdot \begin{pmatrix} \frac{x_1^3}{(x_1^2 + x_2^2)^2} & \frac{x_1^2 x_2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \\ \frac{x_1^2 x_2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} & \frac{x_1 x_2^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \end{pmatrix}.$$

В выражениях компонент тензора Т коэффициент $k = \alpha + 0,5\sin 2\alpha$, α – половина угла клина (рисунок 1). В полярных координатах (полюс – вершина клина) напряжения представляются:

$$\sigma_r = -\frac{P}{k} \cdot \frac{\cos \varphi}{r}, \quad \sigma_\varphi = 0, \quad \tau = 0.$$

Если развернуть клин в плоскость ($\alpha = \pi/2$), получаем задачу Фламана [2] для полупространства, нагруженного сосредоточенным усилием Р, нормальным к границе полупространства.

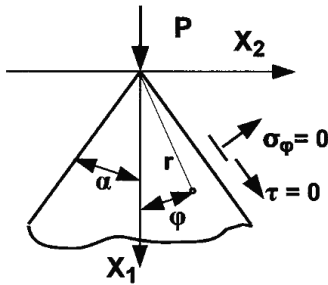


Рисунок 1 – К постановке задачи Мичела

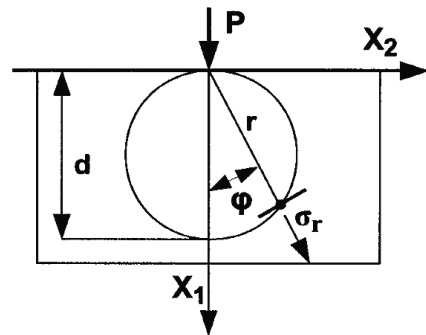


Рисунок 2 – К постановке задачи Фламана

Зная напряжения, переведем их в упругие деформации, получим задачу для смещений u_r, u_φ в полярных координатах, в которой в полупространстве выделим цилиндр диаметра d , прообраз круглой заготовки (рисунок 2), касающийся плоской границы полупространства в точке приложения усилия Р. На поверхности цилиндра зададим граничные условия:

$$u_\varphi \Big|_{\varphi=0} = 0, \quad u_r \Big|_{\varphi=0, r=d} = 0.$$

Получаем решение задачи для смещений:

$$\begin{aligned} u_\varphi &= \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{2P}{\pi} \cdot \sin \varphi \left[\nu + (1-\nu) \ln \frac{r}{d} \right] - \frac{1-\nu-2\nu^2}{E} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \varphi \cdot \cos \varphi, \\ u_r &= -\frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{2P}{\pi} \cdot \ln \frac{r}{d} \cdot \cos \varphi - \frac{1-\nu-2\nu^2}{E} \cdot \frac{P}{\pi} \cdot \varphi \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

В формулах (1) обозначены: ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости первого рода (Юнга).

Сжатие цилиндрической заготовки между плоскими бойками опишем в рамках задачи плоской деформации как действие на круглое сечение цилиндра двух симметричных противоположно направленных сосредоточенных усилий величиной Р. В каждой точке кругового сечения цилиндра действуют напряжения как от верхнего, так и от нижнего усилия (рисунок 3).

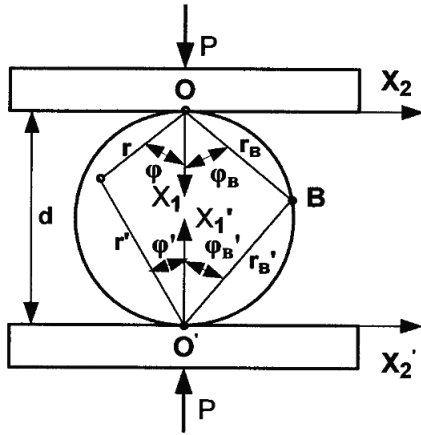


Рисунок 3 – Геометрия сечения заготовки между бойками прессы

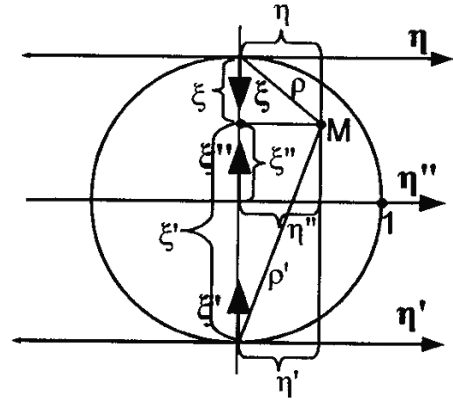


Рисунок 4 – Системы безразмерных координат в сечении заготовки

Так как для каждой точки В окружности сечения треугольник OBO' – прямоугольный, то напряжения σ_r, σ_r' действуют на взаимноперпендикулярных площадках и равны по величине:

$$\sigma_r = \sigma_r' = -\frac{2P}{\pi d}.$$

Это означает, что на любые площадки, проходящие через любую точку В окружности перпендикулярно оси цилиндра, действует одно и то же постоянное нормальное напряжение $p = -2P/\pi d$ (гидростатическое давление), а касательные напряжения на этих площадках равны нулю. Чтобы выполнить граничное условие на поверхности заготовки для напряжений (поверхность должна быть свободной от напряжений), на суммарное поле напряжений от двух сосредоточенных усилий величиной P надо наложить однородное поле растягивающего гидростатического давления величиной p. В безразмерных координатах ξ, η суммарные смещения можно представляются:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{2P}{\pi E} \cdot \left[(1-\nu^2) \ln \frac{\rho'}{\rho} - \nu(1-\nu) \left(\frac{\eta^2}{\rho^2} - \frac{\eta'^2}{\rho'^2} \right) + \frac{1}{2} (1-\nu-2\nu^2) \xi'' \right], \\ u_2 &= \frac{2P}{\pi E} \cdot \left[\nu(1+\nu) \left(\frac{\xi\eta}{\rho^2} + \frac{\xi'\eta'}{\rho'^2} \right) - \frac{1}{2} (1-\nu-2\nu^2) \left(\arctg \frac{\eta}{\xi} + \arctg \frac{\eta'}{\xi'} - \eta'' \right) \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

безразмерные координаты введены следующим образом:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x_1}{R}, \quad \eta = \frac{x_2}{R}, \quad \rho = \frac{r}{R}, \quad R = \frac{d}{2}; \quad \xi' = \frac{x_1'}{R}, \quad \eta' = \frac{x_2'}{R}, \quad \rho' = \frac{r'}{R}; \\ \xi'' &= \frac{x_1''}{R}, \quad \eta'' = \frac{x_2''}{R}, \quad \rho'' = \frac{r''}{R}; \quad x_1 + x_1'' = R, \quad x_1 + x_1' = 2R, \quad x_2 = x_2' = x_2''; \\ \xi + \xi'' &= 1, \quad \xi' - \xi'' = 1, \quad \eta = \eta' = \eta''; \quad \rho^2 = \xi^2 + \eta^2, \quad \rho'^2 = \xi'^2 + \eta'^2. \end{aligned}$$

В выражениях (2) использованы три декартовы системы безразмерных координат, что делает их неудобными для вычисления тензора плоских деформаций. В единой системе координат, центром которой является точка приложения верхнего сосредоточенного усилия (рисунок 4), поле смещений записывается:

$$\begin{aligned} u_{\xi} &= \frac{2P}{\pi E} \left[\frac{1}{2}(1-\nu^2) \ln \left(1 + \frac{4(1-\xi)}{\xi^2 + \eta^2} \right) - \nu(1+\nu) \left(\frac{\eta^2}{\xi^2 + \eta^2} - \frac{\eta^2}{4(1-\xi) + \xi^2 + \eta^2} \right) + \frac{1}{2}(1-\nu-2\nu^2)(1-\xi) \right], \\ u_{\eta} &= \frac{2P}{\pi E} \left[\nu(1+\nu) \left(\frac{\xi\eta}{\xi^2 + \eta^2} + \frac{(2-\xi)\eta}{4(1-\xi) + \xi^2 + \eta^2} \right) - \frac{1}{2}(1-\nu-2\nu^2) \left(\arctan \frac{\eta}{\xi} + \arctan \frac{\eta}{2-\xi} - \eta \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Надо помнить, что в задаче плоской деформации P – это усилие, приходящееся на единицу длины заготовки.

Зная поле (3), получаем компоненты тензора упругих деформаций в плоскости поперечного сечения заготовки:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_{\xi}}{\partial x_1} = \frac{1}{R} \frac{\partial u_{\xi}}{\partial \xi}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_{\eta}}{\partial x_2} = \frac{1}{R} \frac{\partial u_{\eta}}{\partial \eta}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{\xi}}{\partial x_2} + \frac{\partial u_{\eta}}{\partial x_1} \right) = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial u_{\xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial u_{\eta}}{\partial \xi} \right).$$

Выражения компонент тензора деформаций как функций аргументов ξ, η не приводятся в силу их громоздкости. Тем не менее нетрудно заметить, что численные значения распределения деформаций по сечению заготовки зависят только от безразмерного параметра $\mu = P / RE$.

Зададим следующие значения параметров модели (близкие к реальным условиям начала свободнойковки стального вала при температуре 950 °С): $R = 0,2$ м; $E = 50$ ГПа; $P = 500$ кН; получаем $\mu = 5 \cdot 10^{-5}$. На рисунках 5, 6 показаны распределения нормальных компонент тензора деформаций по четверти сечения заготовки. Придавая безразмерному параметру нагружения μ различные другие значения, нашли, что существует приконтактная зона деформаций с большим градиентом, ширина и высота приконтактной зоны не превышает 0,5 % от величины R ; деформации вне этой зоны в 7 раз меньше предельных значений и распределены по сечению относительно равномерно. Картина распределения деформаций остаётся неизменной, изменяется масштаб на оси деформаций. Если считать, что предельная интенсивность упругих деформаций $\varepsilon_{\text{пред}}$, соответствующая переходу материала заготовки в пластическое состояние, равна 0,002, то, в зависимости от значения μ , в пластическом состоянии может находиться и только часть указанной зоны, и всё сечение заготовки.

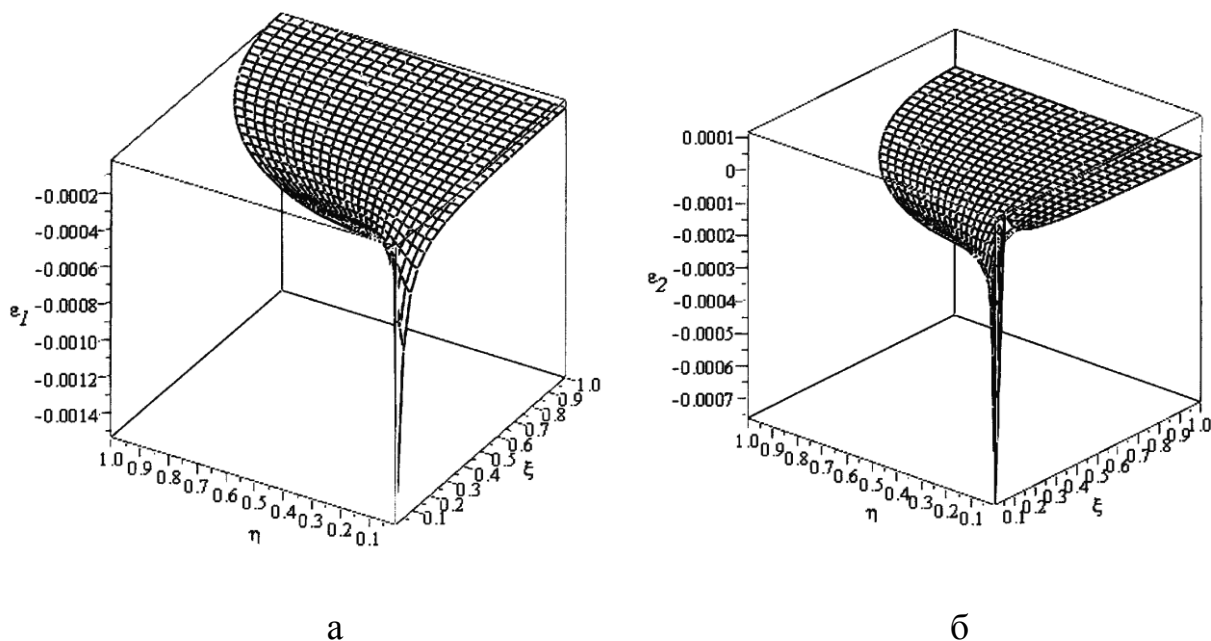


Рисунок 5 – Распределения компонент ε_1 (а) и ε_2 (б) тензора упругих деформаций в четверти сечения вала-заготовки.

Выводы. Установлена форма распределения упругих деформаций по поперечному сечению заготовки круглого сечения в начале её свободнойковки в плоских бойках, не зависящая от величины параметра нагружения заготовки. Возможна оценка размера зоны перехода материала в пластическое состояние в зависимости от величины усилияковки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов С.П. Теория упругости [Учебник] / С.П. Демидов // М.: Высшая школа. – 1979. – 432 с.
2. Лурье А.И. Теория упругости [Монография] / А.И. Лурье // М: Наука. – 1970. – 939 с.

А.А. Уманский, Ю.А. Мартьянов

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ В СОРТОВЫХ КАЛИБРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В результате моделирования процесса деформации металла в калибрах различной формы с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM-3D определены закономерности перемещения поверхностных слоев металла в процессе деформации.

As a result of design of process of deformation of metal in the calibers of different form with the use of the specialized engineering programmatic complex DEFORM-3D conformities to law of moving of superficial layers of metal are certain in the process of deformation.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных изучению процессов течения металла при прокатке в калиброванных валках, следует констатировать отсутствие в настоящее время единого целостного представления по данному вопросу. До недавнего времени сдерживающим фактором для развития теории прокатки в калибрах являлась сложность математического аппарата, необходимого для моделирования процесса деформации с учетом многообразия действующих факторов.

В последние годы появился ряд программных комплексов для трехмерного моделирования процессов деформации при различных методах обработки металлов давлением, в том числе при прокатке. Одним из таких программных комплексов является DEFORM-3D. Применительно к прокатке существует опыт использования DEFORM-3D для анализа процессов деформации металла в сортовых [1] и универсальных [2] калибрах, а также прокатки на листовых [3, 4] и колесопрокатных [5] станах.

Данный программный комплекс основан на методе конечных элементов, одном из самых надежных из применяемых в настоящее время расчетных методов. Суть метода заключается в том, что область, в которой осуществляется поиск решения дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (узлах) является решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих

функций обычно находятся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

С использованием программного комплекса DEFORM-3D провели исследование перемещения точек, нанесенных на поверхность заготовки при прокатке в сортовых калибрах различной формы. Моделировали прокатку заготовки квадратного сечения 30×30 мм в ромбическом, ящичном и овальном калибрах. Размеры калибров выбирали исходя из получения одинаковой относительной деформации для всех калибров, равной 0,25. Всего для анализа выбрали 11 точек, расположенных по ширине заготовки на равном расстоянии друг от друга (3,0 мм) в центральной по длине зоне калибра (на равном расстоянии от входного и выходного концов раската). Вид квадратной заготовки перед моделированием прокатки в ромбическом калибре в интерфейсе программы DEFORM 3D представлен на рисунке 1.

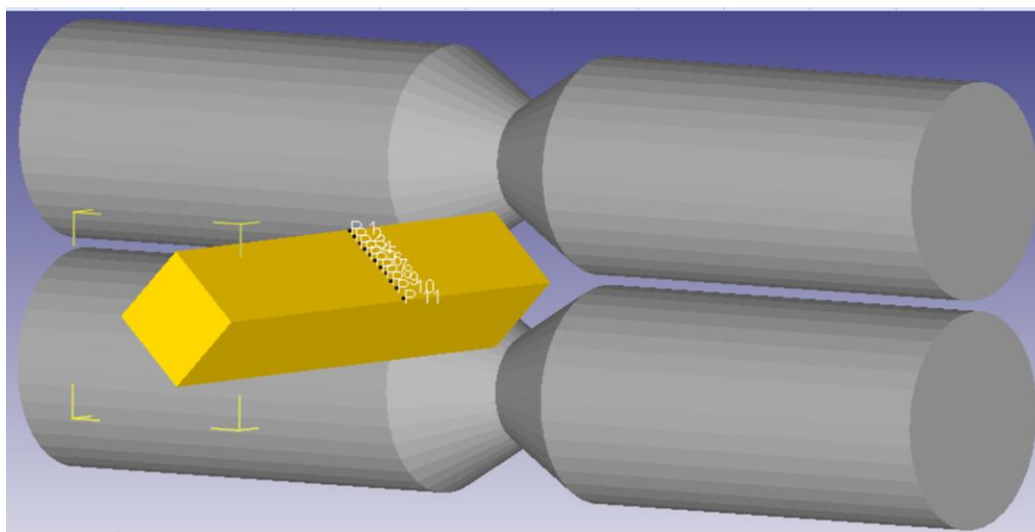


Рисунок 1 – Схема нанесения точек при моделировании процесса прокатки в интерфейсе программы DEFORM 3D

Выбранная схема расположения точек позволила определить закономерности перемещения поверхностных слоев металла в центральной и боковой зонах калибров в процессе прокатки.

По полученным данным (рисунок 2) при прокатке заготовки квадратного сечения в ромбическом калибре металл, находящийся при прокатке в цент-



Рисунок 2 – Течение поверхностных слоев металла при прокатке квадратной заготовки в ромбическом калибре

ральной зоне калибра (точка P1) не испытывает смещений в направлении горизонтальной оси (по ширине калибра). Далее по мере удаления от вершины калибра к его периферии наблюдается постепенное нарастание величины смещений металла. При этом максимальной величины смещения достигают в точках P8, P9, то есть примерно на расстоянии $\frac{3}{4}$ ширины грани от вершины калибра. В оставшейся $\frac{1}{4}$ заготовки величины смещений снижаются по направлению к ребру заготовки, находящемуся при прокатке в разьеме калибра.

Для случая прокатки квадратной заготовки в овальном калибре график, отражающий перемещение точек по ширине калибра, имеют иной вид (рисунок 3) по сравнению с прокаткой в ромбическом калибре. Однако это объясняется не особенностями течения металла, а положением заготовки при задаче в калибр (в ромбический калибр квадратная заготовка задается с предварительной кантовкой на 45° , а в овальный калибр – без предварительной кантовки). В результате в осевой зоне калибра находилась точка P6, а пары точек P1 и P11, P2 и P10, P3 и P9, P4 и P8, P5 и P7 являлись равноудаленными от оси калибра.

Касательно прокатки в ящичном калибре можно отметить (рисунок 4), что ширина зоны, где отсутствует смещение поверхностных слоев металла в горизонтальном направлении имеет более значительную протяженность по сравнению с прокаткой в овальном калибре и составляет порядка 20 %. Данный факт объясняется более равномерным обжатием квадратной заготовки в ящичном калибре за исключением участков выпуска калибра.

Вышеприведенные результаты моделирования перемещения точек в процессе прокатки позволили определить картину течения металла по ши-

рине калибра в различных его зонах. В центральной зоне калибра имеет место



Рисунок 3 – Течение поверхностных слоев металла при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре

только вертикальное перемещение металла в направлении обжатия, в боковых зонах поверхностные слои металла одновременно перемещаются в направлении обжатия и в горизонтальной плоскости по направлению от центра калибра к его периферии. При этом ширина зоны, где имеет место перемещение металла в горизонтальном направлении, в значительной степени зависит



Рисунок 4 – Течение поверхностных слоев металла при прокатке квадратной заготовки в ящичном калибре

от формы исходной заготовки и калибра. Так, если при прокатке квадратной заготовки в ящичном калибре ширина такой зоны составляет около 20 % от ширины калибра, то при деформации в ромбическом и овальном калибрах горизонтальные смещения металла отсутствуют только непосредственно в вершине калибра.

Следует отметить, что полученные данные об особенностях перемещения металла в различных зонах калибра согласуются с результатами исследований Ю.В. Зильбергом с соавторами [6, 7] – в ходе проведения промышленных экспериментов на слитках со «свидетелями»-шпильками ими установлен факт значительного горизонтального смещения шпилек, расположенных на равном расстоянии от оси калибра и боковых граней заготовки («четвертных» шпилек), и отсутствия горизонтального перемещения шпилек, расположенных при прокатке в вершине калибра.

Вывод. В результате моделирования процесса деформации металла в калибрах различной формы с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM-3D определены закономерности перемещения поверхностных слоев металла в процессе деформации. Согласно полученным данным в центральной зоне калибра имеет место только вертикальное перемещение металла в направлении обжатия, а в боковых зонах поверхностные слои металла одновременно перемещаются в направлении обжатия и в горизонтальной плоскости по направлению от центра калибра к его периферии. При этом ширина зоны, где имеет место перемещение металла в горизонтальном направлении, в значительной степени зависит от формы исходной заготовки и калибра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинзин Д.И. Оценка эффективности калибровки сортовых профилей на основе программного комплекса Deform 3d / Д.И. Кинзин, С.С. Рычков // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2011. – №1 – С. 92-95.
2. Шилов В.А. Моделирование процесса прокатки рельсов в универсальных калибрах / В.А. Шилов, Р.А. Литвинов, Д.Л. Шварц // Производство проката. – 2009. – №8 – С. 20-25.
3. Тинигин А.Н. Моделирование процесса прокатки высоких горячих полос, подаваемых встык в очаг деформации / А.Н. Тинигин // Сталь. – 2012. – №7 – С. 31-34.
4. Салганик В.М. Моделирование поведения поперечных угловых трещин сляба при прокатке в горизонтальных валках / В.М. Салганик, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 3 – С. 22.
5. Голышков Р. Оптимизация технологических процессов колесопрокатного производства с помощью программного комплекса DEFORM / Р. Голышков, А. Латаев, А. Харламов // САПР и графика. – 2006. – №7.
6. Зильберг Ю.В. Формоизменение поверхностных дефектов при прокатке в простых калибрах / Ю.В. Зильберг, С.В. Ревякин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1996. – № 8 – С. 23-25.
7. Зильберг Ю.В. Изменение поверхностных дефектов при прокатке трубной заготовки из коррозионностойкой стали / Ю.В. Зильберг [и др.] // Сталь. – 1991. – №10. – С. 33-36.

УДК 621.791:624

Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, Р.Е. Крюков, С.Н. Старовацкая, А.В. Роор
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ ДОБАВКИ С ФЛЮСОМ АН-67

Проведены экспериментальные исследования влияния углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67 при сварке стали 09Г2С. Показано, что при использовании добавки уменьшается общее содержание кислорода в шве, снижается загрязненность оксидными неметаллическими включениями и уровень газонасыщенности металла шва, увеличивается комплекс требуемых механических свойств и ударной вязкости сварных соединений при

этом концентрация углерода в сварных швах остается на уровне основного металла.

Experimental study of the effect the introduction of carbon-fluorine containing additives in flux AN-67 welding 09G2S. It is shown that the use of supplements reduced the total oxygen content in the weld, reduced pollution oxide non-metallic inclusions and the level of gas saturation of the weld metal, the complex increases the required mechanical properties and toughness of the weld with the concentration of carbon in the weld remains at the base metal.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации госзаказа 7.5021.2011

В результате проведенных исследований влияния введения углеродфторсодержащей добавки в плавляемые окислительные флюсы на свойства сварных швов было показано, что образующиеся с участием углерода соединения CO и CO₂ находящиеся в газообразном состоянии легко удалимы и не загрязняют металл шва неметаллическими включениями, однако использование углерода в качестве раскислителя может привести к науглероживанию металла, что в свою очередь ухудшает механические свойства и структуру сварных швов [1-3]. Данные процессы неразрывно связаны с окисленностью и основностью шлаковых систем, образующихся при плавлении применяемых при сварке флюсов.

В данной работе приведены исследования по влиянию углеродфторсодержащей добавки с содержанием металлургических отходов с содержанием, масс. %: Al₂O₃ =21–46; F⁺ =18–27; Na₂O=8–15; K₂O=0,4–6; CaO=0,7–2,3; SiO₂=0,5–2,5; Fe₂O₃=2,1–3,3; C_{общ}=12,5–30,2; MnO=0,07–0,9; MgO=0,06–0,9; S=0,09–0,19; P=0,10–0,18 и 10–12% жидкого стекла во флюс АН-67. Для анализа влияния, углеродфторсодержащую добавку вводили во флюс в количестве 2–8 %. За базовый вариант был принят образец, сваренный под флюсом АН-67 без добавки.

Сварку двусторонних стыковых швов без разделки кромок на образцах размером 200×500мм из стали 09Г2С (ГОСТ 19282-73), толщиной 16мм, проводили сварочным трактором АСАW-1250 с использованием сварочной проволоки марки Св-08ГА (ГОСТ 2246-70) на следующем режиме: сварочный ток I_{св}=650 А, напряжение на дуге U_д=36 В, скорость сварки V_{св}=20,5 м/ч, диаметр проволоки d=4 мм.

Определение химического состава металла сварных швов на содержание углерода, серы и фосфора проводили химическими методами по ГОСТ 12344-2003, ГОСТ 12345-2001, ГОСТ12347-77 соответственно, на содержание марганца, кремния, хрома, никеля, меди в металле и оксидов кальция, кремния, магния, алюминия, марганца, железа, калия, натрия, фтора во флюсах с добавками и полученных шлаках проводили на рентгенофлюорисцентном спектрометре XRF -1800 фирмы SHIMADZU. Химический состав металла сварных швов, а так же флюсов и шлаков приведен соответственно в табли-

цах 1–3. Исследование на определение кислорода по ГОСТ 17745-90 методом восстановительного плавления на газоанализаторе фирмы «LECO» ТС-600 показало, что массовая доля кислорода с повышением содержания добавки во флюсе понижалась в пределах от 520 ppm (базовый вариант) до 348 ppm (введение 8 % добавки), что составляет 33 % (рисунок 1). Причем эксперимен-

Таблица 1 – Химический состав сварных швов, выполненных под флюсом АН-67 с углеродсодержащей добавкой

Кол-во добавки, %	Состав сварных швов, %					
	C	S	P	Si	Mn	Al
0	0,092	0,011	0,011	0,55	1,01	0,034
2	0,096	0,012	0,011	0,5	0,88	0,029
4	0,108	0,013	0,014	0,56	0,94	0,031
6	0,115	0,014	0,012	0,5	0,9	0,028
8	0,107	0,015	0,013	0,52	0,98	0,026

ты показали, что массовая доля кислорода в силикатах снизилась с 328 ppm до 132 ppm, при это изменения доли кислорода в алюминатах, алюмосиликатах кальция, силикатах кальция и магниевых шпинелях не были существенными. Вероятно что, уменьшение количества кислорода вызвано снижением его количества содержащегося именно в силикатах.

Таблица 2 – Химический состав флюсов с углеродфторсодержащей добавкой

Кол-во добавки, %	Состав флюсов, %										
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	S	P
0	0,56	15,28	17,75	14,81	36,09	1,58	1,11	0,46	8,47	0,04	0,01
2	0,76	14,95	17,22	14,74	34,69	1,51	1,48	0,44	8,72	0,09	0,02
4	0,71	14,5	16,3	14,68	32,7	1,38	2,1	0,45	9,28	0,18	0,02
6	0,81	14,44	16,2	15,44	32,63	1,36	2,52	0,43	9,44	0,23	0,02
8	0,94	14,33	16,03	15,81	32,93	1,35	2,87	0,44	9,76	0,26	0,02

Таблица 3 – Химический состав шлаков

Кол-во добавки, %	Состав шлаков, %										
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	S	P
0	2,19	13,52	16,89	14,33	30,58	1,28	0,5	0,41	7,77	0,03	0,01
2	2,43	13,43	16,93	15,95	32,46	1,32	1,31	0,42	9,28	0,05	0,01
4	2,51	13,03	16,72	15,37	32,33	1,3	1,3	0,41	9,24	0,07	0,01
6	2,51	13,11	16,33	15,4	31,64	1,27	1,27	0,39	9,06	0,09	0,01
8	2,72	12,72	16,41	16,04	33,61	1,33	1,33	0,4	10,36	0,11	0,01

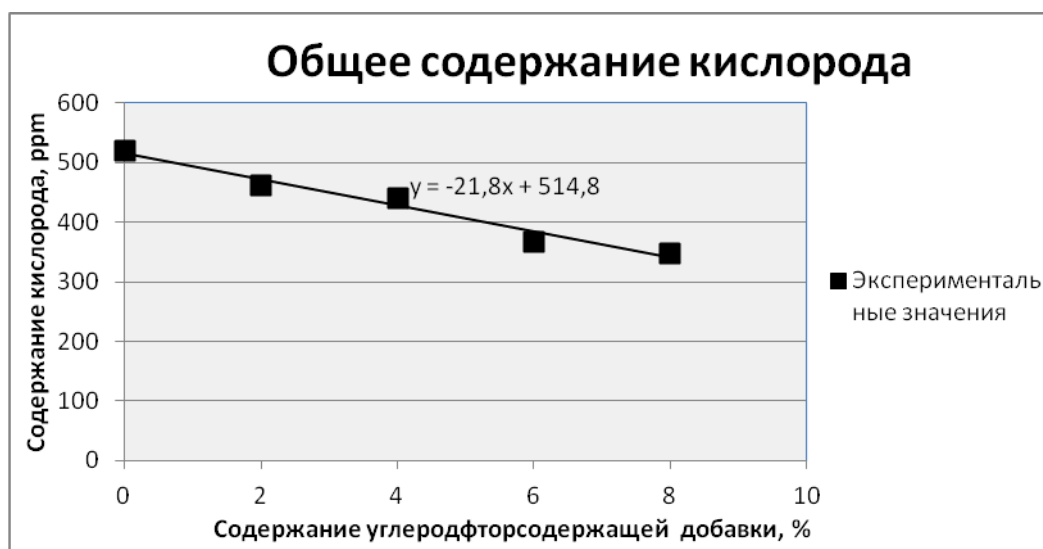


Рисунок 1 – Изменение общего содержания кислорода в зависимости от количества углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67

Значительных изменений содержания азота не наблюдалось и осталось на уровне базового варианта в количестве 70 ppm, а водорода несколько снизилось с 1,1 см³/100г до 0,8–0,9 см³/100г.

Металлографические исследования проведенные на полированных микрошлифах с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при увеличении $\times 100$ и $\times 200$ показали, что введение углеродфторсодержащей добавки до 8 % во флюс АН-67 не приводило к структурным изменениям. В микроструктуре всех проб наблюдалось схожее зонное строение – область сварного шва, переходная зона, основной металл, с присутствием равновесных зерен феррита и перлита. Структура металла удовлетворительная, зерно оценивается 7-8 баллом по ГОСТ 5639-82. В микроструктуре сварного шва присутствуют ферритные зерна, вытянутые в направлении отвода тепла. В структуре всех проб наблюдаются точечные включения оксидов и силикатов, оценивающиеся 1–2 баллом по шкале ГОСТ 1778-70.

Результаты испытаний по разрушающему контролю образцов, проведенных по ГОСТ 6996-66 (таблица 4), показали, что применение углеродфторсодержащей добавки повышает ударную вязкость при отрицательных температурах (рисунок 2), что, по-видимому, связано с изменением морфологии оксидных включений и со снижением содержания кислорода в сварном шве.

Таблица 4 – Механические свойства сварного шва

Кол-во добавки, %	бв, Н/мм ²	бт, Н/мм ²	Δ , %	KCV (-20°C), Дж/см ²
0	536	382	31,5	28,7
2	562	386,5	28,5	43
4	574	395	30	39,3

6	579	406,5	28,5	40,3
8	594,5	410	27	38,3

Примечание: приведены средние значения механических показателей, при испытании на растяжение было 2 образца, при испытании на ударную вязкость 3 образца

Определено, что при использовании исследуемой добавки в количестве до 6 % во флюс АН-67 концентрация углерода в сварных швах не превышает концентрации углерода в основном металле (рисунок 3). Дальнейшее увеличение количества добавки во флюс приводит к превышению содержания углерода в сварном шве по сравнению с основным металлом. Таким образом, с точки зрения изменения содержания углерода в сварном шве оптимальным является присадка добавки в количестве 4 – 6 %.

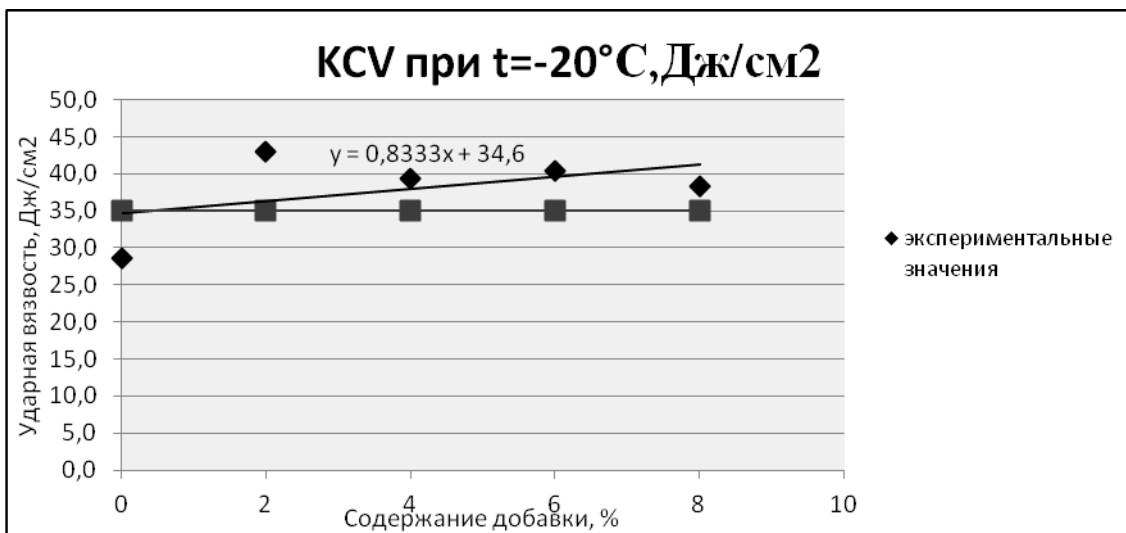


Рисунок 2 – Изменение ударной вязкости металла шва (KCV при T = -20°C) от количества углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67

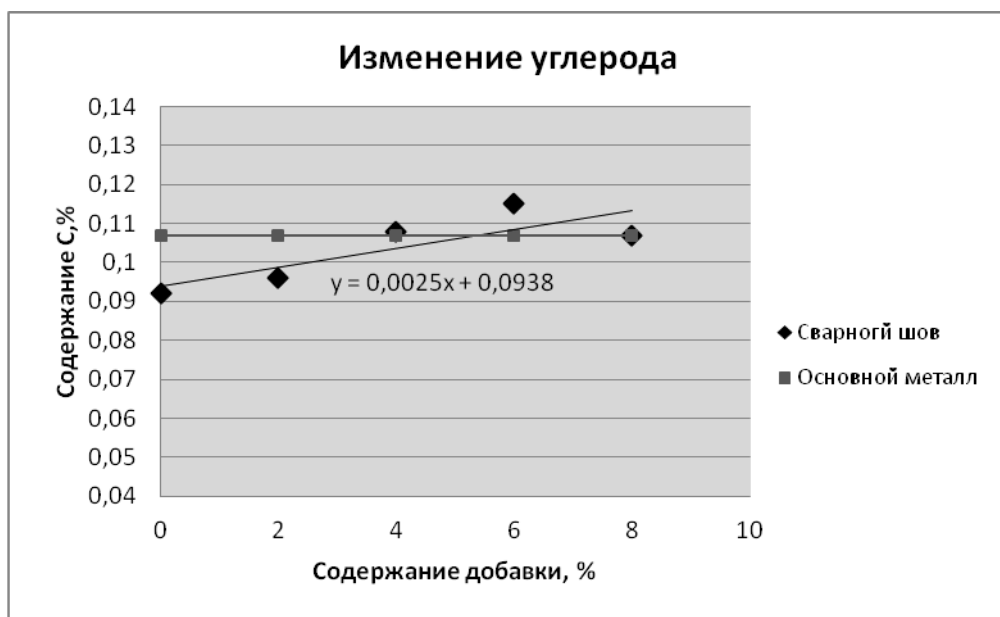


Рисунок 3 – Изменение содержания углерода в зависимости от количества углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67

Изменение количества углерода напрямую влияет на изменение такого свойства сварного соединения как твердость. Замеры твердости осуществляли согласно шаблона (рисунок 4) в основном металле, на границе сплавления и в металле шва. Введение углеродфторсодержащей добавки во флюс не привело к повышению значений твердости (таблица 5).

Таблица 5 – Показатели твердости

Кол-во добавки	Твердость НВ в точках																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Основной металл				Зона термического влияния								Сварной шов						
0	209	214	211	216	182	172	183	172	173	175	170	175	181	181	177	175	173	180	181
	212,5*				175,3*								178,3*						
2	216	222	207	220	179	178	181	176	173	179	176	174	185	181	180	178	183	183	190
	216,3*				177,0*								182,9*						
4	222	208	211	208	185	183	181	177	176	182	177	181	185	186	185	177	166	180	183
	212,3*				180,3*								180,3*						
6	213	213	214	198	188	162	178	180	183	182	170	180	198	205	199	184	176	198	198
	209,5*				177,9*								194,0*						
8	220	205	226	220	183	175	183	179	178	180	179	180	193	195	192	184	210	214	213
	217,8*				179,6*								200,1*						
* - среднее значение																			

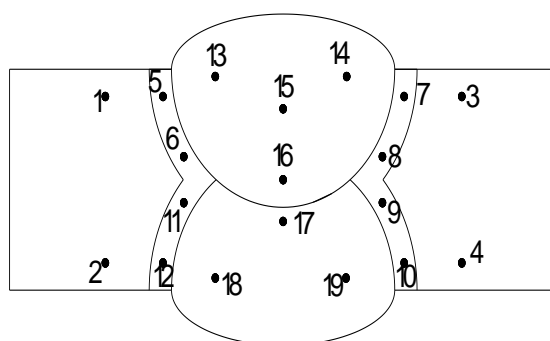


Рисунок 4 – Схема измерения твердости

Выводы. Установлено, что при использовании исследуемой углерод-фторсодержащей добавки в количестве 4-6 % во флюс АН-67 уменьшается общее содержание кислорода в шве, снижается загрязненность оксидными неметаллическими включениями и уровень газонасыщенности металла шва, увеличивается комплекс требуемых механических свойств и ударной вязкости сварных соединений при этом концентрация углерода в сварных швах остается на уровне основного металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Голдун З.В., Крюков Р.Е., В.М. Шурупов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 10. – С. 35 – 38.

2. Влияние углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов на свойства сварных швов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Старовацкая С.Н., Крюков Р.Е., Голдун З.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 26 – 29.

3. Влияние углерод- и фторсодержащих добавок в составе флюсов на содержание неметаллических включений и свойства сварных швов / Козырев Н. А., Игушев В. Ф., Крюков Р. Е., Голдун З. В., Ковальский И. Н. // Сварочное производство. – 2012. – № 12.

УДК 621.791.92:621.771.07

Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, Д.А. Титов

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

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ В ШИХТУ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ НА СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

В работе показано влияние углеродфторсодержащей добавки в составе порошковой проволоки хромовольфрамового металла на структуру наплавленного металла.

The work shows the influence of carbon-fluorine containing additives for the metal-cored wire chromium tungsten on the structure of deposited metal.

Снижение эксплуатационных затрат в прокатном производстве напрямую связано со стойкостью рабочей поверхности прокатных валков. Восстановление прокатных валков станов горячей прокатки позволяет повысить ресурс их работы и увеличить производительность прокатных станов. Эффективность применения наплавки стальных прокатных валков во многом зависит от правильности выбора состава наплавленного металла. При этом необходим анализ условий работы валков, характера и интенсивности изнашивания рабочей поверхности калибров, так как даже на однотипных прокатных станах разных металлургических предприятий износ валков имеет свои особенности. Для наплавки валков горячей прокатки широко используются наплавочные материалы типа 30ХГСА, 35В9Х3СФ, 25Х5ФМС и др. [1]. Наиболее нагруженные валки горячей прокатки упрочняются наплавкой хромовольфрамового металла с большим содержанием дорогостоящего вольфрама порошковой проволокой типа ПП-Нп-35В9Х3СФ под флюсом. Состав проволоки приведен в таблице 1.

Таблица 1–Химический состав ПП-Нп-35В9Х3СФ, %

Элемент	С	Si	Mn	Cr	W	V	S	P
							не более	
Содержание	0,27-0,40	0,4-1,0	0,4-1,2	2,5-3,5	8,5-10,5	0,2-0,4	0,045	0,045

Опыт эксплуатации наплавленных валков свидетельствует о том, что износ их поверхности происходит неравномерно. Валки в процессе работы подвергаются воздействию циклических термомеханических нагрузок, коррозии и абразивному изнашиванию. Нередко имеет место полосчатый износ, причиной которого может быть наличие участков наплавленного металла с различной структурой и твердостью. Такие участки наблюдаются при многослойной наплавке легированных сталей с перекрытием ранее наплавленного валика. Наплавленный металл типа 35В9Х3СФ обладает высокой стойкостью против истирания при повышенных температурах, но его термическая выносливость относительно невысокая, поэтому валки, наплавленные этой проволокой, часто выходят из строя из-за образования сетки трещин разгара и выкрашивания [1, 2]. Глубина трещин разгара может составлять 10 мм и более.

Анализ причин выхода из строя валков станов горячей прокатки наплавленных порошковой проволокой ПП-Нп-35В9Х3СФ под флюсом свидетельствует о том, что возможности системы легирования С-W-Cr-V-Si-Mn до конца не реализованы. Поэтому представляет интерес исследование причин образования трещин разгара и разработка способов повышения термической выносливости наплавленного металла.

В лабораторных условиях были наплавлены образцы стандартной порошковой проволокой марки ПП-Нп-35В9Х3СФ, которая используется на ОАО «ЗСМК» для наплавки валков горячей прокатки и роликов транспортирующих рольгангов. Многослойную наплавку образцов производили с предварительным подогревом до 350 0С и последующим замедленным охлаждением. Структура металла представляла собой мартенсит с остаточным аустенитом с формированием по границам зерен карбидной эвтектики и крупных карбидов (рисунок 1). Присутствует значительное количество строчечных кислородных включений, являющихся концентраторами напряжений.

В процессе работы валка под воздействием высоких температур наблюдается коагуляция и укрупнение зерен карбидов по границам зерен, с последующим выкрашиванием и развитием трещин разгара. Образование трещин в наплавленном металле, по-видимому, предопределено химической неоднородностью, связанной с наличием различных структурных составляющих [3]. Химическая неоднородность отдельных широких приграничных зон имеет место после наплавки вследствие воздействия термического цикла наплавки особенно тел вращения и сохраняется в процессе эксплуатации валков при термомеханическом воздействии со стороны горячего прокатываемого металла.

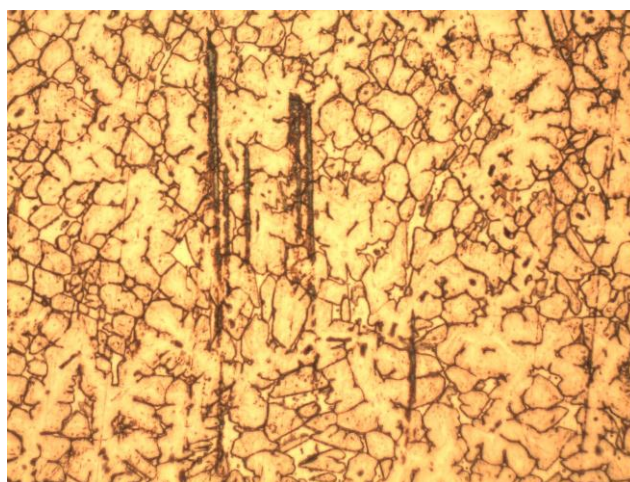


Рисунок 1 – Микроструктура металла, наплавленного стандартной проволокой ПП-Нп-35В9Х3СФ ($\times 200$)

Для снижения развития процессов коагуляции карбидов, уменьшения структурной неоднородности наплавленного металла необходимо изменить структурное состояние границ зерен, что возможно оптимизацией соотношения углерода и карбидообразующих элементов, повышением устойчивости аустенита и отработкой режимов наплавки, позволяющих увеличить скорость охлаждения наплавленного металла.

В составе предлагаемой проволоки углерод заменили на углеродфторсодержащую пыль (отходы металлургического производства), со следующим химическим составом: масс. %: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 21 - 46$; $\text{F}^+ = 18 - 27$; $\text{Na}_2\text{O} = 8 - 15$; $\text{K}_2\text{O} = 0,4 - 6$ %; $\text{CaO} = 0,7 - 2,3$; $\text{SiO}_2 = 0,5 - 2,5$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,1 - 3,3$; $\text{C}_{\text{общ}} = 12,5 - 30,2$; $\text{MnO} = 0,07 - 0,9$; $\text{MgO} = 0,06 - 0,9$; $\text{S} = 0,09 - 0,19$; $\text{P} = 0,10 - 0,18$.

Мелкодисперсность материала позволяет проводить хорошее смешение с металлической составляющей шихты порошковой проволоки. Эксперименты показали, что углерод в составе пыли обладает повышенной активностью, раскисляет металл и восстанавливает оксиды, находящиеся в металле и в шлаке с образованием окислов углерода. Это позволило использовать для наплавки высоколегированной проволокой слабоокислительный флюс марки АН-67 (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав флюса ГОСТ Р 52222-2004

Марка флюса	Содержание основных компонентов, %								
	SiO_2	MnO	CaO	CaF_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	S	P
АН-67	12-16	14-16	≤ 10	11-16	4-7	35-40	$\leq 1,0$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$

Марганец в состав проволоки не добавлялся в связи с его восстановлением из образующегося шлака. Происходило частично восстановление кремния из шлака. Использование флюса позволило улучшить гигиеническую обстановку при наплавке вследствие низкого содержания фтористого кальция по сравнению с флюсами, применяемыми при наплавке. Как, показали экспе-

рименты, образующийся шлак не окисляет легирующие элементы в составе наплавленного металла.

Металлографический анализ показал, что структура металла, наплавленного опытной порошковой проволокой представляет собой игольчатый троостит с мартенситом и формированием по границам зерен отдельных тонких аустенитных оторочек с незначительным количеством включений карбидов (рисунок 2). Углеродфторсодержащая добавка в шихту проволоки способствовала удалению оксидных неметаллических включений, более равномерному распределению углерода в металле шва и образованию мелкодисперсных карбидов, что на практике должно привести к повышению термической стойкости.

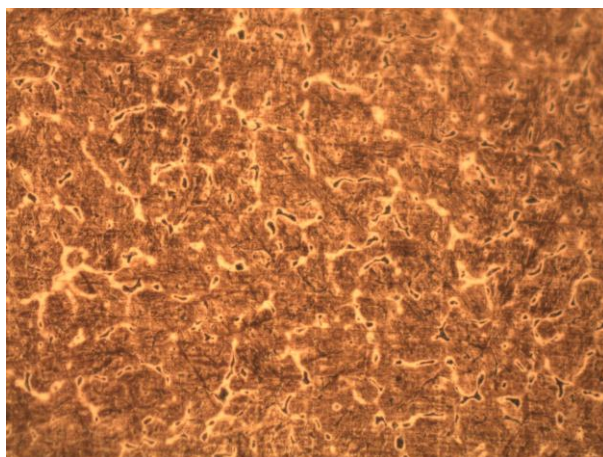


Рисунок 2 – Микроструктура металла, наплавленного опытной проволокой ПП-Нп-35В9Х3СФ ($\times 200$)

Для стабилизации аустенита в состав порошковой проволоки предложено вводить аустенитообразующий элемент – никель. Добавка никеля в стали в небольших количествах способствует дополнительному измельчению зерна, что также положительно сказывается на термостойкости металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кащенко Ф.Д., Фрумин И.И., Гордань Г.Н. Особенности износа прокатных валков и вопросы разработки наплавочных материалов. // Современные способы наплавки и их применение. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1982. – С. 24–29.
2. Кащенко Ф.Д. Совершенствование наплавки валков заготовочных станков // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавка деталей оборудования и энергетики. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1980. – С. 52–55.
3. Кондратьев И.А., Васильев В.Г., Дзыкович И.Я. Исследование структурной неоднородности наплавленного металла типа 35В9Х3СФ и ее влияние на работоспособность наплавленных прокатных валков // Автоматическая сварка. – 1996. – № 6. – С.17–20.

Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.В. Роор, С.Н. Старовацкая, В.Ф. Игушев
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ В СОСТАВЕ АЛЮМИНАТНО-ОСНОВНОГО ФЛЮСА НА КАЧЕСТВО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Проведены экспериментальные исследования влияния углеродфторсодержащей добавки во флюсе ОК Flux 10.71 при сварке стали 10ХСНД. Исследования показали принципиальную возможность повышения качества сварного соединения путем введения в состав керамического флюса углеродфторсодержащей добавки. Установлено, что при использовании добавки в количестве 4 и 6 % в алюминатно-основном флюсе ОК Flux 10.71 снижается общее содержание кислорода в шве, повышаются показатели механических свойств и ударная вязкость при отрицательной температуре. При введении добавки концентрация углерода в сварных швах остается на уровне основного металла.

Experimental study of the effect carbon-fluorine containing additives in flux ОК 10.71 for welding steel 10HSND. Studies have shown the fundamental possibility of improving the quality of the weld by the introduction of the ceramic flux carbon-fluorine containing additives. Found that by using an additive in a quantity of 4 and 6 % of aluminate-base flux ОК Flux 10.71 reduced total content of oxygen in the weld, in increase in the mechanical properties and impact viscosity at low temperatures. When introducing additives the carbon concentration in the welds remain at the base metal.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации госзаказа 7.5021.2011

Проведено исследование влияния введения углеродфторсодержащей добавки (с химическим составом, приведенным в таблице 1) в алюминатно-основной флюс ОК Flux 10.71 (с химическим составом, приведенным в таблице 2) по методике приведенной в работах [1-3].

Таблица 1 – Химический состав углеродфторсодержащей добавки

Компоненты	Al ₂ O ₃	F	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	C _{общ}	MnO	S	P
Содержание, %	32,1	18,78	9,9	0,44	1,47	15,6	2,27	19,27	0,049	0,06	0,07

Для анализа влияния, углеродфторсодержащую добавку вводили во флюс в количестве 4 и 6 %. За базовый вариант был принят образец, сваренный под флюсом ОК Flux 10.71 без добавки.

Таблица 2 – Химический состав флюса ОК Flux 10.71

Массовая доля элементов, %											
FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	S	P	C
2,63	6,38	10,88	18,72	15,71	25,99	2,02	0,02	16,22	0,71	0,03	0,71

Образцы из стали 10ХСНД (ГОСТ 6713-91) размером 200×500мм и толщиной 16 мм сваривались с двух сторон сварочным трактором АСАW-1250 с использованием сварочной проволоки марки Св-08ГА (ГОСТ 2246-70). Режимы сварки с одной стороны: сварочный ток $I_{св} = 650\text{А}$, напряжение на дуге $U_{д}=34\text{ В}$, скорость сварки $V_{св}=25\text{ м/ч}$, диаметр проволоки $d=4\text{ мм}$, и с другой стороны: $I_{св}=680\text{ А}$, $U_{д}=34\text{ В}$, $V_{св}=25\text{ м/ч}$. Определение химического состава металла сварных швов на содержание углерода, серы и фосфора проводили химическими методами по ГОСТ 12344-2003, ГОСТ 12345-2001, ГОСТ 12347-77 соответственно, на содержание марганца, кремния, хрома, никеля, меди в металле (таблица 4) и оксидов металлов во флюсах с добавками и полученных шлаках проводили на рентгенофлюорисцентном спектрометре XRF-1800 фирмы SHIMADZU. Химический состав металла сварных швов и шлаков приведен соответственно в таблицах 3, 5.

Таблица 3 – Химический состав сварных швов

Количество добавки, %	Состав сварных швов, %					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
Без добавки	0,084	0,63	0,87	0,34	0,42	0,30
ОК Flux 10.71 с 4% добавкой	0,103	0,64	0,91	0,35	0,41	0,31
ОК Flux 10.71 с 6% добавкой	0,109	0,66	0,83	0,37	0,45	0,31

Таблица 4 – Химический состав флюсов

Количество добавки, %	Состав флюсов, %											
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	S	P	C
4	2,64	6,58	9,66	18,94	16,22	26,52	2,22	0,04	15,84	0,06	0,04	1,24
6	2,84	6,19	9,56	18,72	17,03	24,42	2,85	0,04	15,54	0,17	0,03	2,60

Таблица 5 – Химический состав полученных после сварки шлаков

Количество добавки, %	Состав флюсов, %											
	FeO	MnO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	F	S	P	C
Без добавки	2,48	5,63	8,99	22,18	17,38	29,06	1,81	0,02	11,79	0,02	0,02	0,62
OK Flux 10.71 с 4% добавкой	2,65	5,81	8,67	22,81	16,94	27,89	2,19	0,04	11,82	0,04	0,02	1,11
OK Flux 10.71 с 6% добавкой	2,59	5,69	8,70	23,07	16,79	28,12	2,33	0,04	11,62	0,06	0,02	0,98

Металлографические исследования проводились на полированных микрошлифах с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при увеличении $\times 50$, которые показали, что введение углеродфторсодержащей добавки до 6 % во флюс OK Flux 10.71 не привело к структурным изменениям. На рисунках 1–4 приведены фотографии участков сварных швов. Структура металла удовлетворительная, зерно оценивается 9–10 баллом по ГОСТ 5639-82. В области сварных швов встречаются редкие включения экзогенного происхождения.

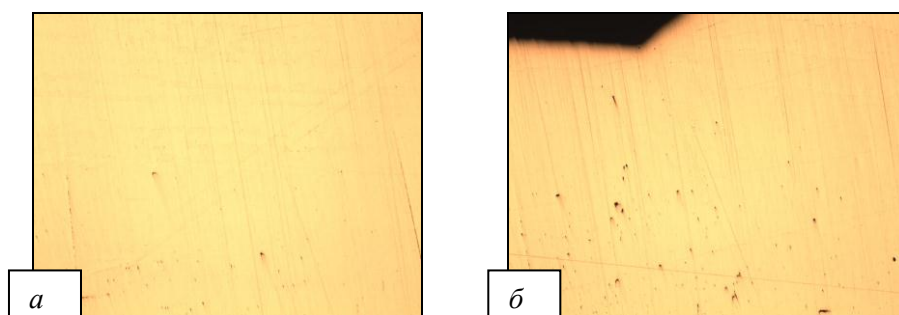


Рисунок 1 – Неметаллические включения в поверхностной зоне сварного шва с 4 % добавкой во флюс (а, б), $\times 50$

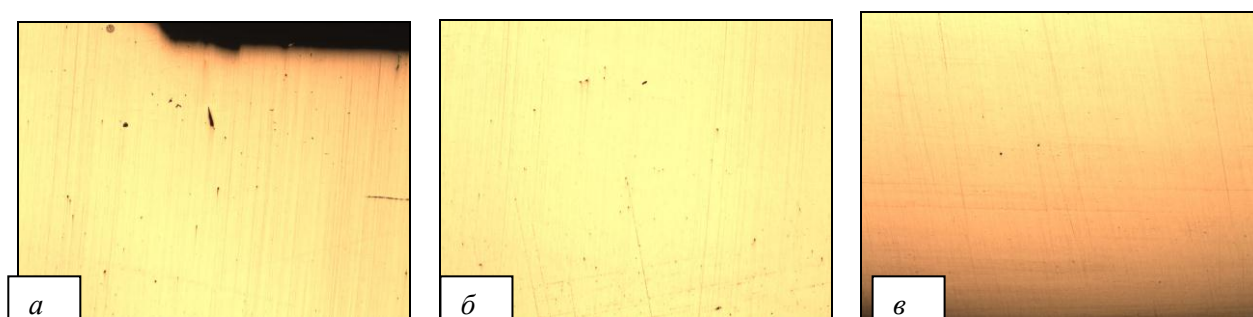


Рисунок 2 – Неметаллические включения в поверхностной зоне сварного шва с 6 % добавкой во флюс (а, б, в), $\times 50$

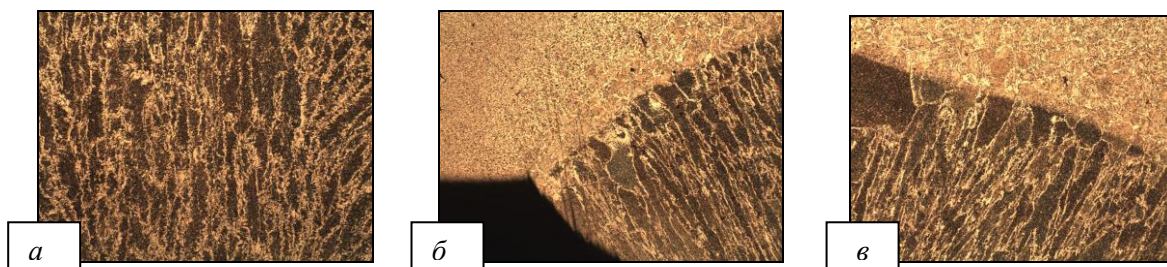


Рисунок 3 – Микроструктура металла при сварке с 4 % добавкой во флюс:
а, б, в – в зоне шва, $\times 50$

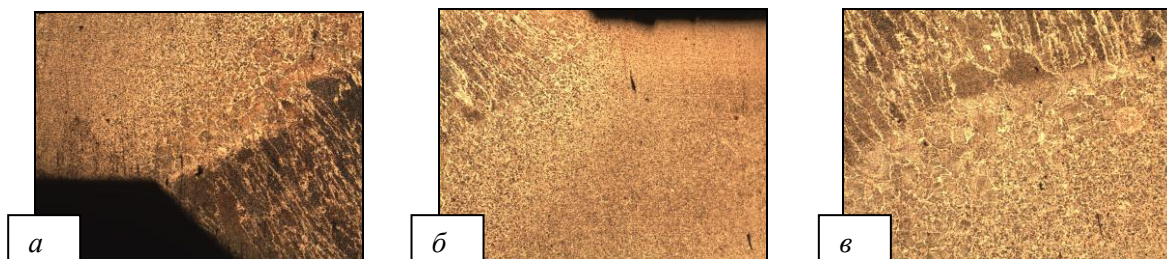


Рисунок 4 – Микроструктура металла при сварке с 6 % добавкой во флюс:
а, б, в – вблизи поверхности, в зоне шва, $\times 50$

В структуре основного металла присутствуют зерна феррита, перлит в стыках ферритных зерен. В переходной зоне от основного металла к наплавленному, наблюдается мелкозернистая структура. В зоне сварного шва наблюдается вырожденная микроструктура в виде вытянутых в направлении отвода тепла зерен.

Результаты испытаний по разрушающему контролю образцов, проведенных по ГОСТ 6996-66, показали увеличение значений ударной вязкости при отрицательной температуре (таблица 6), что, по-видимому, связано со снижением концентрации кислорода в сварном шве (рисунок 5). Замеры твердости осуществляли по схеме (рисунок 6) в основном металле, на границе сплавления и в металле шва.

Таблица 6 – Механические свойства сварных соединений

Сварка под флюсом	Механические свойства		Ударная вязкость сварного шва (КСУ), Дж/см ² (при $t = -70^{\circ}\text{C}$)
	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	
ОК Flux 10.71	559	34	30
ОК Flux 10.71 + 4 % добавки	581	30	53
ОК Flux 10.71 + 6 % добавки	591	28	76
Требования ГОСТ 6713-	≥ 530	≥ 19	≥ 29

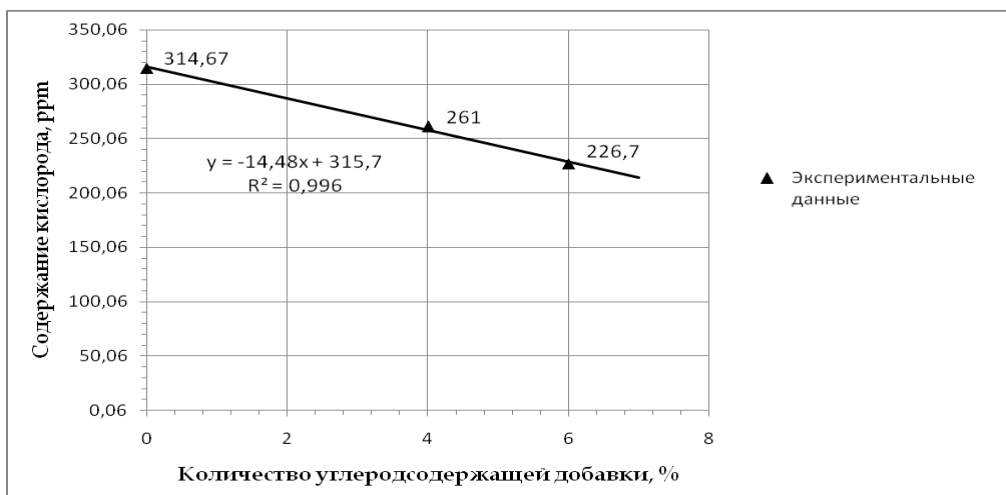


Рисунок 5 – Концентрация кислорода

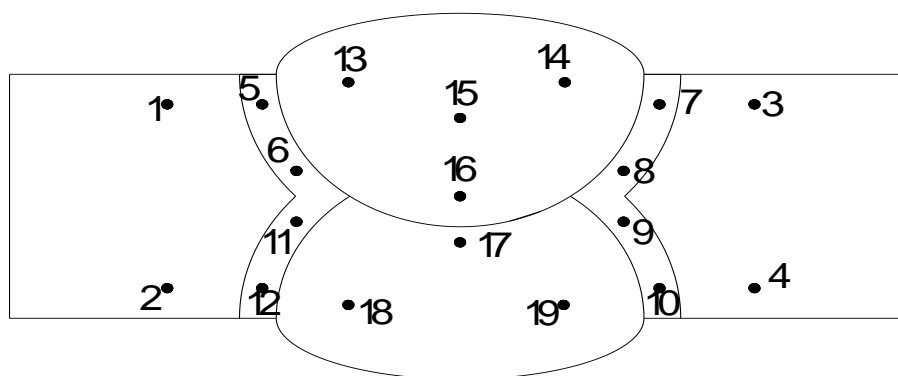


Рисунок 6 – Схема замера твердости в точках

Введение углеродфторсодержащей добавки во флюс не привело к повышению значений твердости (таблица 7) сварного шва и зоны термического влияния.

Таблица 7 – Показатели твердости металла в точках

Количество добавки	Твердость НВ в точках																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Основной металл				Зона термического влияния								Сварной шов						
ОК Flux 10.71	208	203	211	219	180	174	176	180	175	181	175	175	196	198	195	175	175	206	208
	210*				177*								193*						
ОК Flux 10.71 4 % добавки	197	198	210	213	183	169	180	167	161	173	168	182	196	198	195	168	173	206	208
	205*				173*								192*						
ОК Flux 10.71 6 % добавки	196	199	204	204	174	171	176	165	160	160	156	160	198	196	187	168	160	172	163
	201*				165*								178*						
* – среднее значение																			

Выводы. Установлено, что при введении углеродфторсодержащей добавки в количестве 4 и 6 % во флюс ОК Flux 10.71 при сварке стали 10ХСНД снижается общее содержание кислорода в шве, увеличивается комплекс требуемых механических свойств и ударной вязкости при отрицательных температурах (за счет уменьшения загрязненности сварного шва оксидными неметаллическими включениями), при этом концентрация углерода в сварных швах остается на уровне основного металла, не приводящая к росту твердости металла шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Голдун З.В., Крюков Р.Е., В.М. Шурупов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 10. – С. 35 – 38.
2. Влияние углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов на свойства сварных швов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Старовацкая С.Н., Крюков Р.Е., Голдун З.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 26 – 29.
3. Влияние флюса АН-60 с углеродфторсодержащей добавкой на качество сварных швов стали 09Г2С / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е., Старовацкая С.Н., Роор А.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 30 – 34.

УДК 621.791.92:621.771.07

Н.А. Козырев, Д.А. Титов, С.Н. Старовацкая, О.Е. Козырева,
В.М. Шурупов

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

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВВЕДЕНИЯ В ШИХТУ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПП-НП-25Х5ФМС УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ И НИКЕЛЯ

Проведены экспериментальные исследования влияния введения в порошковую проволоку типа ПП-Нп-25Х5ФМС углеродфторсодержащей добавки (отходов металлургического производства) и порошкообразного никеля. Введение в состав проволоки системы С–Si–Mn–Cr–V–Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля позволяет значительно снизить уровень загрязненности оксидными неметаллическими включениями наплавленного металла, измельчению зерна, а также способствует снижению объемной доли остаточного аустенита в наплавленном слое и образованию мелкодисперсных карбидов.

The experimental researches of influence of introduction in a powder wire of a type PP-Np-25X5FMS of the components containing carbon and a fluorine (of scraps of metallurgical production) and nickel are conducted.

На металлургических предприятиях России широко используется наплавка прокатных валков для восстановления и повышения стойкости. Несмотря на широкий спектр используемых систем для наплавки, широкое распространение получила система С–Si–Mn–Cr–V–Mo, которая позволяет получать наибольшее сопротивление термической усталости металла. Данная система, представленная порошковой проволокой типа ПП-Нп-25Х5ФМС, позволяет получать высокие значения ударной вязкости наплавленного металла при повышенных температурах. В результате лабораторных и опытно-промышленных исследований, авторы работы [1], рекомендуют для наплавки валков горячей прокатки использовать порошковые проволоки типа ПП-Нп-25Х5ФМС на обжимных (блюминг, слябинг), крупносортовых, рельсобалочных, средне- и мелкосортных, листопрокатных станах.

В лабораторных условиях были изготовлены образцы стандартной порошковой проволоки марки ПП-Нп-25Х5ФМС. Многослойную наплавку образцов производили с предварительным подогревом пластин до 350 °С и последующим (после наплавки) замедленным охлаждением. Наплавку проводили сварочным трактором ASAW-1250 с использованием изготовленной порошковой проволоки на пластины из стали 09Г2С в 5 слоев, режим наплавки:

сварочный ток $I_d=400$ А, напряжение на дуге $U_d = 32$ В, скорость сварки $v_n=0,8$ см/с.

При изготовлении проволоки содержание кремния, марганца, хрома, ванадия варьировалось гораздо шире значений для данных элементов, предусмотренных для проволоки ПП-Нп-25Х5ФМС в ГОСТ 26101-84. В состав ряда образцов проволоки ввели никель, а аморфный углерод заменили на углеродфторсодержащую пыль (отходы металлургического производства), со следующим химическим составом, масс. %: $Al_2O_3 = 21 - 46$; $F^+ = 18 - 27$; $Na_2O = 8 - 15$; $K_2O = 0,4 - 6$; $CaO = 0,7 - 2,3$; $SiO_2 = 0,5 - 2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1 - 3,3$; $C_{общ} = 12,5 - 30,2$; $MnO = 0,07 - 0,9$; $MgO = 0,06 - 0,9$; $S = 0,09 - 0,19$; $P = 0,10 - 0,18$. Дисперсность такого материала позволяет проводить хорошее смешение с металлической составляющей шихты порошковой проволоки. Проведенные ранее эксперименты по использованию данного материала в качестве добавки для сварочных флюсов показали, что углерод в составе углеродфторсодержащей пыли обладает повышенной активностью, раскисляет металл и восстанавливает оксиды, находящиеся в металле и шлаке с образованием оксидов углерода [2-5]. Для имитации окислительно-восстановительных процессов при наплавке использовали слабоокислительный флюс марки АН-67 по ГОСТ Р 52222-2004. Марганец в состав проволоки не добавлялся в связи с его восстановлением из образующегося шлака. Происходило частично восстановление кремния из шлака. Как показали эксперименты, образующийся шлак практически не окисляет легирующие элементы в составе наплавленного металла.

Химический состав наплавленного металла определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Металлографическое исследование микрошлифов проводилось с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при различных увеличениях после травления в спиртовом растворе азотной кислоты, а также в растворе плавиковой кислоты. Замеры твердости проводили ультразвуковым твердомером УЗИТ-3. Составы исследуемых порошковых проволок, твердость наплавленного металла и объемная доля остаточного аустенита в наплавленном слое приведены в таблице.

При использовании в качестве добавки аморфного графита в структуре наплавленного металла (образцы 1 и 2) присутствует мартенсит и остаточный аустенит в межосевом пространстве. Наблюдается значительное количество строчечных кислородных включений. Точечные карбиды ванадия и хрома распределены по телу зерен. Следует отметить, что введение более 3 % ванадия привело к значительному снижению твердости наплавленного металла.

Металлографический анализ показал, что структура металла, наплавленного опытной порошковой проволокой, представляет собой игольчатый троостит с мартенситом и сформированными по границам зерен отдельными тонкими аустенитными оторочками с незначительным количеством включений карбидов. Введение углеродфторсодержащей добавки в шихту проволоки способствовало удалению оксидных неметаллических включений, более рав-

номерному распределению углерода в металле шва и образованию мелкодисперсных карбидов, что на практике должно привести к повышению термической стойкости.

Таблица – Составы исследуемых порошковых проволок и твердость наплавленного металла

№	Массовая доля элементов, %											HRC (HB)	ОДА
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	W	V	Ti		
1	0,16	1,77	2,25	0,26	3,51	1,51	0,16	0,044	0,107	3,25	0,018	(186,2)	-
2	0,15	1,59	1,67	0,18	0,35	1,11	0,16	0,032	0,06	0,35	0,006	43,2	4,3
3	0,20	1,33	2,16	0,17	3,52	1,51	0,13	0,04	0,09	0,36	0,020	48,1	5,6
4	0,24	0,93	2,11	0,15	3,18	1,31	0,21	0,054	0,071	0,46	0,021	51,8	15,6
5	0,31	1,19	2,13	0,20	3,50	1,34	0,32	0,064	0,074	0,47	0,022	53,4	14,7
6	0,24	0,92	1,93	0,22	3,00	1,85	0,38	0,034	0,081	0,43	0,014	54,14	8,4

Примечание: 1) ОДА – объемная доля остаточного аустенита, 2) образец 1 и 2 – изготовлены с использованием графита аморфного; 3-6 – с применением углеродфторсодержащей пыли и порошка никеля при различных концентрациях.

Введенный в состав порошковой проволоки аустенитообразующий элемент – никель способствовал дополнительному измельчению зерна.

Таким образом, введение в состав проволоки системы C–Si–Mn–Cr–V–Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля позволяет значительно снизить уровень загрязненности оксидными неметаллическими включениями наплавленного металла, измельчению зерна, а также способствует образованию мелкодисперсных карбидов, что на практике должно привести к повышению термической стойкости прокатных валков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев И.А., Рябцев И.А., Кусков Ю.М. Дуговая и электрошлаковая наплавка валков прокатных станов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 4. – С. 14–17.

2. Влияние углеродфторсодержащих добавок для сварочных флюсов на свойства сварных швов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Старовацкая С.Н., Крюков Р.Е., Голдун З.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 26 – 29.

3. Использование углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Голдун З.В., Крюков Р.Е., В.М. Шурупов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 10. – С. 35 – 38.

4. Влияние флюса АН-60 с углеродфторсодержащей добавкой на качество сварных швов стали 09Г2С/ Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е., С.Н. Старовацкая, А.В. Роор // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 30–33.

5. Исследование влияния введения углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67 на свойства металла сварных швов стали 09Г2С/ Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е., Роор А.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 8. – С. 33–36.

УДК 621.74

И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.И. Куценко, А.А. Куценко, О.Г. Приходько
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

КОРРЕЛЯЦИЯ АКТИВНОСТИ С ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА В ЖИДКОМ И ТВЕРДОМ СОСТОЯНИЯХ

В статье рассмотрена связь термодинамического параметра активности с параметрами энергетического спектра связующих электронов металлических растворов системы Fe-X-C.

The article considers the relationship of the thermodynamic activity parameter to the parameters of the energy spectrum of electrons in metallic bonding solutions of Fe-X-C.

Параметр «термодинамическая активность» ввел Дж. Н. Льюис более 100 лет назад. Химический потенциал (μ_i) i -компонента в реальном растворе с тех пор записывается так

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i, \quad (1)$$

где μ_i^0 – химический потенциал в стандартном состоянии i -компонента, T – абсолютная температура, a_i – термодинамическая активность i -компонента.

Выражение (1) было написано по аналогии с уравнениями для химического потенциала идеальных растворов

$$\mu_i = \psi_i^0 + RT \ln C_i, \text{ (разбавленные растворы)} \quad (2)$$

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln N_i; \text{ (совершенные растворы)} \quad (3)$$

где C_i – концентрация, выраженная в любых единицах, N_i – мольная доля i -компонента, ψ_i^0 – постоянная, зависящая от температуры, имеющая смысл химического потенциала при концентрации, равной единице при условии, что раствор сохраняет свойства разбавленного.

Хотя введение параметра активности было формальным, оно оказалось полезным для дальнейшего развития теории растворов.

Используя активности, получатся соотношения, описывающие поведение реальных растворов, которые практичны и удобны для решения реальных задач. По этой причине понятие активности плодотворно и широко используют исследователи в металлургии, металловедении и других технологических направлениях. Кроме того, применение активности позволяет накопить и обобщить экспериментальные данные, которые необходимы для развития и создания единой физической природы металлических растворов (жидких и твердых). Использование активности дает оценку отклонений в поведении растворов от идеальности, что указывает на характер межчастичного взаимодействия в реальных системах.

Квазихимическая трактовка отклонений реального раствора от идеальности состоит в следующем. При отрицательных отклонениях в растворе должны возникать упорядоченные фазы, когда энергия связи между разноименными атомами A и B (ϵ_{A-B}) будет подчиняться соотношению

$$\epsilon_{A-B} > \frac{1}{2} [\epsilon_{A-A} + \epsilon_{B-B}], \quad (4)$$

где ϵ_{A-A} , ϵ_{B-B} – энергия связи между одноименными атомами, т.е. растворы образуются с выделением тепла.

Положительные отклонения описываются таким же выражением, но с противоположным знаком

$$\epsilon_{A-B} < \frac{1}{2} [\epsilon_{A-A} + \epsilon_{B-B}], \quad (5)$$

при этом раствор образуется с поглощением тепла при высоких температурах, когда энтропийный член в выражении свободной энергии достигает больших отрицательных значений. С понижением температуры при кристаллизации компонент, вызывающий положительные отклонения от закона Рауля, будет стремиться с большой вероятностью выделиться в самостоятельную фазу.

В работах [1, 2] показано, что в чугунах вероятность выделения углерода в самостоятельную фазу при кристаллизации определяется взаимным расположением уровней Ферми легированного железоуглеродистого раствора и графита. На рисунке 1 дана схема уровней Ферми (ϵ_f) двух фаз, находящихся в контакте при кристаллизации.

Если легирующий элемент повышает уровень Ферми Fe-C раствора, т.е. уменьшает разность $\Delta\epsilon_{f12}$, то элемент обладает графитизирующей способностью. И, наоборот, компонент, понижающий уровень Ферми раствора, увеличивающий разность $\Delta\epsilon_{f12}$, будет отбеливать чугун. При кристаллизации будет

образовываться упорядоченная фаза Fe_3C . На рисунках (2, 3, 4) показано изменение абсолютной термоЭДС систем Fe-X-C серых чугунов и глубина отбела чугуна, при его легировании.

Абсолютная термоЭДС (α) в сплавах переходных металлов связана с уровнем Ферми ϵ_f зависимостью [3]

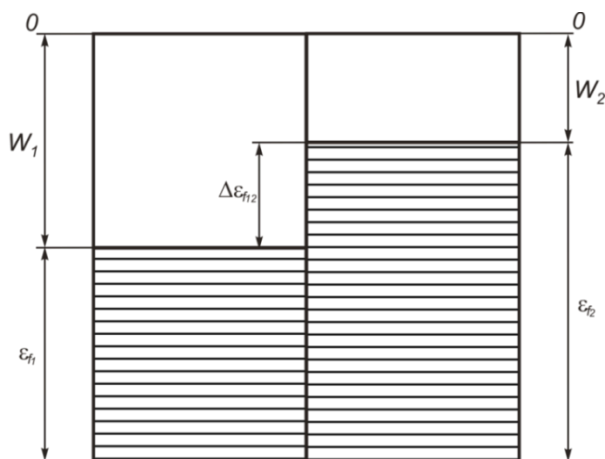


Рисунок 1 – Схема расположения энергетических уровней электронов контактирующих фаз: ϵ_f – уровень Ферми, W – работа выхода электрона; индексы: 1 – Fe-X-C расплав (сплав), X – легирующий элемент; 2 – кристалл зародыша графита

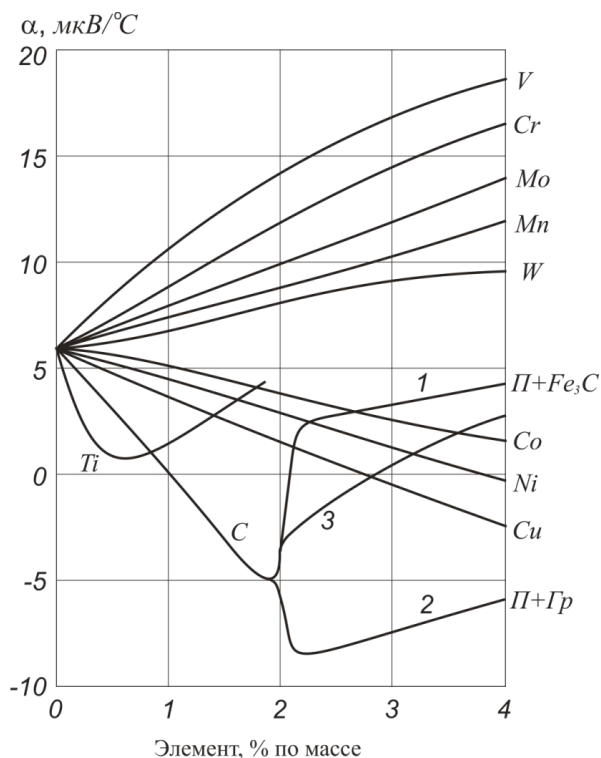


Рисунок 2 – Абсолютная термо ЭДС сплавов железа при средней температуре $45^\circ C$: П – перлит, Гр – графит [5, 6]

$$\alpha = -\frac{\pi^2 k_B^2}{3e} \cdot T \cdot \left[\frac{3}{2\varepsilon_f} - \left(\pm \frac{1}{2\Delta\varepsilon} \right) \right], \quad (6)$$

где k_B – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, T – абсолютная температура, $\Delta\varepsilon$ – расстояние уровня Ферми от нижнего или верхнего края d-зоны (рисунок 5).

Второй член в квадратных скобках $\left(\pm \frac{1}{2\Delta\varepsilon} \right)$ в формуле (6) имеет положительный знак, если d-зона заполнена ниже середины и отрицательный, если d-зона заполнена выше середины.

С ростом уровня Ферми расстояние $\Delta\varepsilon$ от верхнего края d-зоны уменьшается, знак слагаемого $\left(\frac{1}{2\Delta\varepsilon} \right)$ становится отрицательным и α увеличивается к отрицательным значениям. Если уровень Ферми уменьшается, расстояние по шкале энергии $\Delta\varepsilon$ от нижнего края d-зоны сокращается. Знак члена $\left(\frac{1}{2\Delta\varepsilon} \right)$ в выражении (6) становится положительным, и абсолютная термо ЭДС растет в положительную сторону.

Металлургические растворы сплавов железа относятся к классу многокомпонентных. Атомы других металлов, образуя твердые или жидкие растворы с железом, отдают свои валентные электроны в общий коллектив свободных электронов решетки.

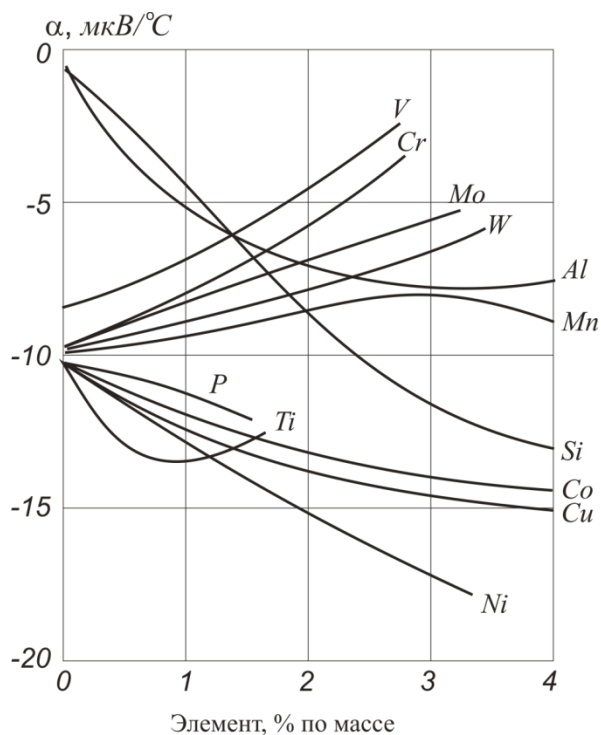


Рисунок 3 – Абсолютная термо ЭДС серых легированных чугунов при средней температуре 45 °С [5, 6]

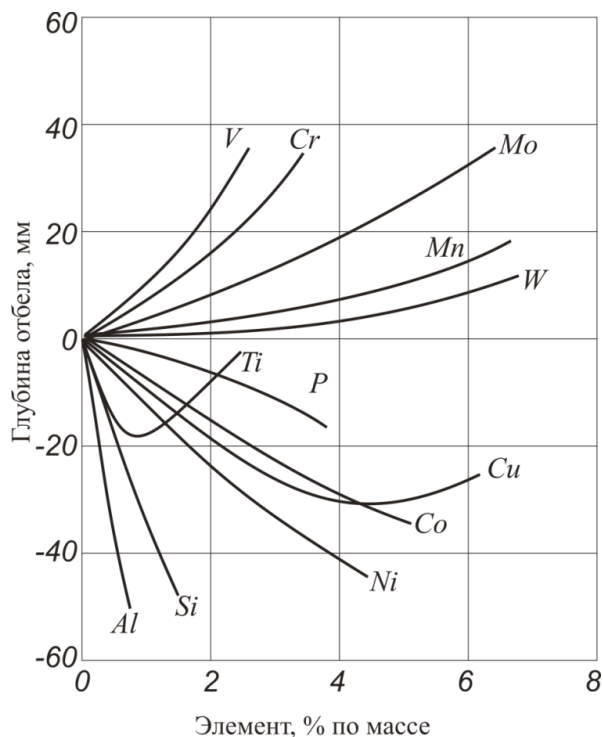


Рисунок 4 – Влияние элементов на глубину отбела серого чугуна [5, 6]

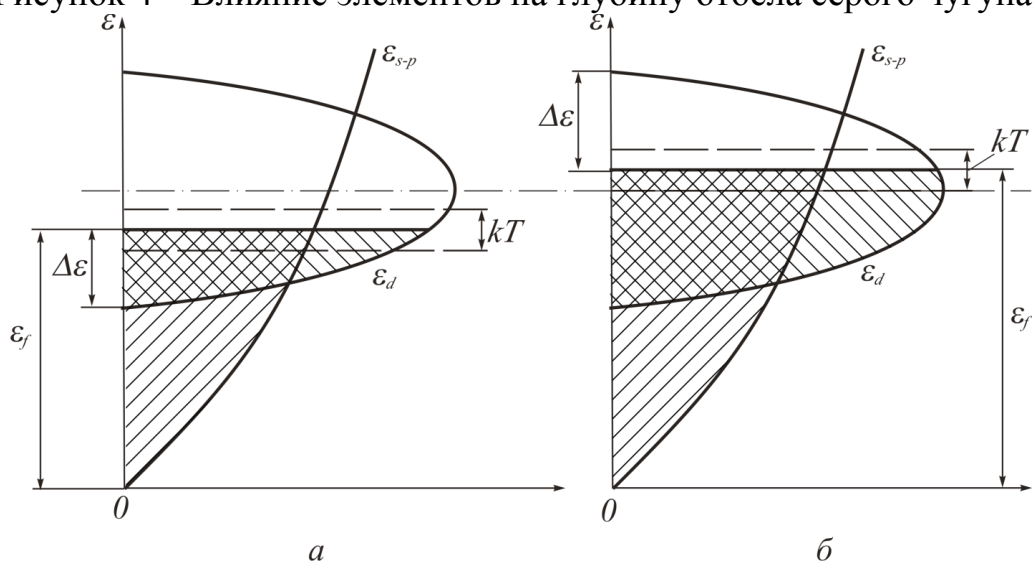


Рисунок 5 – Структура энергетических полос переходных металлов и сплавов: *a* – d-зона заполнены ниже середины, *б* – d-зона заполнены выше середины; ϵ_f – уровень Ферми, $\Delta\epsilon$ – расстояние по шкале энергий от уровня Ферми до края d-зоны, kT – энергия тепловых электронов интервала kT , $\epsilon_{s-p} = \frac{\hbar k_{s-p}^2}{2m_{s-p}^*}$ – энергия электронов в s-p-зоне, $\epsilon_d = \frac{\hbar k_d^2}{2m_d^*}$ – энергия электронов в d-зоне, \hbar – постоянная Планка, \mathbf{k} – волновой вектор, k – постоянная Больцмана, m_{s-p}^* , m_d^* – эффективная масса электрона в s-p и d-зонах

Влияние на уровень Ферми сплавов железа других переходных металлов сводится к следующему [4]:

1. В результате сплавления одного металла переходной группы с другим форма d-полосы не претерпевает существенных изменений.

2. Образование твердых растворов сопровождается полным обобществлением всех внешних (s+d) электронов со стороны атомов обоих компонентов, а, следовательно, лишь изменением электронной концентрации в обобществленной полосе.

3. Переход от одного элемента к соседнему в сторону увеличения атомного номера сопровождается увеличением числа электронов на единицу, d-полоса постепенно заполняется, растет и граница Ферми.

4. Переход от одного типа кристаллической структуры к другому не вносит существенных изменений в главные черты зонной структуры энергетической (s+d) полосы.

Данные выводы о структуре (s-d) зон сплавов переходных элементов сделаны на основе анализа измерений парамагнитной восприимчивости в широком интервале температур, рентгеновских спектров испускания и поглощения, точек перехода в сверхпроводящее состояние. Они подтверждаются и нашими исследованиями термо ЭДС сплавов железа с переходными металлами (рисунки 2, 3). Элементы, стоящие слева от столбца железа в периодической таблице увеличивают термо ЭДС сплава, уровень Ферми которого уменьшается, и, наоборот, элементы, имеющие больше (s+d) электронов чем железо, повышают уровень Ферми и уменьшают термо ЭДС сплава. Алюминий и кремний, имеющие только внешние s-p-электроны, при концентрациях до 4...6 % (по массе) отдают свои валентные электроны только в общую (s-p)-зону сплава, уровень Ферми которого повышается, термо ЭДС понижается (рисунок 3).

Углерод, отдавая внешние s-p-электроны в обобществленную s-p-полосу железа, уменьшает термо ЭДС (рисунок 2), увеличивая уровень Ферми сплава в области концентраций до 2 % углерода. При концентрации углерода выше 2 % (область чугунов) значения термо ЭДС расщепляются. В закаленных образцах, при кристаллизации образуется упорядоченная фаза Fe₃C (цементит) на основе решетки γ -раствора (аустенита). Термо ЭДС резко возрастает в положительную сторону (кривая 1), как и в сплавах Fe-Al(Si)-C (рисунок 7). В медленно охлажденных сплавах (Si=0,98...1,05 %) чугун кристаллизовался с образованием свободного углерода в виде пластинчатого графита, термо ЭДС серого чугуна уменьшается, растет к отрицательным значениям (кривая 2, рисунок 2).

Факт повышения термо ЭДС при образовании упорядоченных фаз в сплавах отмечается всеми исследователями [7, 8]. В сплавах Cu-Zn (до 22 ат. % Zn), которые имеют ближний порядок в расположении разноименных атомов значение термо ЭДС $\alpha=36$ мкВ/°С; после холодного наклепа (90 %), когда разрушается ближний порядок, α падает до 0,08 мкВ/°С.

Аналогично, по этой же причине частичного разрушения и искажения связей в упорядоченной фазе время отжига белых чугунов на ковкий, после холодной пластической деформации, когда разрушается порядок в фазе Fe_3C , сокращается в 5...10 раз [9].

Уровень Ферми сплава после разрушения упорядоченного расположения атомов повышается, зарождение графита на контактной поверхности аустенита энергетически облегчается за счет уменьшения контактной разности потенциалов соприкасающихся фаз. На рисунке 2 (кривая 3) показано изменение термо ЭДС деформированных четырех образцов белого чугуна.

Сравнение рисунков 2, 3, 4 с рисунком 6, на котором показана зависимость коэффициента активности (f_c) углерода в Fe-X-C растворе от содержания легирующего элемента (X), показывает очевидную корреляцию хода кривых на вышеприведенных рисунках.

Расчет f_c , представленный в виде рисунка 6, выполнен по общепринятой методике [10]. Коэффициент активности углерода в двойном расплаве Fe-C определяется из соотношения: $lg f_c = \varepsilon_c^C [\% C]$, где ε_c^C – параметр взаимодействия углерода первого порядка, $[\% C]$ – % углерода по массе. Для тройной системы Fe-X-C: $lg f_c = \varepsilon_c^C [\% C] + \varepsilon_c^X [\% X]$, где ε_c^X – параметр взаимодействия первого порядка углерода с легирующим элементом, $[\% X]$ – % легирующего элемента по массе. В таблице 1 приведены значения ε_c^C и ε_c^X при 1600 °C [10].

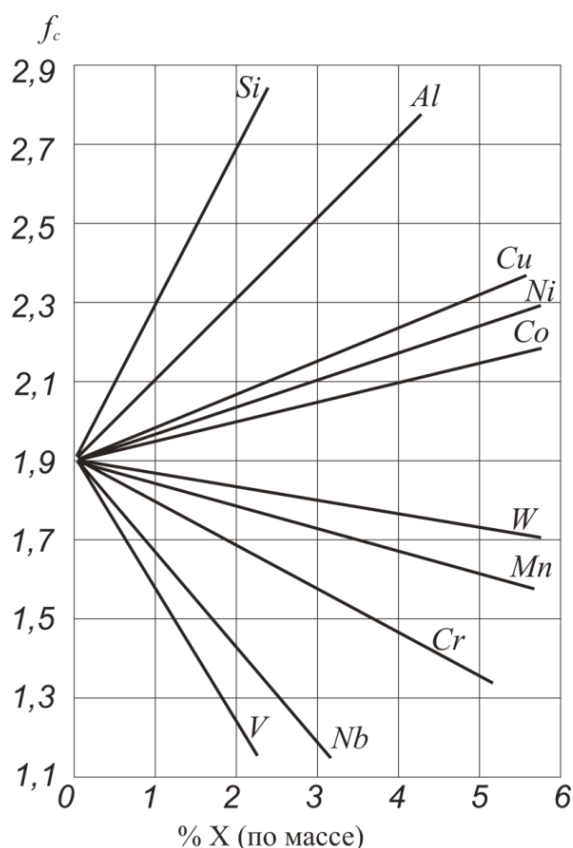


Рисунок 6 – Влияние легирующих элементов на коэффициент активности углерода в жидком железе при 1600 °C; ([C]=2,0 %); X – легирующий элемент

На рисунках 7, 8, 9 дано изменение абсолютной термо ЭДС Fe-Al (Si)-С сплавов при 45 °С, и Fe-Al (Si) сплавов при высоких температурах в широком диапазоне концентраций [5, 6].

Таблица 1 – Значения ε_c^C и ε_c^X при 1600 °С [10]

ε_c^C	ε_c^{Al}	ε_c^{Si}	ε_c^{Cu}	ε_c^{Ni}	ε_c^{Co}
0,14	0,043	0,08	0,024	0,012	0,008
ε_c^O	ε_c^V	ε_c^{Nb}	ε_c^{Cr}	ε_c^{Mn}	ε_c^W
-0,34	-0,077	-0,06	-0,024	-0,012	-0,006

Данные опыта показали, что термо ЭДС сплавов с углеродом и без имеют аналогичный вид. Отличие заключается в сглаживании кривой термо ЭДС при растворении в сплаве Fe-Al (Si) углерода. Особенно это заметно при концентрациях (4...6) % Al в сплавах с алюминием. Так в двойных сплавах $\alpha \approx 25$ мкВ/°С, в тройных $\alpha \approx 13$ мкВ/°С в пределах названных концентраций. Для сплавов с кремнием изменения термо ЭДС выражены менее интенсивно при насыщении растворов углеродом. Выше 6 % во всех сплавах наблюдается рост термо ЭДС в положительную сторону, что связано с постепенным усилением неметаллического (ионно-ковалентного) характера связи между атомами Fe и Al (Si) с образованием сверхструктур FeSi, FeAl, Fe₃Si, Fe₃Al и Fe₅Si₃. Углерод, образуя фазы внедрения в этих структурах, мало изменяет их термоэлектрические свойства. Рост термоЭДС к положительным значениям всегда наблюдается при возникновении в сплавах дальнего порядка в расположении разноименных атомов [9, 10]. Появление локализованных состояний на уровне Ферми приводит к возрастанию плотности состояний $dv(\varepsilon)$ на уровне Ферми $(\varepsilon)_{\varepsilon_f}$ и особенно к резкому возрастанию производной $\left. \frac{dv(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon_f}$ (рисунок 10).

Джонс [11] показал, что для случая резкого повышения производной $\frac{dv(\varepsilon)}{d\varepsilon}$ на уровне Ферми абсолютную термоЭДС можно представить в виде формулы

$$\alpha = -\frac{\pi^2 k_B^2}{3e\varepsilon_f} \cdot T \cdot \left[\frac{7}{2} - \frac{\varepsilon}{v(\varepsilon)} \cdot \frac{dv(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right]_{\varepsilon=\varepsilon_f}, \quad (7)$$

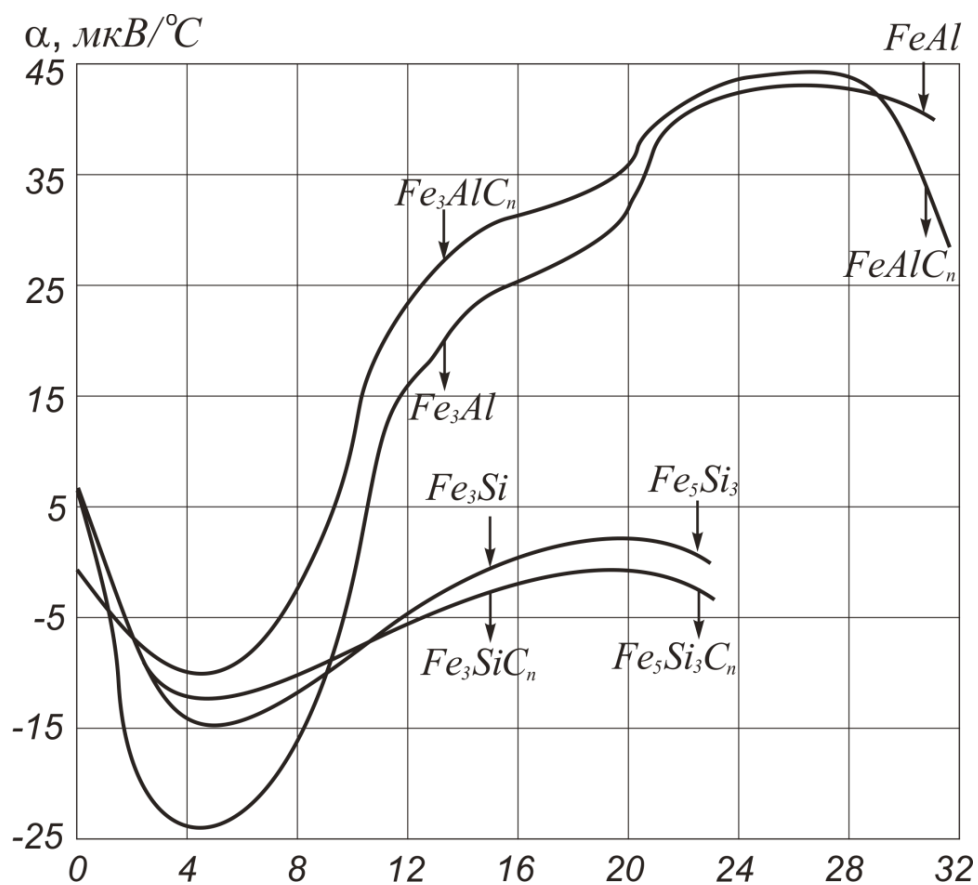


Рисунок 7 – Абсолютная термоЭДС Fe-Al (Si) и Fe-Al (Si)-C сплавов при 45 °С [5, 6]

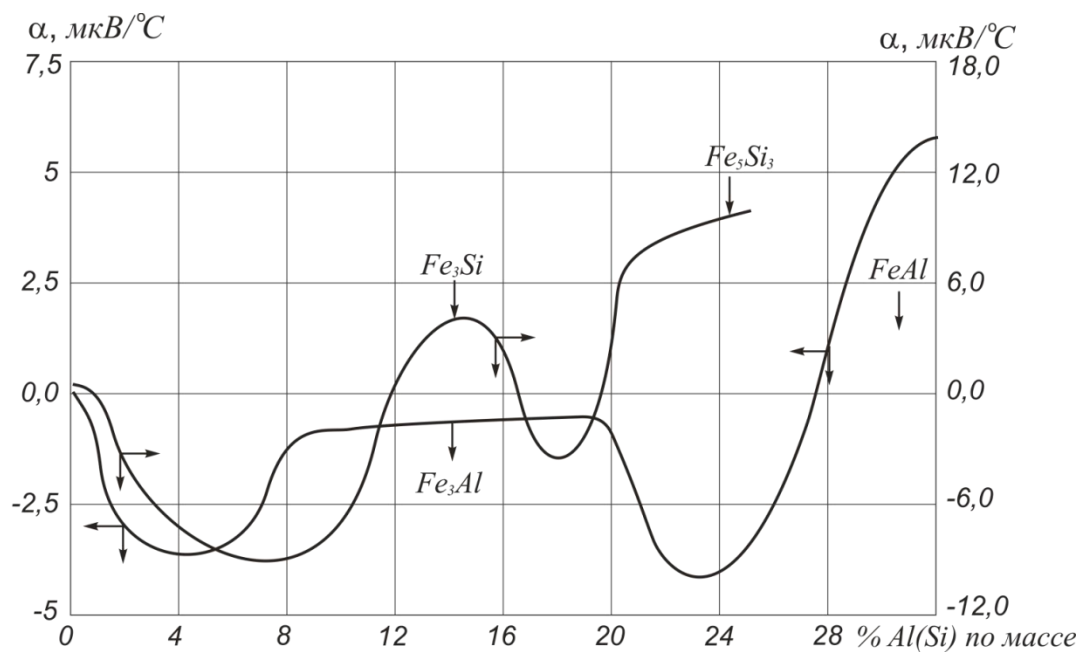


Рисунок 8 – Абсолютные термоЭДС Fe-Si сплавов при 900 °С и Fe-Al сплавов при 1270 °С [5, 6]

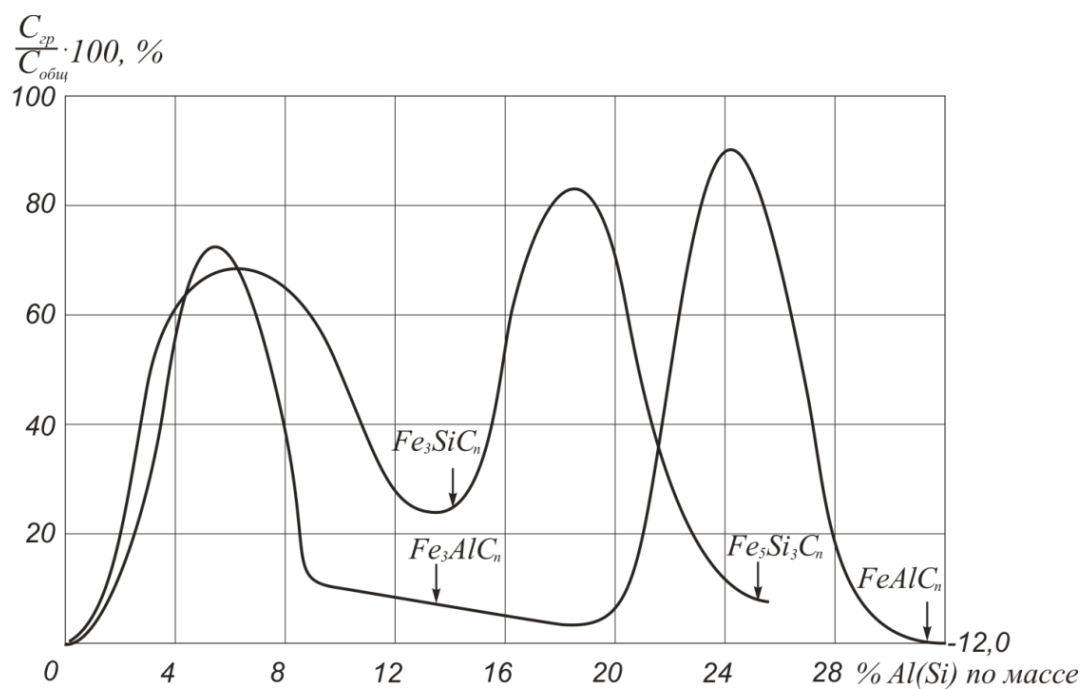


Рисунок 9 – Влияние кремния и алюминия на графитизацию чугунов [5, 6]: $C_{общ}$, $C_{гр}$ – процентное содержание углерода общее в сплаве и в свободном состоянии в виде графитовых включений

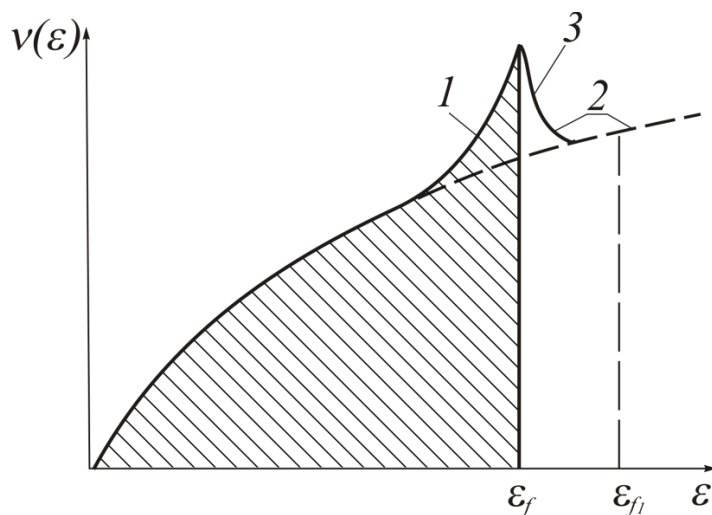


Рисунок 10 – Схема зависимости плотности электронных состояний $v(\epsilon)$ от энергии при образовании локализованных состояний на уровне Ферми (1) и в модели свободных электронов (2), 3 – не заполненные локализованные состояния

$$\left. \frac{dv(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_f}$$

При больших значениях α приобретает положительные значения. При высоких температурах локализованные связи между атомами вдали от стехиометрического состава сверхструктур $\text{Fe}_3\text{Al}(\text{Si})$, FeAl , Fe_5Si_3 частично разрушаются, электроны вновь заполняют свободные состояния в параболической s-p-зоне, уровень Ферми растет от значения ε_f до ε_{f1} (рисунок 10), но производная плотности состояний понижается до значений, характерных для модели свободных электронов. Абсолютная термоЭДС при частичном разрушении дальнего порядка в сплавах понижается (рисунок 8). Повышение уровня Ферми при разрушении локализованных связей приводит к выпадению свободного углерода в виде графитовых включений при кристаллизации Fe-Al (Si)-C сплавов в области концентраций далеких от стехиометрического состава сверхструктур (рисунок 9). При кристаллизации в области вышеназванных концентраций локализованные связи разрушаются за счет тепловых колебаний атомов. Данные связи возникают только при последующем понижении температуры сплавов.

Следует отметить, что в предлагаемой работе проводится корреляция термодинамических свойств (активности) жидких растворов с физическими свойствами (термоЭДС) твердых растворов системы Fe-X-C. Такая близость свойств жидких и твердых металлических систем подчеркивается многими исследователями [12]. Исходя из этого, считается, что закономерности концентрационного изменения активности углерода в твердом растворе могут быть использованы для объяснения более сложного вопроса о поведении углерода в жидких расплавах.

Выводы: Активность компонента в растворе связана с его влиянием на уровень Ферми сплава. С повышением ε_f при растворении X компонента в сплаве наблюдаются положительные отклонения, если компонент понижает уровень Ферми расплава, то реализуются отрицательные отклонения от поведения идеальных растворов. Следует отметить, что в работе рассмотрено влияние термодинамических факторов на поведение углерода в Fe-X-C-растворах. Интенсивность графитизации в чугунах, морфология графитовых включений также будет определяться кинетикой процесса и изменением контактной разности потенциалов между зародышем и расплавом при адсорбции на поверхности включения поверхностно-активных элементов и соединений [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Куценко А.И. и др. Влияние контактной разности потенциалов на зародышевание в металлических расплавах // Литейщик России. 2012. № 10. С. 22, 23.

2. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Куценко А.И. и др. Влияние зонной структуры металлических расплавов на интенсивность зародышеобразования новой фазы. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 23–26.
3. Коломеец Н.В., Ведерников М.В. Термоэлектрические свойства ферромагнитных металлов и их сплавов. // ФТТ. 1961. Т. 3. № 9. С. 2735–2737.
4. Немнонов С.А. Зонная структура энергетического спектра переходных металлов и сплавов по данным различных методов исследования. // ФММ. 1967. Т. 24. №1: С. 1016–1021.
5. Храпов А.Я., Селянин И.Ф. О механизме графитизации чугунов с точки зрения зонной теории // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 2. С. 132, 133.
6. Селянин И.Ф. Термоэлектрические и термомагнитные свойства синтетических чугунов в зависимости от концентрации графитизирующего и отбеливающего элемента. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новокузнецк, 1968. – 134 с.
7. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
8. Блат В. Шредер П, Фойлз К. и др. Термоэлектродвижущая сила металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
9. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Л.: Машиностроение, 1966. – 562 с.
10. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.
11. Лухвич А.А. Влияние дефектов на электрические свойства металлов. Минск: Наука и техника, 1976. – 100 с.
12. Физико-химические основы металлургических процессов / А.А. Жуховицкий, Д.К. Белащенко, Б.С. Бокштейн и др. – М.: Металлургия, 1973. – 392 с.
13. Селянин И.Ф., Куценко А.И., Деев В.Б. и др. Модифицирующая способность ультрадисперсных включений на основе теории свободных электронов. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 27–30.

И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, В.Б. Деев, А.А. Куценко
 ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
 университет», г. Новокузнецк

ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛ СЛЭТЕРА В КООРДИНАТНОМ И ОБРАТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В статье рассмотрено действие потенциала Слэтера на валентные электроны атома.

The paper considers the potential effect of Slater on the valence electrons of an atom.

Имеется большая свобода выбора формы псевдопотенциала в аналитическом виде. Любому выбору будут отвечать правильные собственные значения энергии, если только будет найдено точное решение уравнения Шредингера с псевдопотенциалом. Фактически оно решается лишь во втором порядке теории возмущений по псевдопотенциалу.

Так в работе [1] незранированный потенциал отдельного иона записывается в виде суммы:

$$v^0(\bar{r}) = -\frac{ze^2}{r} + \beta\delta(\bar{r}), \quad (1)$$

где β – параметр при δ -функции; $v^0(\bar{r}) = -ze^2/r$ – незранированный кулоновский потенциал.

Фурье преобразование потенциала (1) имеет вид:

$$v^0(q) = \frac{1}{\Omega_0} \int d\bar{r} \left(-\frac{ze^2}{r} + \beta\delta(\bar{r}) \right) e^{-i\bar{q}\bar{r}} = -\frac{4\pi ze^2}{q^2 \Omega_0} + \frac{\beta}{\Omega_0}, \quad (2)$$

где Ω_0 – атомный объем, q – волновой вектор.

Самосогласованный псевдопотенциал получается путем деления $v^0(q)$ на диэлектрическую проницаемость свободного электронного газа $\epsilon(q)$.

$$v(q) = \frac{v^0(q)}{\epsilon(q)} = \left(-\frac{4\pi ze^2}{q^2 \Omega_0} + \frac{\beta}{\Omega_0} \right) / \epsilon(q), \quad (3)$$

Подбирая параметр β в (3), можно удовлетворительно описать многие физические свойства простых металлов.

Выражение (1) описывает притяжение на больших расстояниях от ионной оболочки атома в виде незранированного кулоновского потенциала и отталкивание внутри ионной оболочки в виде члена $v_2(\mathbf{r}) = \beta\delta(\bar{\mathbf{r}})$.

Потенциал, включающий член притяжения и член отталкивания был предложен намного раньше до зарождения и развития теории псевдопотенциала Дж. Слэтером [2] для определения волновых функций и уровней энергии в многоэлектронных атомах.

Потенциал дается выражением:

$$v^0(\mathbf{r}) = -\frac{z^*e^2}{r} + \frac{n^*(n^* - 1)}{2r^2}, \quad (4)$$

где z^*, n^* – эффективные заряды ядра и главное квантовое число, которое определяются по специальным правилам.

Покажем, что псевдопотенциал, вычисленный на основе (4), не хуже тех потенциалов, которые были предложены намного позже.

Вычислим Фурье-образ потенциала (4), используя свойства преобразования Фурье: $v'(\mathbf{r}) \doteq qv(\mathbf{q})$ [3], где $v'(\mathbf{r})$ – производная от потенциала $v_2^0(\mathbf{r}) = \frac{n^*(n^*-1)}{2r}$; $v_2^{0'}(\mathbf{r}) = \frac{n^*(n^*-1)}{r}$; следовательно:

$$\begin{aligned} v^0(\mathbf{q}) &= v_1^0(\mathbf{q}) + v_2^{0'}(\mathbf{q}) = \\ &= \int \left(-\frac{ze^2}{r} + \frac{n^*(n^* - 1)}{2r^2} \right) e^{-i\bar{\mathbf{q}}\bar{\mathbf{r}}} d\bar{\mathbf{r}} = -\frac{4\pi z^*e^2}{\Omega_0 q^2} + \frac{4\pi n^*(n^* - 1)q}{\Omega_0 q^2 2} = \\ &= \frac{4\pi}{\Omega_0} \left[-\frac{z^*e^2}{q^2} + \frac{n^*(n^* - 1)}{2q} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

Полная зависимость $v(\mathbf{q})$ от волнового вектора q , как это принято в теории псевдопотенциала, дается выражением [1]:

$$v(\mathbf{q}) = \frac{v^0(\mathbf{q})}{\epsilon_H(\mathbf{q})}, \quad (6)$$

где $\epsilon_H(\mathbf{q})$ – диэлектрическая проницаемость Хартри свободного электронного газа, равная:

$$\epsilon_H(\mathbf{q}) = 1 + \frac{\lambda^2}{q^2} x \left(\frac{q}{2k_f} \right), \quad (7)$$

$$\lambda^2 = \frac{4\pi ze^2}{\Omega_0} \left(\frac{2}{3} \epsilon_f \right), \quad (7.1)$$

где λ^{-1} – длина экранирования Томаса-Ферми; ε_f, k_f – энергия и волновой вектор Ферми.

В выражении (7) сделаем обозначение $y = \frac{q}{2k_f}$, тогда характеристическая функция $\left[x\left(\frac{q}{2k_f}\right) \right]$ примет упрощенный вид [4]:

$$x(y) = \frac{1}{2} + \frac{1-y^2}{4y} \ln \left| \frac{1+y}{1-y} \right|, \quad (8)$$

Свойства функции $x(y)$: $0 < y \lesssim 0,9$ $x(y)=1$; $x(1)=0.5$ и при $y \gg 1$ $x(y) \rightarrow 0$.

Потенциал Слэтера (4) содержит дальнедействующий кулоновский член $v_1(r) = -z^*e^2/r$, его Фурье-образ равен $v_1^0(q) = -4\pi z^*e^2/q^2$.

Дальнодействие потенциала $v_1^0(r)$ соответствует его асимптотике при $r \rightarrow \infty$, следовательно в обратном Фурье-пространстве поведение $v_1^0(q)$ нужно исследовать при $q \rightarrow 0$.

В данном предельном случае функция $x\left(\frac{q}{2k_f}\right) = x(0) = 1$. Поэтому диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(q)_H$ стремится к бесконечному значению по Томасу-Ферми:

$$\varepsilon(q)_H = 1 + \frac{\lambda^2}{q^2}, \quad (9)$$

что следует из (7) при $x(0)=1$.

Предельное значение псевдопотенциала равно:

$$v(q)_{q \rightarrow 0} = -\left(\frac{4\pi z^*e^2}{\Omega_0 q^2}\right) / \left(1 + \frac{\lambda^2}{q^2}\right)^2 = -\frac{4\pi z^*e^2}{\Omega_0} \frac{1}{\lambda^2}, \quad (10)$$

Подставляя λ^2 из (7.1) имеем:

$$v(0) = -\frac{2}{3} \varepsilon_f, \quad (11)$$

Что совпадает с минимальным значением псевдопотенциала при $q \rightarrow 0$ для потенциалов, которые имеют в прямом пространстве кулоновскую составляющую [4].

Для расчета $x\left(\frac{q}{2k_f}\right)$ по (8), $\varepsilon_H(q)$ по (7), $v(q)$ по (6) необходимо знать точные значения эффективного заряда ядра z^* и эффективного значения квантового числа n^* , которые могли бы дать значение псевдопотенциала (6), способного описать реальные физические свойства металлов: тип кристалличе-

ской решетки, равновесный атомный объем, электрическое сопротивление в жидком состоянии и т.п.

Предложено много выражений для потенциалов в прямом пространстве: потенциал пустого остова Ашкрофта, модельные потенциалы Абаренкова, Анималу-Хейне, Архипова Р.Г. [9, 10] и т.п. Все эти псевдопотенциалы имеют подгоночные параметры, которые определяются из экспериментальных данных. Так параметры псевдопотенциала подгоняются под данные по эффекту де Гаазе-Ван-Альфена, т.е. по форме поверхности Ферми металла, под вид фоновых спектров, под значения электросопротивления твердых металлов при высоких температурах и т.п.

Параметры z^* и n^* по Слетеру определяются по соответствующим правилам с таким подбором, чтобы было равенство полной энергии многоэлектронного атома, рассчитанной методом Хартри (ϵ_H) и суммой одноэлектронных энергий вида $\epsilon_i = -\frac{z_i^{*2}}{2n_i^{*2}}$, т.е. $\epsilon_H = -\sum_i \frac{z_i^{*2}}{2n_i^{*2}}$, где ϵ_i – одноэлектрон-

ный уровень энергии.

В методе псевдопотенциала Слэтера, на основе которого необходимо, с желаемой точностью, рассчитывать термодинамические и физические свойства конденсированного состояния вещества, требуется другой подход к определению z^* и n^* . Следуя методологии теории псевдопотенциала, для определения подгоночных параметров z^* и n^* необходимо привлечь экспериментальные данные. В работах [5, 7] методика определения z^* и n^* представлена в рамках модели постоянной электронной плотности (ПЭП). В приближении ПЭП параметры z^* и n^* вычисляются по соответствующим формулам, исходя из экспериментальных значений потенциалов ионизации (J) и межатомных расстояний (R_{ab}) в двухатомных молекулах [6] или расстоянии между ближайшими соседями (R_{ab}) в кристаллической решетке металла [8]. Используя псевдопотенциал Слэтера [4] и соответствующие ему волновые функции (ВФ), рассчитаны энергии связи молекул H_2 , Li_2 , Na_2 , K_2 , Rb_2 , Cs_2 [6] и всех щелочных металлов [8].

В таблице 1 приведены расчетные параметры псевдопотенциала Слэтера. Эффективные числа z^* и n^* (строки 1 и 2) взяты из работы [8].

В таблице 1 значение q_0 (строка 3) определялось из (5) при $v(q_0) = 0$; q_{max} (строка 4) из (5) при $dv(q)/dq = 0$; k_f , $2/3 \epsilon_f$ и Ω_0 из [4]; величина $q_0/2k_f$

(строка 15), вычисленная по псевдопотенциалу пустого остова Ашкрофта приведена в работе [4, стр. 222]. Значение $q_0/2k_f$ (строка 7) вычислена с использованием псевдопотенциала Слэтера. Сравнение данных 7 и 15 показывает практически точное совпадение.

Таблица 1 – Расчетные параметры псевдопотенциала Слэтера

№ п/п	Металл	Li	Na	K	Rb	Cs
	Параметр					
1	z^* [8]	1,0529	1,1486	1,2382	1,2282	1,2375
2	n^* [8]	1,5127	1,7405	2,0031	2,0621	2,154
3	$q_0 = \frac{2z^*}{n^*(n^* - 1)}, a_0^{-1}$	1,357	0,891	0,616	0,561	0,498
4	$q_{\max} = 2q_0, a_0^{-1}$	2,714	1,782	1,232	1,122	0,996
5	$v(q)_{\max} = \frac{\pi z^*}{\Omega_0 q_0^2}, R_y$	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$
6	k_f, a_0^{-1} [4]	0,589	0,4882	0,3947	0,3693	0,3412
7	$q_0/2k_f$	1,152	0,913	0,78	0,76	0,73
8	$q_{\max}/2k_f$	2,304	1,826	1,56	1,52	1,46
9	Ω_0, a_0^{-3} [4]	144,9	481,4	481,4	587,9	745,5
10	$2/3\varepsilon_f, [4]$	-0,2313	-0,1589	-0,1039	-0,0909	-0,0776
11	$x\left(\frac{q_0}{2k_f}\right)$ [8]	0,312	0,647	0,761	0,777	0,797
12	$x\left(\frac{q_{\max}}{2k_f}\right)$ [8]	0,066	0,108	0,151	0,165	0,175
13	$\varepsilon_H(q_0)$ [9]	1,067	1,291	1,624	1,704	1,858
14	$\varepsilon_H(q_{\max})$ [7]	1,0075	1,012	1,031	1,037	1,047
15	$\frac{q_0}{2k_f}$ [4]	1,26	0,96 – 0,97	0,93 – 0,94	0,78 – 1,00	0,79 – 1,07
16	$\lambda^2 = \frac{4\pi z^f}{\Omega_0} \frac{2}{3} \varepsilon_f$ (7.1)	0,395	0,357	0,311	0,285	0,267

Как параметры $v(q)$ связаны с физическими и химическими свойствами веществ? В. Хейне, Д. Уэйр [4] отмечают, что, например, волновое число q_0 при котором $v(q_0) = 0$ связано с размером заполненной ионной оболочки атома и в меньшей степени с величиной энергии sp -промотирования в свободном атоме. Малый размер оболочки и наличие сильно связанного валентного s -уровня приводит к увеличению числа q_0 . В ряду щелочных металлов Li...Cs, наименьший размер ионной оболочки и наибольший потенциал тонизации $2s$ -электрона имеет Li. Цезий, наоборот, имеет максимальный размер внутреннего остова и минимальный потенциал ионизации валентного $6s$ -электрона. В соответствии с этим значение q_0 (строка 3), определенное по псевдопотенциалу Слэтера (5), максимально для Li (1,357) и постепенно уменьшается в ряду Na (0,891), K (0,616), Rb (0,561), Cs (0,498).

Аналогично, по Ашкрофту [4] q_0 равно в ряду Li (1,484), Na (0,937), K (0,576), Cs (0,539).

На рисунке 1 а, б представлены модельные псевдопотенциалы щелочных металлов.

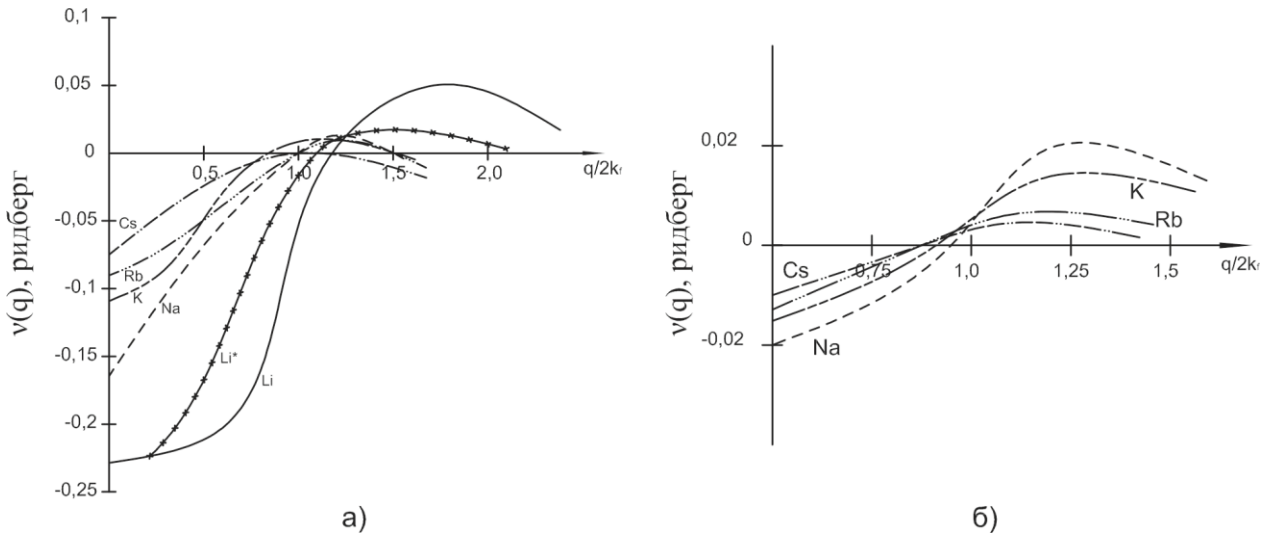


Рисунок 1 – (а) Модельные псевдопотенциалы щелочных металлов; (б) часть $v(q)$ от 0,75 до 1,5 $q_0/2k_f$ показана в увеличенном масштабе

По Ашкрофту [4] и по Слэтеру зависимости $v(q)$ практически совпадают во всем диапазоне значений $q/2k_f$. На рисунке значения $v(q)$ даны в единицах $\frac{2}{3} \epsilon_f$. Отличие наблюдается только для Li. Сплошной линией

(—) показана зависимость $v(q)$ по Ашкрофту, линией (—x—x—) $v(q)$ по Слэтеру. Как отмечает В. Хейне [4, стр. 233] модельный и подогнанный псевдопотенциалы для Li существенно различаются. Подогнанные точки для $v(q)$ по данным по поверхности Ферми, по упругим постоянным разнятся друг от друга значительно. Имеется мало хороших экспериментальных данных для определения зависимости $v(q)$, и это обстоятельство связывают с тем, что при низких температурах литий испытывает фазовый переход в модификацию с гексагональной плотной упаковкой.

В заключении следует отметить, что ВФ Слэтера и псевдоволновая функция не имеют узлов внутри ионного остова. В теории псевдопотенциала для обоснования гладкости ВФ доказывается так называемая «теорема компенсации» сильного кулоновского потенциала внутри атомного остова [4]. В потенциале Слэтера (4) сильный кулоновский потенциал $v_1(r) = -z^* e^2 / r$ внутри ионной оболочки компенсируется более сильным потенциалом отталкивания $v_2(r) = n^*(n^* - 1) / 2r^2$.

Выводы: Потенциал Слэтера, действующий на валентные электроны атома, приводит к тем же зависимостям псевдопотенциала $v(q)$, что и рассчитанным по другим известным модельным псевдопотенциалам, если в потенциале Слэтера эффективные заряд ядра z^* и квантовое число n^* определены по экспериментальным значениям потенциала ионизации (J) и межатомному

расстоянию (R_{ab}) в молекуле A_2 или в решетке кристалла, с использованием модели постоянной электронной плотности (ПЭП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харрисон У. Псевдопотенциалы в теории металлов. – М.: Мир, 1968. – 366 с.
2. Slater I.C. Phys. Rev. 1930. P. 36–57.
3. Колобов А.М. Избранные главы высшей математики. – Минск.: Высшая школа, 1965. – 222с.
4. Хейне В., Коэн Д., Уэйн Д. Теория псевдопотенциала. – М.: Мир, 1973. – 557 с.
5. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Приходько О.Г. Приведение уравнения Шредингера к классическому виду с выделением члена, связанного с волновыми свойствами электрона // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сборник научных трудов. Вып. 24 – Москва-Новокузнецк: ГОУ ВПО «СибГИУ», 2009. – С. 160–163.
6. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Приходько О.Г. Расчет энергии связи и числа свободных электронов в щелочных металлах по методу постоянной электронной плотности (ПЭП) // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сборник научных трудов. Вып. 25 – Москва-Новокузнецк: ГОУ ВПО «СибГИУ», 2010. – С. 106–115.
7. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Приходько О.Г. Эффективные квантовые числа валентных электронов, определенные по экспериментальному значению межатомного расстояния в гомоядерных двухатомных молекулах (A_2) // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сборник научных трудов. Вып. 24 – Москва-Новокузнецк: ГОУ ВПО «СибГИУ», 2009. – С. 164–170.
8. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Приходько О.Г. Расчет энергии связи гомоядерных двухатомных молекул (A_2) по методу постоянной электронной плотности (ПЭП) // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сборник научных трудов. Вып. 25 – Москва-Новокузнецк: ГОУ ВПО «СибГИУ», 2010. – С. 92–102.
9. Архипов Р.Г. // ЖЭТФ, 1970. Т. 59. С. 1711.
10. Архипов Р.Г., Алексеев Е.С., Барабанов А.Ф. // ЖЭТФ, 1970. Т. 63. С. 609.

УДК 621.74

В.Б. Деев, К.В. Пономарева, С.А. Цецорина, В.Н. Алхимов,
А.В. Прохоренко

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

СОДЕРЖАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

В работе исследовано влияние различных температурных режимов перегрева и заливки расплава (в литейную форму) на содержание неметаллических включений в сплаве АК7, полученного литьем по газифицируемым моделям.

The influence of the temperature of different modes of overheating and filling of melts (in the mold) on the content of non-metallic inclusions in the alloy AK7 obtained molding on gas models.

Технология литья по газифицируемым моделям является одним из прогрессивных способов получения высококачественных отливок [1, 2]. Все более широкое распространение данная технология находит при производстве алюминиевых изделий.

Известно [3 – 5], что содержание неметаллических включений в алюминиевых сплавах сверх регламентированного может приводить к различным литейным дефектам, и соответственно, к браку литья (в основном – к пористости).

В работе приведены результаты исследования влияния температурных режимов плавки и заливки сплава АК7 на содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в отливках, полученных литьем по газифицируемым моделям в условиях ООО «НПП Вектор Машиностроения».

В шихте использовались следующие материалы: чушковый силумин АК7 (10...15 %), возврат и отходы сплава АК7 (около 85...90 %). При плавке в печи ИСТ-0,16 температуру перегрева расплава изменяли в разных вариантах от 800 до 1000 °С с шагом ~ 50 °С. Время выдержки расплава составляло 5...6 мин при температуре перегрева. Температура заливки расплава в зависимости от варианта плавки варьировалась от ~ 800 до ~ 900 °С. Заливку в литейную форму осуществляли через ССФ-0,6.

При изготовлении газифицируемых моделей для проб использовался полистирол фирмы STYROCHEM. Модельные блоки (4 «куста» по 8 моделей) помещали в опоку, которую засыпали песком с одновременной вибрацией (3000 об/мин при частоте ~ 36 Гц). После опоку накрывали пленкой, разме-

щали заливочное устройство, вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. Таким образом, в одной серии получали 32 пробы. После охлаждения осуществляли выбивку проб, опилровку, пескоструйную зачистку. Содержание неметаллических включений определяли на специально подготовленных образцах (из залитых проб) при помощи квантометра ARL-4460. По каждому варианту технологии плавки и заливки отрабатывали 3 серии. Таким образом, содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) по конкретному варианту определяли как среднее арифметическое из 96 проб.

Влияние температуры перегрева ($T_{\text{ПЕР}}$) и заливки ($T_{\text{ЗАЛ}}$) расплава на содержание неметаллических включений в образцах, изготовленных из залитых по газифицируемым моделям проб, показано в таблице 1.

Приведенные результаты показывают (таблица 1), что из реализованных 12 вариантов технологии плавки и заливки расплава наиболее эффективными с точки зрения минимизации содержания неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в сплаве АК7, являются варианты 5 и 8. Эти варианты обеспечивают из-за достаточно высоких температур плавки и заливки требуемое снижение уровня микронеоднородности расплава (приводящее к изменению параметров кристаллизации при заливке в литейную форму и модифицирующему эффекту [6, 7]), но не приводят, в отличие от других вариантов, к повышенному содержанию водорода и неметаллических включений в расплаве.

Таблица 1 – Влияние температуры перегрева и заливки расплава на содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в сплаве АК7

Вариант	Температуры перегрева и заливки		Содержание ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), %
	$T_{\text{ПЕР}}$, °C	$T_{\text{ЗАЛ}}$, °C	
1	990...1000	870...880	0,049
2		820...830	0,045
3		780...790	0,040
4	940...950	870...880	0,037
5		820...830	0,033
6		780...790	0,038
7	880...890	870...880	0,036
8		820...830	0,031
9		780...790	0,039
10	830...840	820...830	0,042
11		780...790	0,044
12	790...800	780...790	0,046

Следует отметить, что в настоящее время разработаны весьма эффективные способы рафинирования расплавов при получении алюминиевых отливок [8 – 10]. Однако в случае литья по газифицируемым моделям из-за высоких температур плавки и литья реализовать большинство этих способов не представляется возможным. Наиболее целесообразным в данном случае в ка-

честве надежной технологии рафинирования является использование фильтрации при заливке в литейную форму.

Выводы: Исследование различных вариантов температурных режимов плавки и заливки расплава (состава АК7) при литье по газифицируемым моделям на содержание неметаллических включений в литом состоянии показало, что минимальное содержание $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в готовом сплаве обеспечивают: температура перегрева расплава – до 880...890 или 940...950 °С, температура заливки в литейную форму – 820...830 °С.

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. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, Ри Хосен и др. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 14–17.

4. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – М: Машиностроение-1, 2005. – 510 с.

5. 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.

6. Деев В.Б. Исследование технологических параметров и расчет количества твердой фазы при кристаллизации литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, И.Ю. Кольчурина, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. 2007. № 8. С. 18–23.

7. Деев В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 2. С. 4–6.

8. Рафинирование вторичных алюминиевых сплавов / С.Е. Шуранков, В.Л. Трибушевский, Б.М. Немененок, С.Н. Леках // Литейное производство. 2001. № 9. С. 12, 13.

9. Селянин И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. 2006. № 2. С. 18–20.

10. Деев В.Б. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, В.Ф. Горюшкин, С.А. Цецорина // Литейщик России. 2008. № 3. С. 23–25.

УДК 621.74

В.Б. Деев, К.В. Пономарева, С.А. Цецорина, В.Н. Алхимов,
В.А. Калининченко

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

РАФИНИРОВАНИЕ И ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В работе исследовано влияние комплексной обработки расплавов на механические и технологические свойства литейного алюминиевого сплава АК7ч.

The influence of complex processing of melts on the mechanical and technological properties of aluminum alloy casting АК7ч.

Актуальной проблемой современного литейного производства является максимально возможное ресурсосбережение, заключающееся в использовании повышенного количества вторичных материалов при обеспечении требуемого уровня механических и эксплуатационных свойств в литых изделиях [1 – 6]. Известно [7], что отдельные неудачи при работе с вторичными материалами при получении литейных алюминиевых сплавов создали о них мнение как о нежелательных составляющих шихты. Между тем, разница в цене между чушковыми и вторичными материалами составляет, в среднем, в 2...2,5 раза. И если бы удалось увеличить их содержание в шихте до 80...85 % при гарантированном получении необходимого уровня механических свойств (не ниже требований ГОСТ 1583-93), то это позволило бы получить существенную экономию при производстве отливок.

Для получения качественных отливок с использованием повышенного количества вторичных материалов помимо тщательной организации сбора, сортировки и подготовки шихтовых материалов и учетом наследственности используемой шихты необходимо создание эффективных технологий обработки расплавов в процессе плавки и заливки в литейные формы. Тщательный анализ всего технологического процесса, включающий оптимизацию температурных режимов плавки (проведение термовременной обработки – ТВО), выбор рациональной технологии рафинирования, использование физических воздействий при заливке и кристаллизации отливок (магнитного поля, электрического тока) позволят заложить требуемый «резерв» в качество получаемых литых изделий.

Вышеперечисленные технологии будут способствовать снижению пористости, формированию в сплаве мелкозернистой структуры и повышению механических, технологических и эксплуатационных свойств [8 – 13]. Данные эффекты связаны с изменением характера кристаллизации сплавов, обрабо-

танных физическими воздействиями, по сравнению со сплавами без обработки. Понимание сущности процессов обработки и создание единого подхода к получаемым в дальнейшем явлениям позволит более глубоко подойти к созданию обобщенной теории модифицирования и рафинирования сплавов.

Операции рафинирования (флюсование, фильтрация и др.) в промышленных технологиях плавки и литья являются обязательными, так как повышенное количество вторичных материалов в шихте может приводить к опасности внесения газовых и неметаллических включений в расплав [2, 3].

Было исследовано содержание неметаллических включений ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) в сплаве АК7ч, полученном на основе вторичных материалов (80...85 % лома и отходов состава АК7ч + 15...20 % чушковых материалов), после различных способов обработки расплава с обязательной предварительной ТВО.

Плавки проводили в лабораторных и производственных условиях в печах СШОЛ и ИСТ-0,06. Заливку проб и образцов осуществляли при температуре 720...730 °С через стеклоткань ССФ-0,6. При проведении ТВО охлаждение расплавов от температуры перегрева до температуры рафинирования или заливки осуществляли твердой шихтой. Рафинирование расплавов флюсом «МХЗ» (50 % NaCl, 35 % KCl, 15 % Na_2SiF_6), препаратом «Дегазер» (90 % C_2Cl_6 , 10 % NaCl), хлористыми марганцем и цинком проводили при температуре 740...750 °С. Обработку расплавов постоянным магнитным полем в процессе заливки осуществляли с помощью устройства [14, 15], подсоединенного к трансформатору и представляющего из себя конусную индуктивную катушку на стойках, в которой установлен керамический желоб с воронкой, подвешенный к литейной форме. В процессе обработки расплава градиент магнитного поля может составлять $\Delta B/\Delta x = 0,192...0,886$ Тл/м. Контроль химического состава и содержание неметаллических включений определяли при помощи квантометра ARL-4460. Механические свойства и пористость кокильных образцов определяли согласно ГОСТ 1583–93. Жидкотекучесть сплавов определяли по прутковой пробе.

Анализ приведенных результатов (рисунки 1, 2) показал, что применение ТВО ($T = 1000...1020$ °С, $\tau = 8...10$ мин) позволило получить больший рафинирующий эффект, чем аналогичный способ обработки без использования ТВО. Соответственно, наблюдалось снижение брака по пористости, повышение механических свойств залитых в кокиль образцов (σ_B – на 18...22 %; δ – на 53...112 %) и уровня жидкотекучести (на 14...33 %) у обработанных сплавов.

Из рисунков 1, 2 следует, что ТВО расплава является перспективной ресурсосберегающей технологией, позволяющей в комплексе с эффективным рафинированием увеличить количество вторичных материалов в шихте и получать сплавы с минимальным содержанием газовых и неметаллических включений, требуемыми механическими свойствами.



a

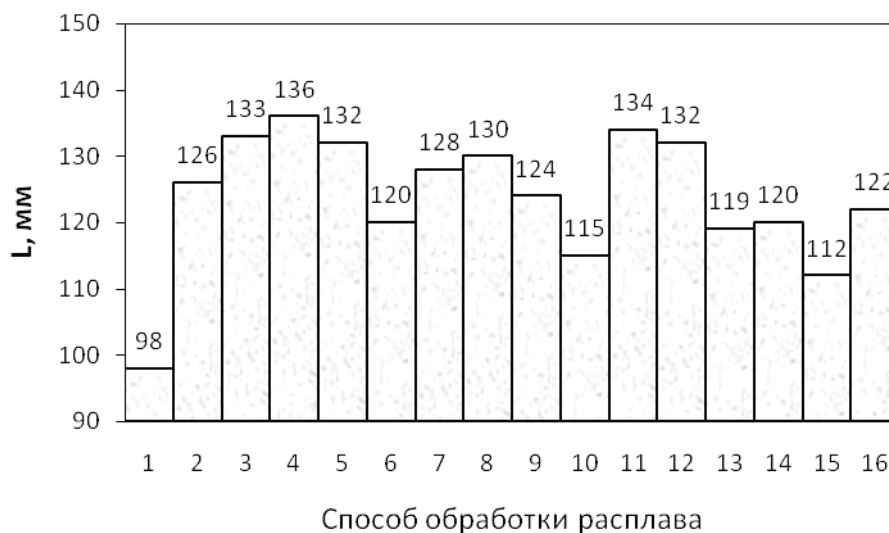


б

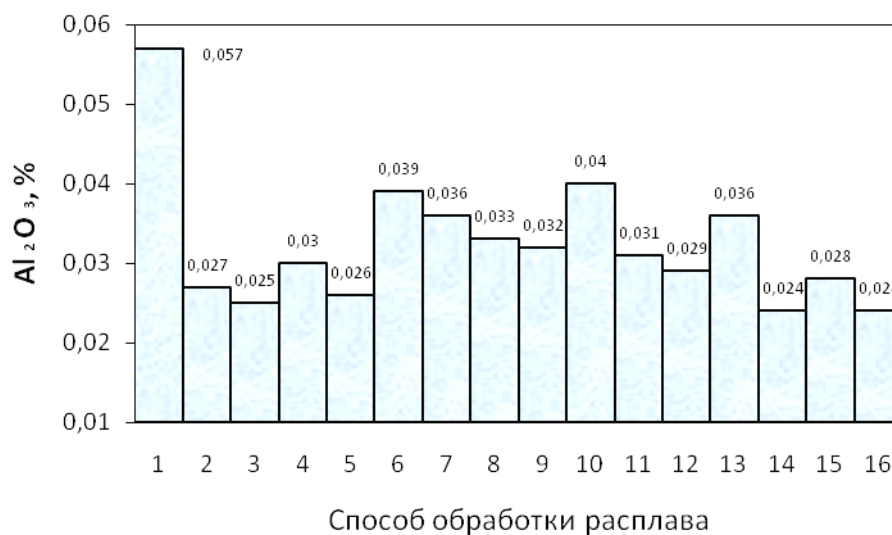
Рисунок 1 – Механические свойства (*a* – временное сопротивление разрыву; *б* – относительное удлинение) сплава АК7ч в зависимости от способа обработки расплава:

1 – исходный сплав на основе лома и отходов (80...85 %); 2 – аргон; 3 – ТВО и аргон; 4 – ТВО и «Дегазер» (0,5 %); 5 – ТВО и «Дегазер» (0,8 %); 6 – «Дегазер» (0,5 %); 7 – «Дегазер» (0,8 %); 8 – ТВО и $MnCl_2$ (0,2 %);

9 – магнитное поле при заливке с градиентом $\Delta B/\Delta x = 0,886$ Тл/м; 10 – $MnCl_2$ (0,2 %); 11 – ТВО и $ZnCl_2$ (0,2 %); 12 – ТВО и магнитное поле при заливке с градиентом $\Delta B/\Delta x = 0,886$ Тл/м; 13 – $ZnCl_2$ (0,2 %); 14 – ТВО и флюс «МХЗ» (0,8 %); 15 – флюс «МХЗ» (0,8 %); 16 – чушковые материалы (100 %)



a



б

Рисунок 2 – Жидкотекучесть (*a*) и содержание неметаллических включений (*б*) в сплаве АК7ч в зависимости от способа обработки расплава:

- 1 – исходный сплав на основе лома и отходов (80...85 %); 2 – аргон; 3 – ТВО и аргон; 4 – ТВО и «Дегазер» (0,5 %); 5 – ТВО и «Дегазер» (0,8 %); 6 – «Дегазер» (0,5 %); 7 – «Дегазер» (0,8 %); 8 – ТВО и MnCl₂ (0,2 %); 9 – магнитное поле при заливке с градиентом $\Delta B/\Delta x = 0,886$ Тл/м; 10 – MnCl₂ (0,2 %); 11 – ТВО и ZnCl₂ (0,2 %); 12 – ТВО и магнитное поле при заливке с градиентом $\Delta B/\Delta x = 0,886$ Тл/м; 13 – ZnCl₂ (0,2 %); 14 – ТВО и флюс «МХЗ» (0,8 %); 15 – флюс «МХЗ» (0,8 %); 16 – чушковые материалы (100 %)

Реализация вариантов использования ТВО как отдельно, так и в комплексе с разными технологиями рафинирования (ТВО и $MnCl_2$, ТВО и флюс «МХЗ», ТВО и «Дегазер»), а также с другими способами обработки расплавов в производственных условиях ООО «Технокомплекс-НК», ООО «НПП Вектор Машиностроения» за период 2007-2013 гг. позволила при изготовлении литейного сплава АК7ч и отливок из него литьем в кокиль и литьем по газифицируемым моделям получить за счет экономии чушковых материалов (при использовании их в завалке – до 20...25 %) существенный экономический эффект. При этом в сплаве при всех вариантах рафинирования наблюдалось снижение брака по пористости и повышение прочности (в среднем – на 20...26 %) в литом состоянии. При изготовлении отливок «Корпус» и «Крышка корпуса газоанализатора» литьем по газифицируемым моделям при использовании комплексной обработки расплава ТВО и рафинированием у них наблюдалась повышенная чистота поверхности.

Необходимо отметить, что параметры рафинирования и комплексной обработки расплавов при изменении технологии плавки нуждаются в уточнении, так как разные плавильные печи и различный состав шихтовых материалов в условиях того или иного производства могут оказывать определенное нивелирующее действие на способ обработки расплава и, соответственно, качество сплавов. Особенно эффективно проведение ТВО в печах индукционного нагрева. Это связано с интенсификацией движения расплава под действием переменных электромагнитных полей, что приводит к увеличению скоростей массопереноса и гомогенизации расплава при перегревах по сравнению с печами простого электронагрева.

Выводы: Показано, что комплексная обработка расплавов, включающая ТВО и различные способы рафинирования, способствует повышению уровня механических и технологических свойств сплава АК7ч (полученного на основе вторичных материалов – до 80...85 % в шихте) и отливок из него литьем в кокиль и по газифицируемым моделям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – М: Машиностроение-1, 2005. – 510 с.
2. Селянин И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // Литейщик России. 2006. № 2. С. 18–20.
3. Рафинирование вторичных алюминиевых сплавов / С.Е. Шуранков, В.Л. Трибушевский, Б.М. Немененок, С.Н. Леках // Литейное производство. 2001. № 9. С. 12, 13.
4. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys / V.B. Deev, V.A. Degtyar, A.I. Kutsenko, I.F. Selyanin, A.P. Voitkov // Steel in Translation. 2007. T. 37. № 12. С. 991–994.

5. Золоторевский В.С. Вторичные алюминиевые сплавы: состояние и перспективы / В.С. Золоторевский // Цветные металлы. 2004. № 7. С. 76–80.
6. Калиниченко А.С. Снижение негативного влияния повышенного содержания железа в алюминиевых сплавах / А.С. Калиниченко, Б.Н. Немененок, В.А. Калиниченко // Литейное производство. 2004. № 3. С. 21, 22.
7. Деев В.Б. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, Ри Хосен и др. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 14–17.
8. Деев В.Б. Влияние температурной обработки расплава и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, Н.В. Башмакова // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 4. С. 50–53.
9. Деев В.Б. Влияние электромагнитных воздействий на свойства литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2011. № 27. С. 117–122.
10. Деев В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 2. С. 4–6.
11. Цецорина С.А. Исследование влияния магнитного поля на свойства литейных алюминиевых сплавов и разработка ресурсосберегающей технологии их получения. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. 19 с.
12. Башмакова Н.В. Исследование влияния электрического тока на свойства алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. 18 с.
13. 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.
14. Пат. на полезную модель № 69072 РФ, МПК С22С 1/02. Устройство для модифицирования сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, В.А. Дегтярь и др. // Заявка № 2007130320. Приоритет 07.08.2007 г. Опубл. 10.12.2007 г.
15. Деев В.Б. Модифицирующая обработка сплавов магнитным полем / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, В.Ф. Горюшкин, С.А. Цецорина // Литейщик России. 2008. № 3. С. 23–25.

В.Б. Деев¹, И.Ф. Селянин¹, К.В. Пономарева¹, А.С. Юдин²,
П.В. Ковальчук¹

¹ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² ООО «НПП Вектор Машиностроения», г. Новокузнецк

ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА РАСПЛАВА ПРИ ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

В работе исследовано влияние различных температурных режимов перегрева и заливки расплава (в литейную форму) на чистоту поверхности и размерную точность отливок из сплава АК7, полученных литьем по газифицируемым моделям.

The influence of the temperature of different modes of overheating and pouring the melt (in the mold) on the surface finish and size-ing precision castings alloy АК7 obtained molding on gas 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 алюминиевых изделий.

Технологический процесс литья по газифицируемым моделям весьма сложен и включает достаточно много операций, начиная от подготовки полистирола и заканчивая выбивкой отливок.

Следует отметить, что технология плавки и состояние расплава перед заливкой в литейные формы может оказать значительное влияние на качество получаемого литья. Особенно это весьма актуально при реализации ресурсосберегающих технологий, когда используется повышенное количество вторичных материалов в шихте [3 – 11]. Однако в технологиях ЛГМ вопросам технологии плавки уделяется недостаточное внимание. А все усилия технологов сконцентрированы, как правило, на проблемах, связанных с технологией литейной формы – процессах изготовления моделей, модельных блоков и литниковой системе, размещению «кустов» в опоках, формовке, вакуумированию, заливке и т.д.

Между тем, применение при плавке повышенного количества вторичных материалов в шихте даже при стабильном течении технологического процесса может приводить к пористости, неспаям и другим видам литейных

дефектов и брака, что значительно снижает механические и эксплуатационные свойства алюминиевого литья.

Технология плавки в этом случае должна включать эффективные приемы обработки расплава, такие как термовременная обработка по оптимальным температурным режимам и рафинирование [5], а также оптимальную температуру заливки в литейные формы. К сожалению, температуры перегрева и заливки, и способ рафинирования определяются индивидуально в каждом конкретном случае и зависят от типа производства, плавильного агрегата, марки получаемого сплава, габаритов и массы будущей отливки, «сложности» литейной формы и других факторов. Следует признать, что в результате всего перечисленного процесс получения изделий требуемого качества усложняется с инженерной точки зрения. Тем не менее, разработка эффективной технологии плавки алюминиевых сплавов при ЛГМ является целесообразным.

В данной работе приведены результаты исследования влияния температурных режимов плавки и заливки сплава АК7 на качество герметичных отливок «Крышка корпуса газоанализатора», полученных литьем по газифицируемым моделям в условиях ООО «НПП Вектор Машиностроения».

Шихтовые материалы включали: чушковый силумин АК7 (10...15 %), возврат и отходы сплава АК7 (около 85...90 %). Плавку проводили в печи ИСТ-0,16. Варьировали температуру перегрева расплава в разных плавках от 800 до 1000 °С с шагом ~ 50 °С. Время выдержки расплава при температуре перегрева во всех вариантах составляло 5...6 мин. Температура заливки расплава в зависимости от варианта плавки варьировалась от ~ 800 до ~ 900 °С. Заливку в литейную форму осуществляли через ССФ-0,6.

При изготовлении газифицируемых моделей использовался полистирол фирмы STYROCHEM. Готовые модельные блоки (4 «куста» по 8 моделей) с помощью специального устройства помещали вертикально в подвешенном состоянии в опоку размером 700x700x700. Устройство для вертикального размещения модельных блоков состояло из передвижной станины, вертикальной стойки, горизонтальной стойки и передвижной рейки. Засыпку песка в опоку проводили одновременно с ее вибрацией, которую осуществляли на опоке посредством закрепленных на ней 2-х электрических вибраторов (3000 об/мин. с частотой ~ 36 Гц). Затем опоку накрывали пленкой, размещали заливочное устройство (состоящее из горизонтальной рамки с пазами и двух цилиндрических емкостей, устанавливаемых через пазы в рамку), вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. После охлаждения осуществляли выбивку отливок, опилровку, зачистку (пескоструйно). Для выявления качественных показателей литья по существующим на предприятии критериям оценивали чистоту поверхности и размерную точность отливок.

Если в одной серии в 4 «кустах» из 32 отливок более 3 отливок суммарно или по отдельности не удовлетворяли тому или иному требуемому показателю, то вариант перегрева и заливки считался «неэффективным» для данной технологии. Если в каком-либо варианте в любой серии наблюдался недостаточный «прожог» пенополистирольного модельного блока в любой его части,

то вариант технологии относили к «неэффективным». Кроме того, если в в каком-либо варианте в любой серии из случайной выборки 10 годных отливок хотя бы 1 отливка имела по пористости балл выше 3-го (определенный по методике ВИАМ согласно ГОСТ 1583-93), то этот вариант технологии также считался «неэффективным».

Влияние температуры перегрева ($T_{\text{ПЕР}}$) и заливки ($T_{\text{ЗАЛ}}$) расплава на качественные показатели отливок в ходе проведения нескольких серий производственной апробации показано в таблице 1.

Экспериментальные результаты показывают (таблица 1), что из 12 вариантов технологии плавки и заливки расплава эффективными являются варианты 5 и 8. Следует отметить, что варианты 2 и 7 по показателям размерной точности и чистоте поверхности удовлетворяет необходимым требованиям, но не соответствует по показателям пористости. Это, по-видимому, связано с тем, что достаточно высокие температуры плавки и заливки положительно влияют на изменение уровня микронеоднородности расплава, но приводят к повышению содержанию водорода и неметаллических включений в расплаве и не позволяют реализовать эффективные существующие способы рафинирования расплава флюсами. А применяемая технология рафинирования расплава через стеклоткань (ССФ-0,6) не обеспечивает необходимой очистки расплава от неметаллических включений и газов, что и приводит к пористости выше 3-го балла.

Таблица 1 – Влияние температуры перегрева и заливки расплава на качество отливок

Температуры перегрева и заливки			Качественные показатели (по 3 сериям каждого варианта технологии плавки и заливки)		недостаточный прожог и (или) пористость	Заключение по технологии
Вариант	$T_{\text{ПЕР}}$, °С	$T_{\text{ЗАЛ}}$, °С	Чистота поверхности	Размерная точность		
1	990...1000	870...880	неудовлет.	удовлет.	есть	неэффективная
2		820...830	удовлет.	удовлет.	есть	неэффективная
3		780...790	неудовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная
4	940...950	870...880	удовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная
5		820...830	удовлет.	удовлет.	нет	эффективная
6		780...790	неудовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная
7	880...890	870...880	удовлет.	удовлет.	есть	неэффективная
8		820...830	удовлет.	удовлет.	нет	эффективная
9		780...790	неудовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная
10	830...840	820...830	удовлет.	удовлет.	есть	неэффективная
11		780...790	неудовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная
12	790...800	780...790	неудовлет.	неудовлет.	есть	неэффективная

Что касается варианта 10, то следует отметить, что несмотря на удовлетворительные показатели по размерной точности и чистоте поверхности отливок, также наблюдается повышенная пористость исследуемых образцов. Очевидно, это связано с тем, что в этом варианте технологии применяется недостаточная высокая температура перегрева расплава, которая не позволяет нивелировать нежелательное влияние на качество литья повышенного количества используемых при плавке вторичных материалов.

Таким образом, наиболее оптимальным вариантом в данных технологических условиях является вариант 8, при котором $T_{\text{ПЕР}}$ составляет $\sim 880\dots 890$ °С, а $T_{\text{ЗАЛ}}$ составляет $\sim 820\dots 830$ °С. Вариант 5, при тех же положительных показателях качества литья, имеет б'ольшую температуру перегрева расплава по сравнению с вариантом 8, что будет экономически более затратно.

Выводы: Выявлено, что при реализации ресурсосберегающей технологии получения сплава АК7 литьем по газифицируемым моделям наиболее эффективными в рассматриваемых производственных условиях являются следующие режимы плавки и литья, обеспечивающие наилучшие качественные показатели герметичных отливок по размерной точности и чистоте поверхности: температура перегрева расплава – $880\dots 890$ °С, температура заливки в литейную форму – $820\dots 830$ °С.

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. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – М: Машиностроение-1, 2005. – 510 с.
4. 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.
5. Деев В.Б. Влияние температурной обработки расплава и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, Н.В. Башмакова // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 4. С. 50–53.
6. Башмакова Н.В. Исследование влияния электрического тока на свойства алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. 18 с.
7. Деев В.Б. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, Ри Хосен и др. // Литейщик России. 2012. № 10. С. 14–17.

8. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys / V.B. Deev, V.A. Degtyar, A.I. Kutsenko, I.F. Selyanin, A.P. Voitkov // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37. № 12. С. 991–994.

9. Цецорина С.А. Исследование влияния магнитного поля на свойства литейных алюминиевых сплавов и разработка ресурсосберегающей технологии их получения. Автор-т дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк: СибГИУ, 2008. 19 с.

10. Деев В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2003. № 2. С. 4–6.

11. Селянин И.Ф. Рафинирование расплавов при использовании низкосортной шихты / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.П. Войтков, Н.В. Башмакова // *Литейщик России*. 2006. № 2. С. 18–20.

УДК 621.74

В.Б. Деев¹, И.Ф. Селянин¹, К.В. Пономарева¹, А.С. Юдин²,
Р.В. Романов¹

¹ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² ООО «НПП Вектор Машиностроения», г. Новокузнецк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛГМ

В работе исследовано влияние термоскоростной обработки расплава на механические свойства алюминиевых сплавов, полученных литьем по газифицируемым моделям.

The influence of thermo-speed melt treatment on the mechanical properties of aluminum alloys produced by casting aerated fitsiruemym model.

В промышленных условиях литья для снижения микронеоднородности металлических расплавов при использовании низкосортной шихты применяются различные виды высокотемпературных перегревов [1, 2]. Однако достигнутое более однородное состояние расплава является обратимым и очень часто в промышленных технологиях литья оно может быть утеряно до момента заливки литейных форм. В основном, это связано с большим технологическим запаздыванием проводимых процессов.

Высокотемпературный тип структуры ближнего порядка расплава можно зафиксировать его быстрым охлаждением перед заливкой путем термоскоростной обработки (ТСО). 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.

Термоскоростная обработка расплава оказывает эффективное модифицирующее влияние на алюминиевые сплавы [1 – 4]. Получение мелкозернистой структуры алюминиевых сплавов с помощью ТСО является важным резервом повышения механических свойств отливок.

В последние годы отмечены [4 – 8] многочисленные положительные эффекты влияния мелкозернистого возврата на свойства получаемых алюминиевых сплавов при различных добавках в расплав. Такие добавки (в количестве от 5 до 100 %) использовались либо как затравочные перед разливкой расплава, либо сразу загружались в печь вместе с основной шихтой. При этом механические, литейные и служебные свойства сплавов значительно улучшались.

Таким образом, проблему ускоренного охлаждения расплава после высокотемпературного перегрева (и выдержки) до температуры рафинирования или заливки в литейные формы (с целью фиксации эффекта перегрева) можно решать с помощью добавок мелкозернистого возврата, соответствующего составу получаемого сплава, то есть – реализовать термоскоростную обработку (ТСО). Увеличение скорости охлаждения расплава происходит за счет того, что добавки мелкозернистых материалов выступают в качестве плавящихся микрохолодильников; а также создают модифицирующий эффект, внося большое количество потенциальных центров кристаллизации (микронеоднородностей меньших масштабов и активированных нерастворимых примесей). В качестве мелкозернистого возврата целесообразно использовать как специально приготовленную шихтовую заготовку, так и отходы и возврат кокильного литья. Также в качестве добавок твердой шихты для охлаждения расплава можно применять чушковые сплавы, соответствующие получаемым по химическому составу.

В статье приведены результаты исследования влияния термоскоростной обработки расплава на механические свойства тонкостенных корпусных отливок из алюминиевых сплавов АК7, АК12, АК9М2 (ГОСТ 1583-93), полученных литьем по газифицируемым моделям в условиях ООО «НПП Вектор Машиностроения».

При реализации ресурсосберегающей технологии шихтовые материалы включали для каждой марки исследуемых сплавов: чушковые сплавы (около 10...15 %), возврат и отходы аналогичного состава (около 85...90 %). Плавки проводили в печи ИСТ-0,16. ТСО заключалась в следующем: расплавляли возврат и отходы, расплав перегревали до 980...1000 °С и выдерживали около 5...6 мин; далее расплав охлаждали до температуры 880...890 °С первой (предварительно теплофизически рассчитанной и апробированной экспери-

ментально в лабораторных условиях) порцией чушкового сплава; после проводили охлаждение расплава до температуры заливки 820...830 °С второй (также предварительно рассчитанной) порцией чушкового сплава. Рафинирование осуществляли через ССФ-0,6 при заливке в литейную форму.

При изготовлении газифицируемых моделей для будущих отливок и образцов для исследования механических свойств использовался полистирол фирмы STYROCHEM. Готовые модельные блоки с помощью специального устройства помещали вертикально в подвешенном состоянии в опоку размером 700x700x700. Устройство для вертикального размещения модельных блоков состояло из передвижной станины, вертикальной стойки, горизонтальной стойки и передвижной рейки. Засыпку песка в опоку проводили одновременно с ее вибрацией, которую осуществляли на опоке посредством закрепленных на ней 2 электрических вибраторов мощностью 3000 об/мин. Частота вибрации составляла ~ 36 Гц. Затем опоку накрывали пленкой, размещали заливочное устройство (состоящее из горизонтальной рамки с пазами и двух цилиндрических емкостей, устанавливаемых через пазы в рамку), вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. После охлаждения осуществляли выбивку отливок, опиловку, пескоструйную зачистку. Механические свойства изучали на образцах (согласно ГОСТ 1583-93), изготовленных из залитых по газифицируемым моделям проб.

Влияние технологии ТСО на механические свойства сплавов АК7, АК12, АК9М2 показано в таблице 1. Также приведены механические свойства сплавов, полученных по существующей на предприятии технологии плавки, которая заключалась в том, что высокотемпературный перегрев не проводили, а перегревали расплавы только до 880...890 °С, при этом до температуры заливки (820...830 °С) расплав охлаждался вместе с печью. Заливку в литейную форму также осуществляли через ССФ-0,6.

Согласно таблице 1, механические свойства образцов у всех исследуемых сплавов после ТСО, по сравнению со сплавами, полученными по существующей технологии, повысились (в среднем): временное сопротивление разрыву σ_B – на 14...22 %, относительное удлинение δ – на 32...75 %.

Таблица 1 – Влияние технологии плавки на механические свойства образцов трех алюминиевых сплавов, полученных литьем по газифицируемым моделям

Технология плавки	Сплав	Механические свойства литых образцов	
		σ_B , МПа	δ , %
Существующая	АК7	174...185	2,2...2,6
ТСО		203...210	3,3...3,5
Существующая	АК12	181...190	4,1...4,5
ТСО		214...220	6,7...7,2
Существующая	АК9М2	200...207	1,5...1,8
ТСО		227...233	2,1...2,3

Внедрение технологии ТСО в условиях ООО «НПП Вектор Машиностроения» при выплавке сплавов АК7, АК12, АК9М2 и изготовлении тонкостенного корпусного литья по газифицируемым моделям позволило получить за счет снижения (до 10...15 % в завалке) расхода чушковых материалов существенный экономический эффект.

Достоинством технологии ТСО является то, что она может успешно применяться в литейных и машиностроительных цехах при плавке алюминиевых сплавов для отливок, получаемых различными способами литья (в песчаные формы, в кокиль, по газифицируемым моделям и др.). При этом за счет модифицирующего эффекта данной обработки обеспечивается повышение комплекса механических и служебных свойств литых изделий. При реализации предлагаемой технологии в шихте возможно использовать до 90 % вторичных материалов собственного производства. Недостатком технологии ТСО является то, что оптимальные режимы перегрева и количество добавляемой твердой мелкозернистой шихты необходимо определять экспериментально в каждом конкретном случае производства. И кроме того, не все плавильные агрегаты, применяемые при производстве алюминиевых отливок, могут обеспечить требуемые температуры перегрева расплава.

Выводы: Разработана и реализована в производственных условиях ресурсосберегающая технология получения алюминиевых сплавов для корпусного тонкостенного литья по газифицируемым моделям, включающая термоскоростную обработку расплава. Технология способствовала повышению уровня механических свойств отливок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Влияние термоскоростной обработки расплава на структурообразование и механические свойства отливок из алюминиевых сплавов / Хосен Ри, Э.Х. Ри, С.Н. Химухин, М.Е. Калугин, Д.П. Стаценко // Литейщик России. 2010. № 8. С. 27-28.

3. Resource-saving technology for the production of cast aluminum alloys / V.B. Deev, V.A. Degtyar, A.I. Kutsenko, I.F. Selyanin, A.P. Voitkov // Steel in Translation. 2007. Т. 37. № 12. С. 991–994.

4. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. – М: Машиностроение-1, 2005. – 510 с.

5. 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.

7. Деев В.Б. Влияние температурной обработки расплава и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, О.И. Нохрина, Н.В. Башмакова // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 4. С. 50–53.

8. Деев В.Б. Влияние структурной наследственности шихты на качество отливок из силуминов / В.Б. Деев, И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, Ю.Ф. Шульгин // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 2. С. 4–6.

УДК 621.74

В.Б. Деев¹, А.С. Юдин², К.В. Пономарева¹, С.А. Цецорина¹,
В.Н. Алхимов¹

¹ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² ООО «НПП Вектор Машиностроения», г. Новокузнецк

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ФОРМОВКИ НА КАЧЕСТВО АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЛГМ

В работе исследовано влияние способа формовки на качество отливок из алюминиевых сплавов, полученных литьем по газифицируемым моделям.

The influence of method of molding quality castings of aluminum alloys produced by molding on gas models.

Перспективным способом получения малогабаритных отливок является литье по газифицированным моделям (ЛГМ) [1, 2]. В Российской Федерации данная технология преимущественно используется для литья черных сплавов, однако в последние годы наблюдается тенденция по ее широкому применению для получения отливок из алюминиевых сплавов [3, 4]. В качестве существенных достоинств литья алюминиевых сплавов по газифицируемым моделям можно выделить следующие:

- возможность получения малогабаритного и тонкостенного литья;
- возможность получения отливок с заданной размерной точностью и требуемой чистотой поверхности.

Одним из основных технологических факторов процесса, влияющих на качество отливок при ЛГМ, является формовка модельных блоков. Главные аспекты в процессе формовки: способ передачи вибрации и способ засыпки сухого кварцевого песка в литейную форму.

В настоящее время широко используются вибростолы различных модификаций, позволяющие реализовать различные способы засыпки песка в про-

цессе формовки. Важным преимуществом вибростолов является их использование при крупносерийном производстве отливок в составе автоматических линий ЛГМ-процесса. Недостатки при применении вибростолов: недоуплотнение верхних слоев формы, необходимость использования вибраторов большой мощности, возможное коробление и разрушение модельных блоков.

В условиях мелкосерийного производства и при большой номенклатуре отливок целесообразным будет использование литейных опок с непосредственно закрепленными на них вибраторами, что позволяет в определенной мере решить недостатки, характерные при использовании вибростолов.

Что касается засыпки песка в опоку, то ее можно осуществлять послойно или одновременно. Главным недостатком послойной формовки является недоуплотнение верхних и переуплотнение нижних слоев литейной формы, приводящих к различным литейным проблемам (в верхних слоях – размыв формы, а в нижних – снижение газопроницаемости). Одновременное заполнение формы песком позволяет избежать вышеуказанных дефектов.

Реализация различных способов формовки при ЛГМ-процессе была проведена в условиях ООО «НПП Вектор Машиностроения» при получении малогабаритного и тонкостенного литья (на примере отливки «Крышка корпуса газоанализатора» из сплава АК7).

Для изготовления моделей использовался полистирол фирмы STYROCHEM. Готовые модельные блоки (4 «куста» по 8 моделей) с помощью специального устройства помещали вертикально в подвешенном состоянии в опоку размером 700x700x700. Устройство для вертикального размещения модельных блоков состояло из передвижной станины, вертикальной стойки, горизонтальной стойки и передвижной рейки. Засыпку песка в опоку проводили послойно и одновременно с ее вибрацией. При этом вибрацию осуществляли по двум вариантам: 1. На вибростоле (2 электрических вибратора мощностью 3000 об/мин) с размещенной на нем опокой; 2. На опоке посредством закрепленных на ней 2 электрических вибраторов мощностью 3000 об/мин. Частота вибрации составляла ~ 36 Гц. Затем опоку накрывали пленкой, размещали заливочное устройство (состоящее из горизонтальной рамки с пазами и двух цилиндрических емкостей, устанавливаемых через пазы в рамку), вакуумировали литейную форму и производили заливку расплава. После охлаждения осуществляли выбивку отливок, опиловку, зачистку (пескоструйно) и оценку качественных показателей литья – оценивали чистоту поверхности и размерную точность отливок (по существующим на предприятии критериям). Если в одной серии в 4 «кустах» из 32 отливок более 3 отливки суммарно или по отдельности не удовлетворяли тому или иному требуемому показателю, то способ формовки считался «неэффективным».

Сравнительная характеристика влияния способов формовки на качественные показатели отливок в ходе проведения нескольких серий производственной апробации представлена в таблице 1. Фотографии отливок, полученных с использованием разных способов формовки, приведены на рисунке 1.

Результаты показывают (таблица 1), что реализация способа формовки с вибраторами, закрепленными на опоке, при одновременной засыпке песка позволила добиться наилучших результатов – полного исключения коробления моделей и получения практически у всех отливок требуемых размерной точности и (или) чистоте поверхности. Из 160 отливок (5 серий x 32 шт.) лишь 5 не соответствовали требуемым критериям).

Таблица 1 – Влияние способов формовки на качество отливок

Способ формовки		Показатели (по 5 сериям каждого варианта формовки)		Заключение по способу формовки
Технология вибрации	Засыпка песка в опоку	Чистота поверхности	Размерная точность	
Опока на вибростоле (вариант 1)	последовательно	неудовлетворительная	не соответствует	неэффективный
	одновременно	удовлетворительная	соответствует	эффективный
Опока с закрепленными на ней вибраторами (вариант 2)	последовательно	удовлетворительная	не соответствует	неэффективный
	одновременно	удовлетворительная	соответствует	эффективный



а

б

Рисунок 1 – Отливки, полученные по разным способам формовки:

а – опока на вибростоле, засыпка песка последовательно; *б* – опока с вибраторами, засыпка песка одновременно

При реализации способа формовки в опоке с вибрацией на вибростоле при одновременной засыпке песка, несмотря на весьма хорошие качественные показатели отливок, было выявлено суммарно 16 отливок (из 160 отливок со всех 5 серий), не соответствующих требуемым размерной точности и (или) чистоте поверхности.

Существенное значение на качество отливок оказывает плотность полистироловых моделей. Этому следует уделять серьезное внимание в промышленных технологиях литья.

Выводы: Показано, что способ формовки может оказывать существенное влияние на качество отливок из алюминиевых сплавов. В рассматриваемых производственных условиях наилучшим качественным показателям отливок по размерной точности и чистоте поверхности способствовала реализация способа формовки с вибраторами, закрепленными на опоке, при одновременной засыпке песка.

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. Граблев А.Н. Гидромеханика литейной формы при литье по газифицируемым моделям алюминиевых сплавов: Дис...канд. техн. наук. — МГИУ, 2002.
4. Эффективные способы модифицирования структуры литейных сплавов / В.Б. Деев, К.В. Пономарева, А.В. Прохоренко и др. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 31. — Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2013. С. 44–48.

В.И. Багрянцев, С.А. Бровченко, А.П. Подольский, А.А. Рыбушкин
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

ВИХРЕВАЯ ФОРСУНКА ВНЕШНЕГО СМЕШЕНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ВЯЗКОГО ТОПЛИВА

Описаны основные принципы работы вихревой форсунки внешнего смешения, особенности распыления жидких сред на примере водоугольного топлива, показаны результаты исследования влияния механической обработки на вязкость топлива и качество распыления водоугольного топлива, приведены результаты расчета диаметра капель, получаемых при распылении водоугольного топлива через форсунку. Показано, что форсунка внешнего смешения в сравнении с прямоструйными экономит до 20 % топлива.

The basic principles of work of a vortex nozzle of external mixture, feature of dispersion of liquid environments on the example of water coal fuel are described, results of research of influence of machining on viscosity of fuel and quality dispersion of water coal fuel are shown, results of calculation of diameter of the drops received at dispersion of water coal fuel through a nozzle are given. It is shown that the nozzle of external mixture in comparison with standard saves to 20 % of fuel.

Введение

Вихревые форсунки для диспергирования жидкого металла и шлака широко применялись в металлургии для получения порошков. Распылялись чугун, медь сталь, быстрорежущая сталь. Во всех случаях форсунки работали эффективно и надежно. В последнее время вихревая форсунка нашла применение для распыления вязких топлив, таких как мазут, нефть, водоугольное топливо.

Водоугольное топливо характеризуется, как правило, высоким значением вязкости и, из-за наличия воды, большим поверхностным натяжением, поэтому для диспергирования представляет значительные трудности. Водоугольное топливо при распылении форсункой любого типа должно иметь вязкость не менее 0,14 Па·с. Для полного сжигания, в отличие от мазута, необходимо также иметь определенный гранулометрический состав. Вязкость водоугольного топлива практически не зависит от температуры, поэтому снижение вязкости может быть достигнуто другими путями, например, пропуском через кавитатор или повторным пропуском через мельницу, либо, в крайнем случае,

необходимо добавлять воду. При повышенной вязкости топливо не будет полностью сгорать, что приведет к ухудшению процесса сжигания топлива.

Исследовалось влияние механической обработки на вязкость водоугольного топлива. Топливо предварительно готовилось на вибромельнице, затем при помощи перистальтического насоса типа НП-25 подавалось на гомогенизатор, в котором происходит кавитационная обработка топлива. При помощи такой обработки удавалось добиться снижения вязкости в некоторых случаях в 1,6 раза. После пропуска доля самой мелкой фракции возросла на 8-10%. Дальнейшие эксперименты с фракционным составом показали, что повторные пропуски не изменяют фракционный состав топлива. Вероятно, при первом пропуске острые края частиц обкатались и дальнейшее разрушение не происходит. При кавитационной обработке топливо становится гомогенным и разброс точек по вязкости снижается с 90 % до 7 %.

Повторный пропуск топлива через вибромельницу приводит также к значительному улучшению качества топлива. На рисунке 1 представлено распределение частиц угля по диаметру после первого пропуска через мельницу (верхний график) и после повторного пропуска (нижний график).

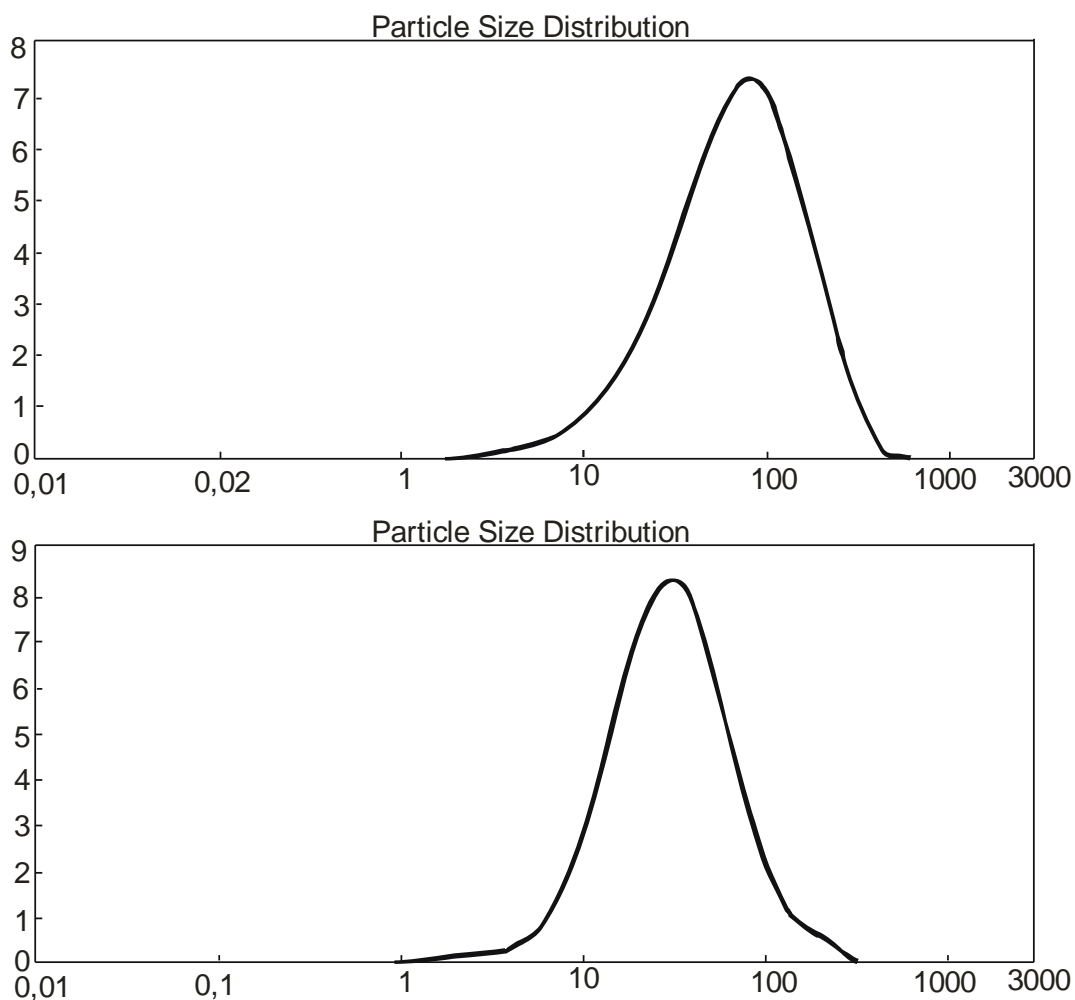


Рисунок 1 – Распределение частиц по диаметру после обработки шлама в мельнице ВМ-60

Основные принципы работы вихревой форсунки внешнего смешения

Жидкое топливо попадает в центр вихря, который организуется специальным устройством, называемым в научной литературе вихревой камерой. По экспериментальным данным [1] в зоне выходного сопла возникает некое подобие тороидального вихря с высоким уровнем турбулентных пульсаций скорости. В данной области также сильно понижается давление, реализуется течение с высокими градиентами скорости и давления, кроме этого из данной области исходит звуковое излучение высокой частоты и интенсивности. При таких условиях жидкая частица испытывает огромные нестационарные нагрузки. При дальнейшем перемещении частица в вихревой форсунке внешнего смешения, в отличие от обычных форсунок, не следует за потоком, а движется в поле центробежной силы поперек линий тока, подвергаясь большей разрушительной силе; как результат – происходит высокоэффективное распыление потока.

Предположим, что при распылении капиллярные и вязкие силы имеют один порядок величины. При распылении в области взаимодействия энергия восполняется за счет притока газа. Поток кинетической энергии газа ($\rho_r \Delta u^2 u S_\phi \tau^{2/3}$) расходуется на преодоление сил вязкости при деформации капли ($\pi \mu_r \Delta u n D^2$) и образование дополнительной поверхности раздела фаз ($\pi \sigma n D^2$), приравняв эти соотношения получим:

$$\rho_r \Delta u^2 u S_\phi \tau^{\frac{2}{3}} \approx \pi \mu_r \Delta u n D^2 + \pi \sigma n D^2 \quad (1)$$

где ρ_r – плотность газа, кг/м³; u – окружная скорость потока, м/с; Δu – разность скоростей частицы и пульсаций газовой среды, м/с; $\rho_r \Delta u^2$ – аналог кинетической энергии пульсаций газовой среды, кг/м·с²; S_ϕ – площадь сечения воздушного сопла форсунки, м²; $\tau = Q_{ж}/Q_r$ – отношение объёмных расходов газа и жидкой фазы; $\tau^{2/3}$ – доля сечения, занятая каплями; n – число частиц, поступающих в область дробления в единицу времени; D – размер частиц, м; μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Число n определяется из расхода жидкого топлива:

$$n = 6 \frac{G_{ж}}{\pi \rho_{ж} D^3}; \quad \frac{G_{ж}}{\rho_{ж}} = Q_{ж}; \quad Q_{ж} = u S_\phi \quad (2)$$

где $G_{ж}$ – массовый расход частиц, кг/с; $\rho_{ж}$ – плотность топлива, кг/м³.

Диаметр капель можно оценить с помощью соотношения:

$$D \approx 6 \frac{\tau^{\frac{1}{3}}}{\rho_r \Delta u^2} \cdot (\sigma + \mu_r \Delta u) \quad (3)$$

Если левую и правую части полученного соотношения разделить на диаметр струи жидкого топлива, то получается критериальное уравнение:

$$\frac{D}{d} = 6\tau^{\frac{1}{3}} \left(We^{-1} + Re^{-1} \frac{\mu}{\mu_2} \right) \quad (4)$$

где $We = \rho_2 \Delta u^2 \frac{d}{\sigma}$ – число Вебера; $Re = \frac{\rho \Delta u d}{\mu_2}$ – критерий Рейнольдса; d – диаметр струи топлива, м.

На рисунке 2 приведены результаты расчета диаметра капель, получаемых при распылении водоугольного топлива через форсунку согласно уравнению (4). При расчете исследовали влияние отношения объемных расходов газа и жидкой фазы τ в диапазоне от 0,001 до 0,012 и относительных скоростей частицы и газовой среды Δu в диапазоне от 200 м/с до 400 м/с для диаметра струи 0,005 м.

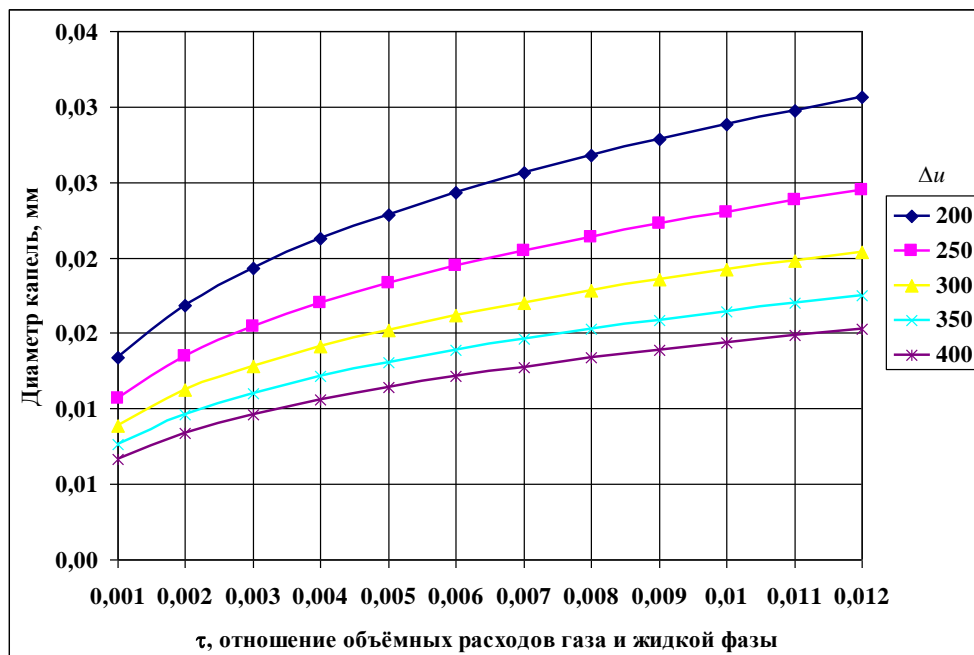


Рисунок 2 – Зависимость диаметра капель от отношения расходов газа и жидкой фазы (τ) для различных относительных скоростей частицы и газовой среды (Δu)

Среднее значение скорости может принимать любые значения, но предельное значение Δu ограничено скоростью звука а, так как для перехода через значение а необходимы специальные условия (геометрические, тепловые или расходные), что маловероятно в локальном объеме. С учётом этого ограничения, а также того факта, что по тангенциальной составляющей скорости ограничения нет, имеем оценку

$$u = \sqrt[2]{0,4a^2 + 0,14u^2} \quad (5)$$

где a – скорость звука, м/с.

Рассмотрим также вопрос об инерционности частиц при воздействии пульсации. Для разницы скоростей частицы и потока из уравнения движения для пульсирующего потока имеем:

$$W = u + k\Delta u \sin(\omega - \psi) \quad (6)$$

$$k = \frac{\Delta W_p}{\Delta u} = \cos \psi = \left(1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)^{-1/2} \quad (7)$$

где W – скорость движения, м/с; ψ – сдвиг фазы; ω – частота пульсаций по-

тока, Гц; $\alpha = \frac{18\mu_c \rho_c}{\rho_{жс} d^2}$ – коэффициент Стокса.

Анализ шума, исходящего от выходного отверстия форсунки, показывает, что основная доля в спектре частот приходится на значение $\omega = 104$ Гц. Для капли топлива $D = 5,2$ мкм, $\alpha = 2,14 \cdot 10^4$ с⁻¹ и тогда $k = 0,906$. Для $D = 7$ мкм $k = 0,763$. Даже мелкая капля отстаёт от потока газа.

Рассмотрим также отклонение частицы в цилиндрической системе координат, вызванное радиальным смещением частицы под действием центробежной силы:

$$W - W_r = \frac{W_t^2}{\alpha r} \quad (8)$$

где W_t – тангенциальная компонента скорости частицы, м/с; W_r – радиальная компонента скорости частицы, м/с; r – радиальная координата, м.

Для частицы диаметром 7 мкм радиальная составляющая имеет тот же порядок что и тангенциальная. Даже частицы диаметром 0,3 мкм отклоняются от потока при больших скоростях на величину до 20 %. Частица как бы пересекает все неоднородности потока газа.

Необходимо также принять во внимание и температурный фактор, который влияет через изменение физических параметров газа. Частица быстро попадает в горячий поток, поэтому для оценки можно воспользоваться результатом решения задачи о теплообмене сферы со средой при скачке температуры. При этом температура поверхности:

$$T_{\text{п}} = \frac{T_{\text{жс}} + \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_2 c_2}{\lambda_{\text{жс}} \rho_{\text{жс}} c_{\text{жс}}}} \cdot T_2}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_2 \rho_2 c_2}{\lambda_{\text{жс}} \rho_{\text{жс}} c_{\text{жс}}}}} \quad (9)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура поверхности капли, °С; T_2 – температура газа, °С; $T_{\text{жс}}$ – температура жидкости, °С; λ_2 и $\lambda_{\text{жс}}$ – коэффициент теплопроводности газа и жидкости соответственно, Вт/(м·К); c_2 и $c_{\text{жс}}$ – теплоемкость газа и жидкости соответственно, Дж/(кг·К); ρ_2 и $\rho_{\text{жс}}$ – плотность газа и жидкости соответственно, кг/м³;

Повышение температуры поверхности частицы составит 43 °С, при этом вязкость воздуха изменится на 10 %. При оценке было использовано время нахождения частицы в области взаимодействия $t \sim 10^{-4}$ с. Частица в это время успевает получить несколько актов воздействия от потока газа и при этом можно считать газ с постоянными теплофизическими свойствами.

Конструктивные особенности вихревой форсунки описаны в патенте на полезную модель [2]. Важной особенностью форсунки является сильно пониженное давление в районе среза топливной трубки. На рисунке 3 представлена зависимость давления в центре от давления перед форсункой.

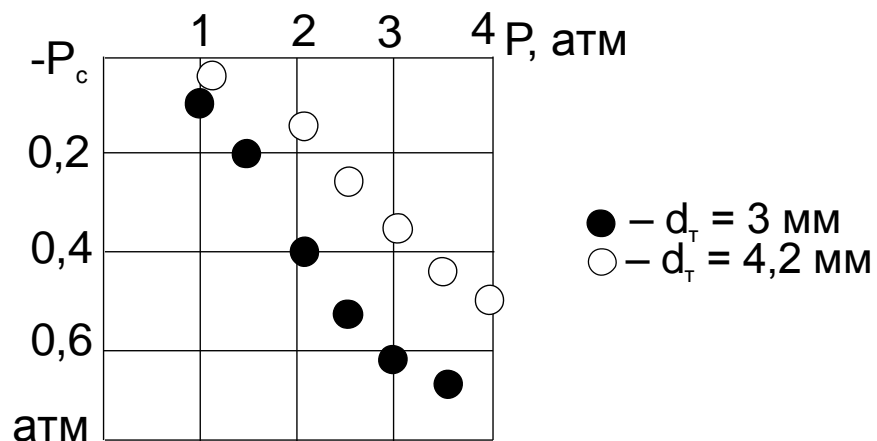


Рисунок 3 – Давление в топливной трубке в зависимости от давления перед форсункой для различных диаметров трубки

Давление в центре вихря носит параболический характер и его значение усредняется по диаметру трубки. Форсунка во многих технических решениях не требует применения насосов, обычно достаточно лишь поднять топливо на заданную высоту. Давление перед форсункой влияет на тонкость распыления, чем больше давление, тем тоньше получаются капли топлива. Обычно для хо-

рошей работы со 100 % сжиганием топлива достаточно 3-3,5 ати. Удельные затраты сжатого воздуха находятся на уровне 0,8-1 кг/кг топлива. Расход топлива рассчитывается из соотношения:

$$\Delta P = 32U\eta \frac{L}{d^2} \quad (10)$$

где ΔP – разность давления в топливной трубе, Па; U – среднерасходная скорость по сечению трубопровода, м/с; η – динамическая вязкость топлива, Па·с; L – длина трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м.

Обозначим скорость на оси течения как U_{\max} , тогда профиль скорости

$$\frac{U}{U_{\max}} = 1 - \bar{r}^2 \quad (11)$$

где $\bar{r} = r/R$ – безразмерный радиус; r – радиальная координата, м; R – радиус трубопровода, м.

Экспериментальные результаты с распылением мазута показали, что форсунка внешнего смешения в сравнении с прямоструйными экономит до 20 % топлива.

Сравнительные характеристики форсунки штатной внутреннего смешения и вихревой форсунки внешнего смешения приведены в таблице 1.

По большинству показателей вихревая форсунка внешнего смешения значительно превосходит форсунку с внутренним смешением. Экономия топлива позволяет работать топку в нормальном режиме и применять менее калорийное топливо. Низкое давление топлива в форсунке позволяет избежать абразивного износа самой форсунки и винтового насоса, который стоит очень дорого. Остаточное содержание углерода после сжигания ВУТ вихревой форсункой внешнего смешения менее 0,1 %.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики форсунок

Тип форсунки	Температура процесса, °С	Расход топлива, кг/ч	Давление топлива, ати	Расход воздуха, кг/ч	Диаметр трубки, мм	Полнота сжигания, %
Форсунка внутреннего смешения	1030	80	3-4	60	6	80
Вихревая форсунка	1030	44,8	0,03	93,8	4,2	100

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
2. Патент. № 49182. Форсунка.
3. М.А. Гольдштик. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
4. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. Гидродинамика. Т 6. – М.: Наука, 1988. – 733 с.
5. В.И. Багрянцев, З.Я. Павленко, А.В. Чевалков. Моделирование движения порошка в центробежном газовом потоке // Порошковая металлургия. – 1992. – № 3.
6. В.И. Багрянцев, А.С. Кармацкий, А.В. Чевалков, А.Л. Николаев / Анализ работы установок для получения порошков специальных сплавов. // Материалы семинара-совещания «Новые металлургические технологии и оборудование». – Новосибирск. 1988.
7. С.С. Кутателадзе, Э.П. Волчков, В.И. Терехов. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: ИТФ, 1987. – 282 с.
8. А.С. СССР № 1748379. Устройство для диспергирования расплава. 1989
9. А.С. СССР № 1787692. Установка для получения порошка распылением расплава. 1990.
10. А.С. СССР № 1563053. Способ получения металлических порошков. 1990

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский

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

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ЦИНК – ДИБОРИД ХРОМА: ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ И СВОЙСТВА

Исследованы условия электроосаждения, коррозионная стойкость и микротвердость гальванических композиционных покрытий на основе цинка, содержащих в качестве модифицирующей добавки борид хрома CrB₂ в наносостоянии в количестве 0,64 % масс. Установлено, что введение в цинковое покрытие нанопорошка борид хрома увеличивает его коррозионную стойкость в 2,3 раза, микротвердость – в 1,2 раза. После фосфатирования коррозионная стойкость композиционного покрытия возрастает в 2,2 раза, хроматирования – в 1,8 раза.

The conditions of electrodeposition, corrosion resistance and microhardness of composite electroplating a zinc-based coating containing as builder chromium boride CrB₂ in nanostate in an amount 0,64 wt% are investigated. It is established that the introduction in a zinc coating of chromium boride nanopowder is increases the corrosion resistance by 2,3 times, micro-hardness – 1,2 times. After a phosphate corrosion resistance of the composite coatings is increases by 2,2 times, chromate – 1,8 times.

Среди защитных металлических и неметаллических покрытий цинковые покрытия являются одними из наиболее эффективных и распространенных. Широкое применение антикоррозионных цинковых покрытий для защиты стальных и чугуновых изделий обусловлено следующими причинами:

- высокая природная стойкость самого цинка вследствие образования на цинке в коррозионной среде защитных пленок из продуктов коррозии;
- высокая анодность защиты стали цинкованием в атмосферных условиях и в пресной воде при температурах до 343 К; при более высоких температурах цинковое покрытие защищает сталь в агрессивных средах только механически, превращаясь из анодного покрытия в катодное;
- цинкование реализуется во многих технологических вариантах, обеспечивающих различные механизмы образования, физико-химические и эксплуатационные характеристики покрытий;
- процессы цинкования технологически относительно просты, механизированы и автоматизированы, имеют высокие технико-экономические показатели.

Благодаря этому цинковые покрытия по объему и номенклатуре защищаемых от коррозии изделий не имеют равных среди других металлических покрытий. Исходя из механизма образования и физико-химических характеристик, в настоящее время можно выделить шесть видов цинковых покрытий:

- гальванические, получаемые в растворах электролитов из солей цинка под действием электрического тока;
- металлизационные, получаемые путем распыления расплавленного цинка струей воздуха или горячего газа;
- горячецинковые, получаемые погружением в расплавленный цинк;
- диффузионные, получаемые путем химико-термической обработки в смесях на основе порошка цинка;
- цинконаполненные, представляющие собой композиции, состоящие из цинкового порошка и связующего (синтетических смол);
- комбинированные, представляющие собой комбинацию цинкового покрытия любого вида и лакокрасочного или полимерного покрытия.

При этом способ нанесения цинковых покрытий определяет такие их эксплуатационные свойства, как прочность сцепления с поверхностью покрываемого металла, твердость, пористость, коррозионная стойкость, а также сферы преимущественного применения. Можно констатировать, что ни один из перечисленных способов не является универсальным и в силу разных причин имеет присущие ему технологические ограничения. Так, цинковые покрытия, полученные гальваническим способом, отличаются высокой чистотой, плотностью и однородностью структуры, вследствие чего обладает удовлетворительной механической прочностью и химической стойкостью. В качестве преимуществ данного процесса цинкования можно отметить следующие:

- электроосаждение осуществляют при сравнительно низких температурах (298 – 343 К) и плотности тока (2 – 30 А/дм²);
- возможность регулирования толщины цинкового покрытия, скорости его электроосаждения, нанесение на изделие с жесткими допусками по геометрическим размерам;
- возможность применения для защиты резьбы муфт и труб, в т.ч. нефтяного сортамента, тонкостенных труб, тогда как применение других высокотемпературных способов вызывает значительную деформацию их профиля, незаменимость при нанесении на внешнюю и внутреннюю поверхности покрытий различной толщины, либо на одну из них;
- сокращение расхода цинка по сравнению с другими в 3 – 4 раза.

Наряду с отмеченными преимуществами этот способ цинкования имеет недостатки, вообще присущие гальванической технологии: чувствительность к изменению состава электролита, возможность наводороживания и, как следствие, охрупчивания защищаемого металла с образованием в нем микротрещин и пористости, необходимость очистки растворов от механических примесей и регенерации, образование высокотоксичных сточных вод, определенные трудности в утилизации жидких и твердых отходов.

Одним из направлений улучшения эксплуатационных свойств гальванических цинковых покрытий может быть модифицирование электроосаждаемой цинковой матрицы специально вводимыми в электролит нанодисперсными добавками, значительный положительный опыт применения которых в процессах электролитического хромирования, золочения, серебрения, железнения накоплен в России и за рубежом. В связи с этим исследованы электроосаждение, коррозионная стойкость и микротвердость гальванических композиционных покрытий (ГКП) цинк – нанопорошок бориды хрома CrB_2 . Содержание CrB_2 в нанопорошке составляет 95,12 % масс., а размерный диапазон наночастиц соответствует интервалу 20 – 90 нм. Микрофотографии и дисперсный состав нанопорошка бориды хрома представлены на рисунках 1 и 2. Средний и максимальный размер наночастиц бориды хрома составляет 42,0 и 90,0 нм. Цинковые ГКП осаждались из щелочного цинкового электролита, содержащего ZnO – 10, NaOH – 100, органическая добавка – 4 кг/м³ при температуре 298 К, катодной плотности тока 0,2 кА/м², концентрации нанопорошка бориды 6 – 8 кг/м³. В качестве анодов использовались цинковые плас-

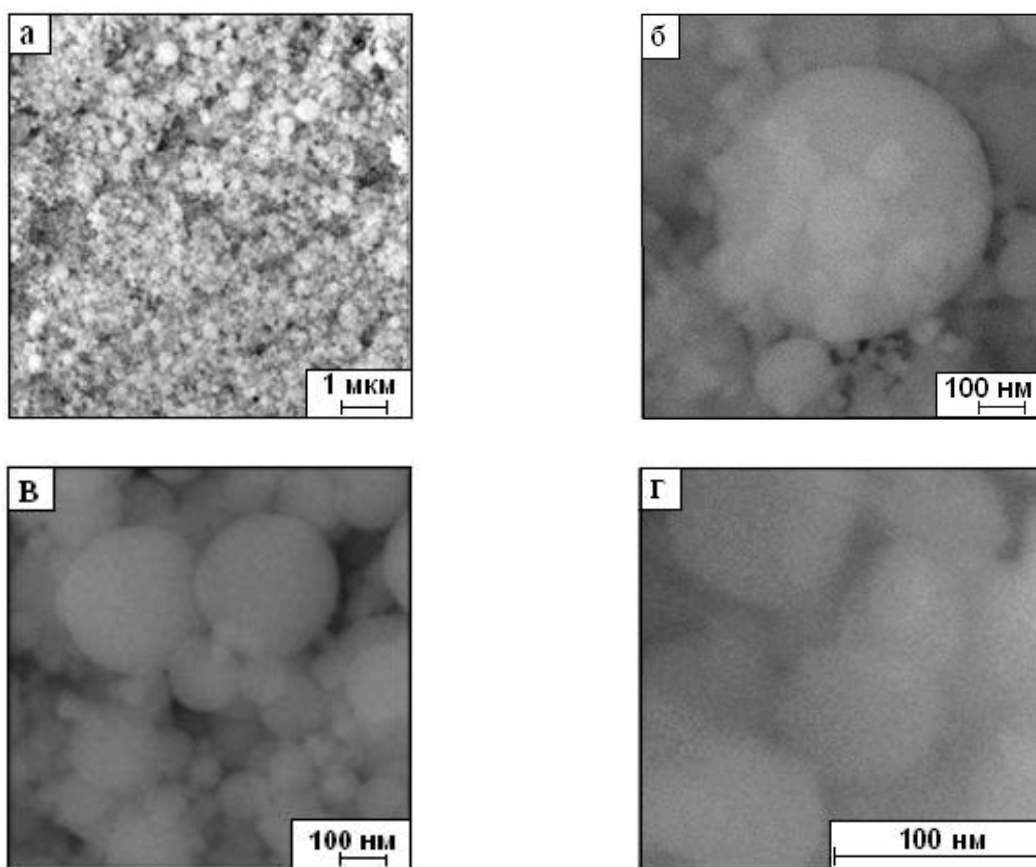


Рисунок 1 – Микрофотографии нанопорошка бориды хрома: а – в состоянии поставки; б – морфологическая картина агрегата; в – ансамбль частиц и агрегатов; г – отдельные частицы

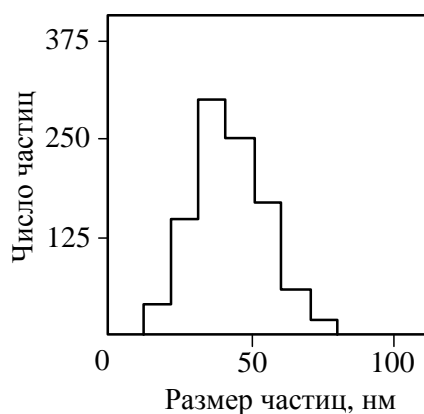


Рисунок 2 – Дисперсный состав нанопорошка борида хрома (число частиц 738)

тинки размером $0,08 \times 0,1$ м, катодов – стальные образцы (сталь 3) с площадью поверхности $2,0 \cdot 10^{-3}$ м². Для приготовления электролита – суспензии к навеске борида добавляли небольшое количество чистого электролита, перемешивали до полного смачивания порошка, количественно переносили в электролизер и разбавляли до требуемой концентрации. Корректировка pH производилась с помощью растворов NaOH или H₂SO₄. Свежеприготовленный электролит прорабатывался в течение 2-х часов при катодной плотности тока 0,01 – 0,02 кА/м². В условиях лабораторных исследований осаждение покрытий проводилось в стеклянных термостатированных электролизерах емкостью 0,001 м³ при перемешивании суспензии магнитной мешалкой. Скорость движения электролита составляла 0,25 – 0,75 м/с. Содержание борида хрома в композиционном покрытии определялось весовым методом после растворения покрытия в 10 %-ном растворе HCl. Процент включения CrB₂ в матрицу рассчитывался как отношение массы нерастворимого остатка к массе покрытия.

Коррозионная стойкость покрытия определялась по ГОСТ 9.308-85 методом испытания по воздействию нейтрального соляного тумана стальных образцов с осажденным композиционным покрытием толщиной 6 мкм при температуре 35°C. Для распыления и получения солевого тумана использовался 5 %-ный раствор хлорида натрия. Коррозионную стойкость покрытий оценивали по первым признакам коррозии основы. Продолжительность испытаний составляла 240 ч. Микротвердость определялась на образцах с покрытием толщиной 10 мкм. При определении микротвердости статическая нагрузка при измерениях составляла 0,2 Н. Выход цинка по току определялся весовым методом с помощью последовательно подключенного к электролизеру медного кулонометра.

Результаты исследования коррозионной стойкости покрытий приведены на рисунке 3. Содержание борида хрома в ГКП составило 0,64 % масс. Цинковое и композиционное покрытия подвергались для повышения коррозионной стойкости пассивации – хроматированию и фосфатированию. Хроматирование проводили в растворе, содержащем Na₂Cr₂O₇ – 35, Na₂SO₄ – 15, HNO₃ – 7 кг/м³, при температуре 295 К в течение 20 секунд. Фосфатирование

проводили в растворе, содержащем ZnO – 10, Na_3PO_4 – 50, $NaNO_3$ – 10 $кг/м^3$ при температуре 345 К в течение 30 минут. Можно видеть, что введение в цинковое покрытие нанопорошка борида хрома увеличивает его коррозионную стойкость в 2,3 раза. После хромирования коррозионная стойкость композиционного покрытия возрастает в 1,8 раза, а после фосфатирования – в 2,2 раза. На цинковых покрытиях пассивирующий эффект проявляется в меньшей мере: коррозионная стойкость возрастает соответственно в 1,5 и в 1,3 раза. Следовательно, фосфатирование композиционных покрытий оказывается более эффективно, чем хромирование, что весьма важно и с экологической точки зрения.

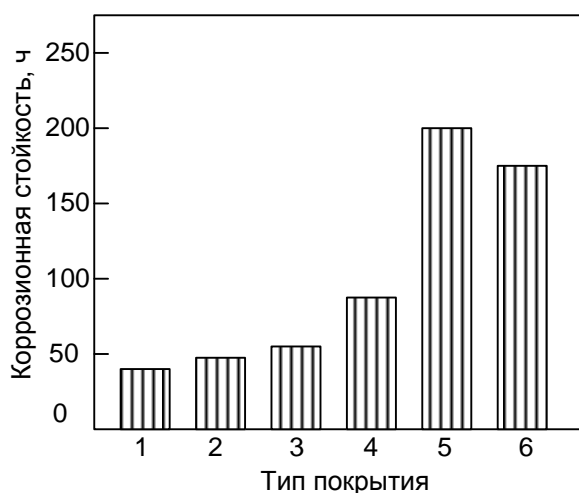


Рисунок 3 – Коррозионная стойкость гальванических цинковых покрытий (1, 2, 3 – цинковые покрытия до и после фосфатирования и хромирования, 4, 5, 6 – композиционное покрытие цинк – борид хрома до и после фосфатирования и хромирования)

Микротвердость цинковых покрытий составляет $1,00 \pm 0,10$ ГПа, композиционных покрытий $1,20 \pm 0,10$ ГПа, т.е. выше в 1,2 раза.

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие основные факторы повышения эксплуатационных свойств ГКП цинк – борид хрома. Наночастицы борида хрома имеют форму, близкую к сферической или овальной, без острых кромок, обладают высокой химической и адсорбционной активностью, образуют устойчивые к седиментации и коагуляции электролиты – суспензии; благодаря малой массе эффективно переносятся к покрываемой поверхности. При электроосаждении цинка взвешенные в электролите наночастицы борида благодаря гидродинамическим, молекулярным и электростатическим силам взаимодействуют с поверхностью растущего осадка, что приводит к образованию композиционного покрытия. При этом наночастицы борида выступают в качестве центров кристаллизации, от которых начинается кристаллизация цинка. Благодаря большому количеству наночастиц борида, участвующих в процессе, кристаллизация носит массовый многозародышевый характер, а образующиеся покрытия имеют малые размеры

структурных фрагментов, характерный матовый цвет и практически беспористы. Сочетание безинерционного массопереноса наночастиц борида и массовой кристаллизации цинка обуславливает равномерное осаждение покрытий на эквипотенциальных поверхностях. Малый размер частиц борида и кристаллитов цинка обеспечивает точное копирование микрорельефа поверхности, что увеличивает общую поверхность и прочность сцепления композиционного покрытия с основой. Повышение качества ГКП – коррозионной стойкости и микротвердости – достигается при малом содержании борида в покрытии – (0,6 – 0,7) % масс., что делает процесс экономичным.

Таким образом, из-за малого размера частиц борида хрома и их невысокого содержания в покрытии, повышение комплекса физико-механических свойств ГКП не может быть связано только с особыми свойствами борида. Следовательно, в отличие от микропорошков, нанопорошок борида является не только наполнителем или второй фазой, а выступает в качестве сильного структурообразователя в процессе электрокристаллизации цинка и обеспечивает его массовую кристаллизацию, что приводит к образованию высокодисперсной беспористой структуры покрытия с повышенной коррозионной стойкостью и микротвердостью.

УДК 661.665:[658.567.1:669]

О.А. Полях, В.В. Руднева, Н.Ф. Якушевич, Г.В. Галевский
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

ПРОИЗВОДСТВО МИКРО- И НАНОПОРОШКА КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЁМА

Проведена оценка мирового производства и потребления карбида кремния. Показана целесообразность применения техногенного микрокремнезёма для производства карбида кремния методами печного синтеза и плазмометаллургической технологии. Предложены схемы механизмов углеродотермического синтеза и плазмометаллургического получения карбида кремния.

Global production and consumption of silicon carbide rated. The expediency of using of tehnogeneous silica fume for producing of silicon carbide by methods of furnace synthesis and plasmametallurgical technology showed. Schemes of mechanisms of carbothermal synthesis and plasmametallurgical synthesis of silicon carbide proposed.

Мировое потребление карбида кремния составляет 600 – 700 тыс. т в год и оценивается в 670 млн. долл. США. Крупнейшими сферами использования карбида кремния являются металлургия (около 45 % мирового спроса), производство абразивов (до 30 %) и огнеупоров (до 25 %). Маломасштабными по фактическому объёму (менее 1 %), но интенсивно развивающимися и имеющими высокую стоимостную оценку, являются рынки сбыта карбидокремниевых порошковых материалов: порошка с размером частиц менее 1 мкм (т.н. «микронизированный карбид») для керамики и нанопорошка с размером частиц менее 100 нм (т.н. «нанокарбид») для высококачественной конструкционной керамики и гальваники. Введение в обращение карбида кремния в виде нанокарбида открывает новые направления его применения.

Мировые производственные мощности по выпуску карбида кремния всех видов оцениваются в 1,1 млн. т в год. Географическая структура их распределения характеризуется следующими данными (тыс. т в год): Китай – 400-500, Норвегия – 85, Россия – 70, Япония – 59, США – 42, Венесуэла – 41, Канада – 40, Украина – 32,5, Бразилия – 30, Испания – 20, Польша – 20, Мексика – 20.

Лидером на мировом рынке производства карбида кремния является французская компания-гигант «Saint-Gobian». На втором месте находятся объединившиеся компании «Exolon-ESK» (США) и «Electroschmelzwerk Kempten GmbH» («ESK») (ФРГ). В России основным производителем карбида кремния является ОАО «Волжский абразивный завод» (г. Волжский Вол-

гоградской области), который выпускает кусок карбида кремния чёрного, зелёного и электротехнического, шлифзерно, шлифпорошки и микропорошки, абразивный инструмент на керамической и бакелитовой связках. Вклад России в мировое производство карбида кремния составляет около 70 тыс. т в год.

Цены на зерно и порошки карбида кремния в последние несколько лет остаются стабильными и составляют (долл. США за т):

Чёрный, чистотой около 99 %	
Сорт 1	1400 – 1500
Сорт 2	1150 – 1300
Зелёный, чистотой свыше 99,5 %	1650 – 1850
Огнеупорный	
Сорт 1, чистотой около 98 %	1300 – 1400
Сорт 2, чистотой около 95 %	1050 – 1250
Микронизированный чистотой около 98 %	13000 – 15000
Нанокарбид чистотой около 98 %	200000 – 250000

В ближайшее время прогнозируется рост цен на нанокарбид кремния.

Новым направлением в технологии карбида кремния, позволяющим достичь нужных характеристик продукта и отвечающим требованиям ресурсосбережения, является использование в качестве сырья тонкодисперсных кремнезёмсодержащих материалов техногенного и природного происхождения, не представляющих ценности и имеющих большие объёмы накоплений. Так, например, объектом внимания исследователей и практиков-технологов в течение уже 25 лет является микрокремнезём различного происхождения (техногенный, природный, искусственно синтезированный). Общим свойством микрокремнезёма является его чрезвычайно высокая дисперсность, составляющая 4-10 нм у искусственно синтезированных кремнезём-углеродных композиций, 100-200 нм у микрокремнезёма техногенного происхождения, образующегося при электроплавке кремния и высококремнистых ферросплавов, 1000-5000 нм у кремнезёмсоставляющей природных шунгитовых пород. Применение микрокремнезёма способствует освоению нанотехнологий в производстве карбида кремния и созданию наноматериалов на его основе.

К настоящему времени сформировались три направления использования микрокремнезёма в технологических процессах: синтез кремнийорганических соединений; вторичное использование в производственных циклах (при выплавке кремния и ферросилиция); синтез высокодисперсного карбида кремния (рисунок 1).

Вследствие противоречивости существующих данных о характеристиках микрокремнезёма, проводилась его комплексная физико-химическая аттестация, которая включала определение фазового и химического составов, удельной поверхности, размера и морфологии частиц. Исследовался микрокремнезём, получаемый при производстве кристаллического кремния Кр1 на ОАО «РУСАЛ – Иркутск» (МК-Кр) и ферросилиция марки ФС75 на ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (МК-ФС).

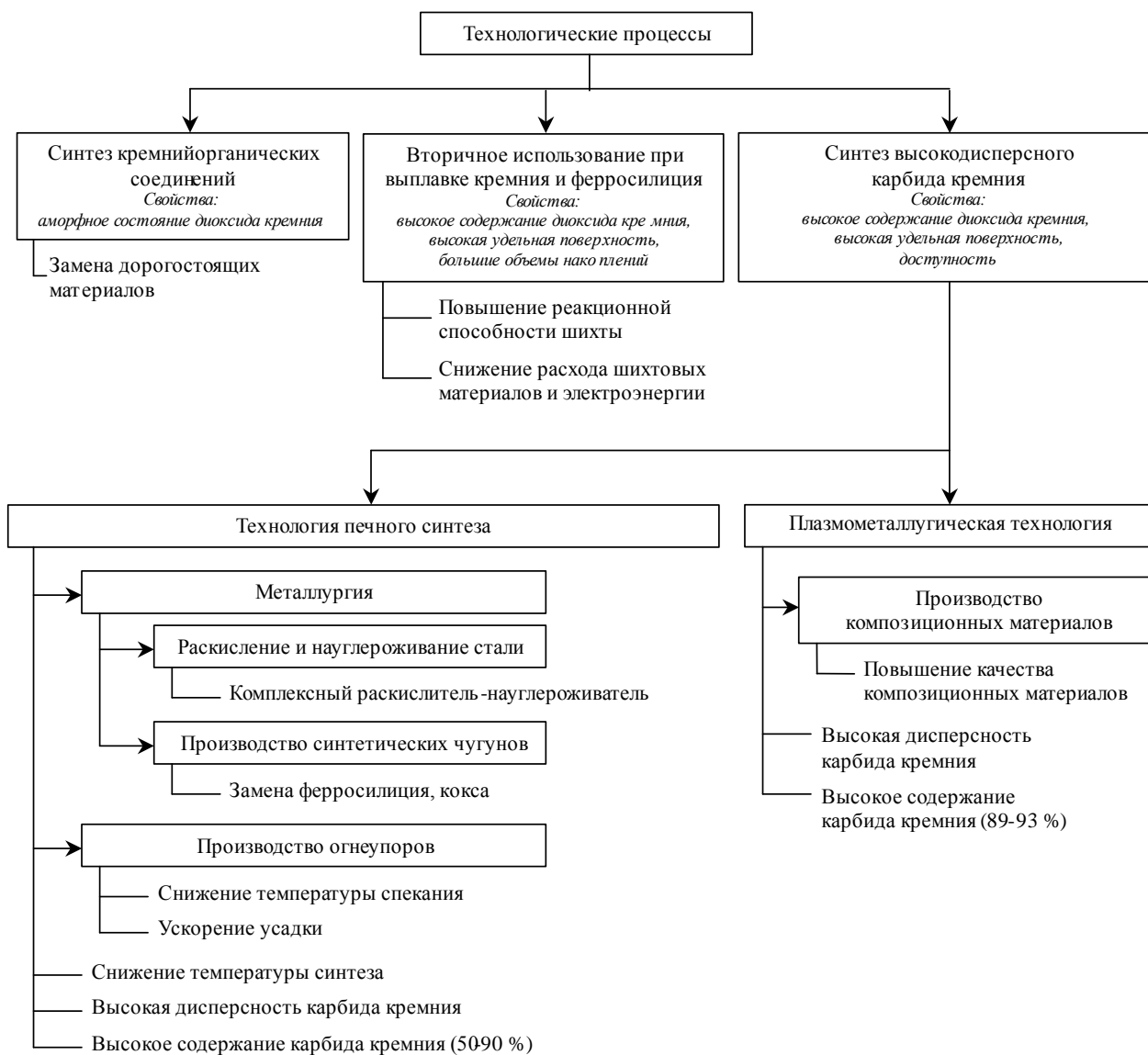


Рисунок 1 – Использование микрокремнезёма в технологических процессах

Техногенный микрокремнезём обоих видов представлен следующими фазами: β -кристобалит, α -кварц, оксиды железа, силикаты. В микрокремнезёме МК-ФС присутствует магнетит, а в микрокремнезёме МК-Кр – шпинель $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Установлено присутствие в микрокремнезёме обоих видов оксидов кальция, фосфора, магния, марганца, титана, свободных углерода и кремния. Количественные различия в химическом составе микрокремнезёма касаются, в основном, содержания кремнезёма, соединений железа и свободного углерода (таблица 1). Удельная поверхность микрокремнезёма обоих видов составляет 20000-22000 м²/кг. Изучение микрофотографий, полученных методами растровой (РЭМ) электронной микроскопии, показывает, что оба вида микрокремнезёма 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 2, 3).

Таблица 1 – Химический состав микрокремнезёма

Элемент (соединение)	Содержание, % масс.	
	Микрокремнезём МК-Кр	Микрокремнезём МК-ФС
SiO ₂	93,41-95,33	91,72-93,63
C _{своб}	1,96-3,28	0,56-1,18
Si _{своб}	0,30-0,34	0,18-0,20
Ca(CaO)	0,30	0,52
Al(Al ₂ O ₃)	0,40	0,68
Fe(Fe ₂ O ₃)	0,36	0,6-1,4
P(P ₂ O ₅)	0,18	0,20
Mn(MnO)	0,05	0,30
Mg(MgO)	следы	1,08
Ti(TiO ₂)	0,01	следы

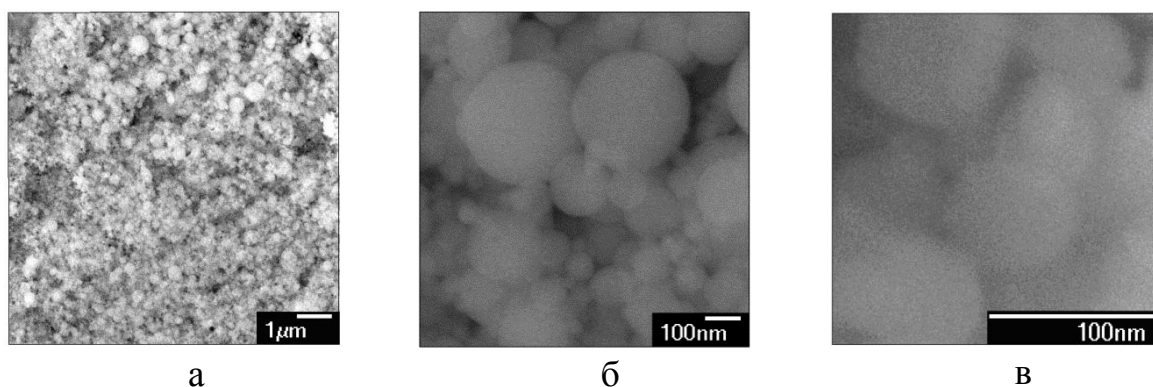


Рисунок 2 – Микрофотографии (РЭМ) микрокремнезёма МК-Кр: а – в состоянии поставки; б – ансамбль частиц и агрегатов; в – отдельные частицы

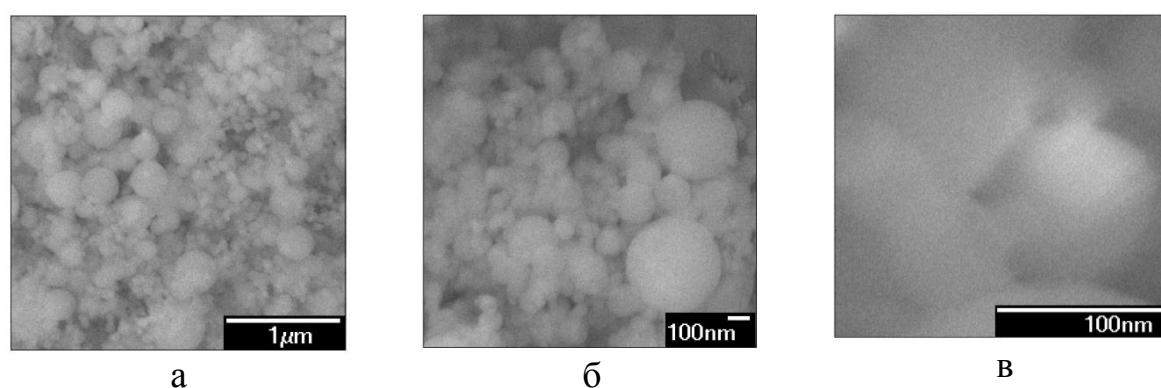


Рисунок 3 – Микрофотографии (РЭМ) микрокремнезёма МК-ФС: а – в состоянии поставки; б – ансамбль частиц и агрегатов; в – отдельные частицы

Для производства высокодисперсного карбида кремния на основе микрокремнезёма разработаны две технологии: плазмометаллургическая и печного синтеза, результаты реализации которых представлены в таблице 2, а микрофотографии микро- и нанопорошка карбида кремния – на рисунках 4, 5.

Таблица 2 – Условия получения и основные характеристики карбида кремния

Условия получения и характеристики карбида кремния	Плазмометаллургическая технология	Технология печного синтеза
Оборудование	плазмометаллургический реактор	электропечь сопротивления
Сырьевые материалы кремнезёмсодержащие:	микрокремнезём производства кремния и ферросилиция	микрокремнезём производства кремния и ферросилиция
углеродсодержащие:	природный газ (94,5% об. CH ₄)	коксовая пыль (82,69 % масс. C); сажа
Температура процесса, К	начальная температура плазменного потока 5400; температура закалки 2800-3000	1843 – 1943
Продолжительность процесса	$25 \cdot 10^{-3}$ сек	40-20 мин.
Фазовый состав	β -SiC, аморфный кремнезём	α -SiC, муллит, силикат
Химический состав, % масс.	карбид 90,87-93,23	карбид 89,77-92,02
Сопутствующие примеси, % масс.	- кремний 0,61-1,04 - оксид 4,93-7,59 - углерод 0,61-0,95	- кремний 1,06-1,32 - оксид 1,61-3,06 - углерод следы
Удельная поверхность, м ² /кг	36000-38000	3000-4000
Средний размер частиц, нм	61-65	200-900
Форма частиц	ограниченная	неправильная, осколочная

Согласно существующим термодинамическим представлениям, процесс карботермического восстановления кремнезёма протекает с активным участием газообразных оксидов кремния. Размерный эффект, возникающий в однокомпонентной системе «газ – дисперсная кристаллическая фаза», заключается в изменении давления насыщенного пара над поверхностью кристалли-

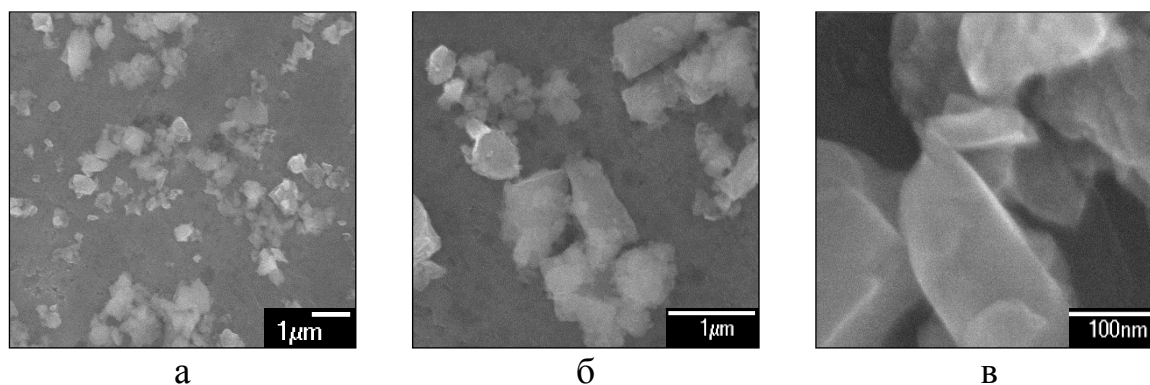


Рисунок 4 – Микрофотографии микропорошка карбида кремния – РЭМ: а – ансамбль частиц; б – отдельные частицы; в – поверхности отдельной частицы

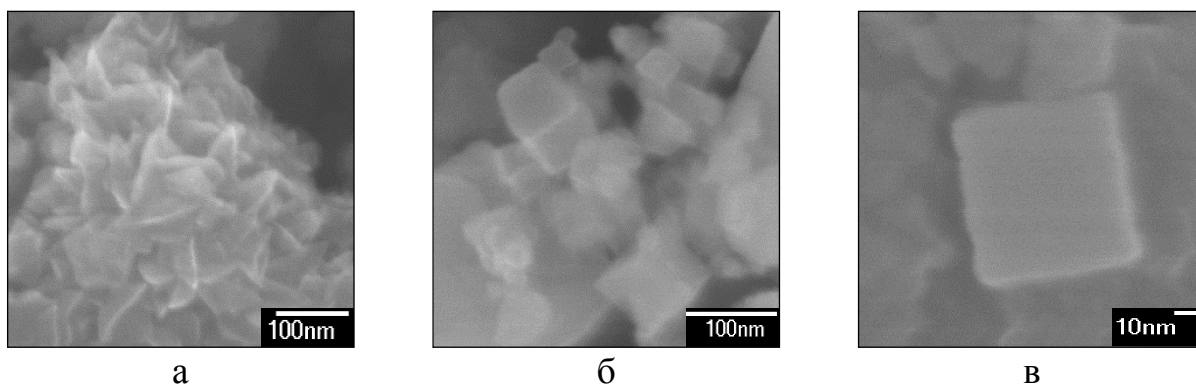


Рисунок 5 – Микрофотографии нанопорошка карбида кремния – РЭМ: а – морфологическая картина агрегата; б – ансамбль наночастиц; в – наночастица кубической формы

ческих частиц в зависимости от степени дисперсности твердой фазы. Предполагается возможность повышения скорости взаимодействия за счет увеличения поверхности испарения SiO_2 и применения углеродистого восстановителя с высокой адсорбционной способностью и развитой поверхностью.

По результатам исследований предложена схема механизма физико-химических взаимодействий при углеродотермическом восстановлении оксида кремния до карбида, позволяющая интерпретировать роль размерного фактора при синтезе карбида кремния (рисунок б).

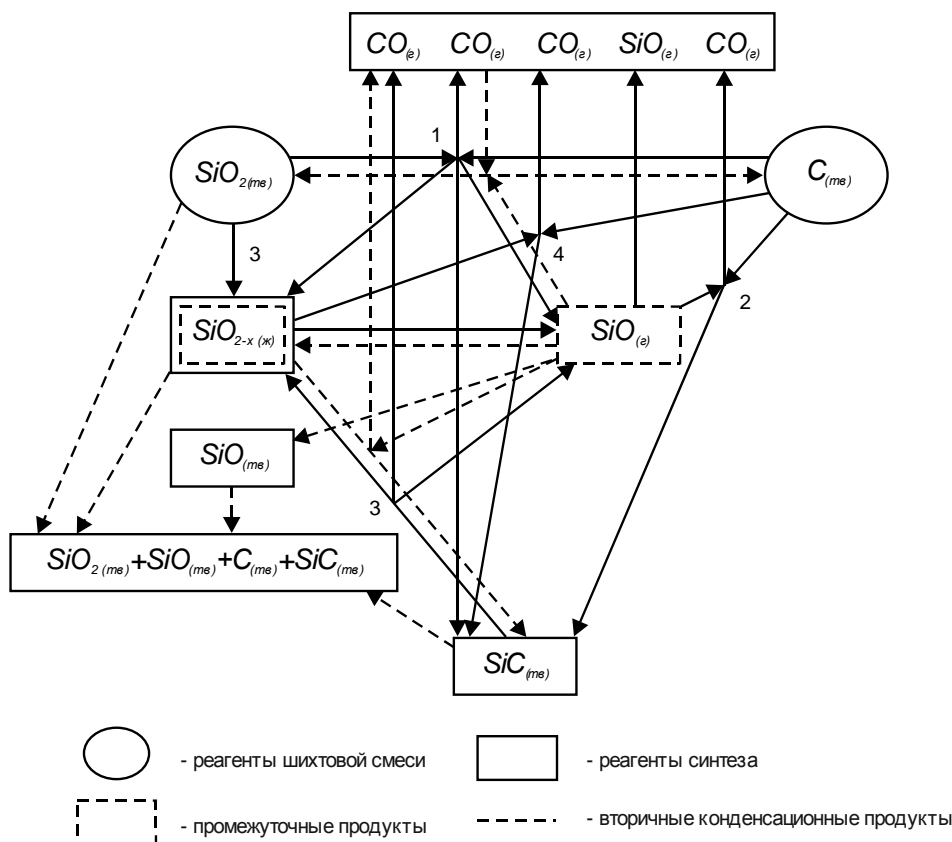


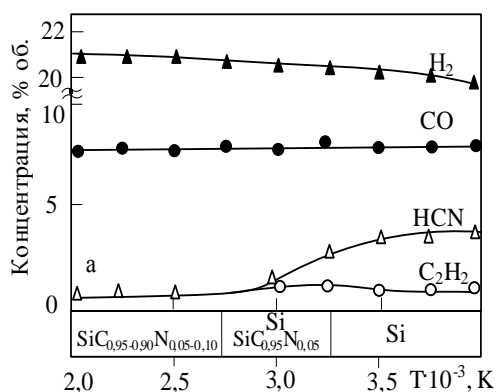
Рисунок 6 – Схема взаимодействий в процессе углеродотермического синтеза карбида кремния

При использовании достаточно мелких и хорошо перемешанных материалов первичным взаимодействием является твердофазное контактное взаимодействие диоксида кремния с углеродом $\text{SiO}_2(\text{т})+\text{C}(\text{т})$ «1», в результате которого уже при температуре ≈ 1500 К образуются газообразные монооксиды кремния и углерода, а при температурах выше 1800 К – карбид кремния и дефицитный по кислороду кремнекислородный расплав. Образование в зоне контакта кремнезёма с углеродом пленок кремнекислородного расплава увеличивает поверхность контакта и интенсифицирует процесс восстановления. Карбид кремния может образовываться и за счет взаимодействия газообразного монооксида кремния с твердым углеродом «2». Это взаимодействие также является ведущим в восстановительном процессе и от степени его развития зависит полнота извлечения кремния в карбид.

Таким образом, восстановление карбида кремния до карбида в значительной степени осуществляется через образование расплава «4», который при высоких скоростях химических реакций и достаточно длительных выдержках успевает перерабатываться без значительного накопления. Образовавшийся карбид кремния в дальнейшем взаимодействует с кремнекислородным расплавом «3» до полного его исчезновения.

На основании анализа морфологических особенностей наноразмерного порошка карбида кремния, осаждаемого в виде ограненных частиц, что свидетельствует об образовании их по механизму «пар – кристалл», и температурных зависимостей состава газообразных и фазового состава конденсированных продуктов синтеза в интервале температур 2000-4000 К (рисунок 7), предложена обобщенная гипотетическая схема, приведенная на рисунке 8. Представляется целесообразным выделить в плазменном потоке ряда пространственно разделенных зон, отличающихся по температурным условиям и, следовательно, по типу процессов, получающих в них преимущественное развитие.

В первой, высокотемпературной зоне, ограниченной сверху начальной температурой плазменного потока, протекают процессы, обеспечивающие формирование реакционных смесей необходимых составов: испарение, диссоциация и восстановление диоксида кремния, диспропорционирование карбида кремния, пиролиз метана, «газификация» углерода. Характерной особенностью процессов газификации диоксида кремния является образование в качестве промежуточного продукта летучего монооксида SiO. Во второй зоне, ограниченной температурным интервалом 3200-2800 К, внутри которого происходит значительное снижение концентрации основного карбидизатора – цианистого водорода, с достаточно большой вероятностью можно предполагать протекание процесса карбидообразования при взаимодействии в газовой фазе. Кроме этого, на поверхности сформировавшихся сверхмалых частиц карбида активно протекают сорбционные процессы, приводящие к насыщению их технологическими газами и газообразными продуктами синтеза. В третьей зоне, ограниченной интервалом 2800-2000 К, происходит азотирование частиц карбида кремния, содержание азота в котором является функцией температуры закалки и, следовательно, длительности азотирования образовавшихся в потоке частиц.



$\bar{a} \pm \Delta a$ a/b	Температура, К			
	2000	3000	3250	4000
H ₂	2,21±1,11	20,72±1,10	20,43±1,10	20,00±1,09
	15,82±0,9	14,20±0,54	13,00±0,70	11,11±0,52
CO	7,54±0,40	7,31±0,41	7,53±0,39	7,67±0,36
	1,11±0,06	1,32±0,06	1,19±0,06	1,40±0,06
HCN	0,51±0,03	1,33±0,07	2,74±0,14	3,71±0,19
	0,62±0,03	2,83±0,14	7,11±0,32	8,93±0,41
C ₂ H ₂	0,61±0,03	1,10±0,06	1,22±0,06	0,82±0,03
	0,61±0,03	0,80±0,03	0,91±0,04	0,73±0,03

Рисунок 7 – Температурная зависимость состава газообразных и фазового состава конденсированных продуктов взаимодействия микрокремнезема с метаном в потоке азотной плазмы (\bar{a} , $\pm \Delta a$ – средние арифметические значения и доверительные интервалы концентраций)

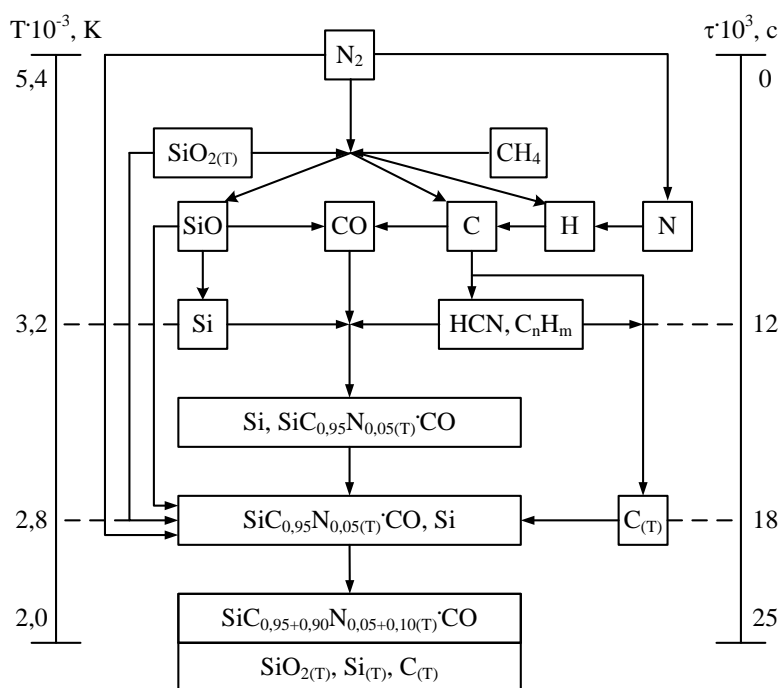


Рисунок 8 – Схема взаимодействий при плазмометаллургическом получении карбида кремния

Таким образом, для условий азотного плазменного потока промышленного реактора исследованы особенности карбидообразования и выявлен одноканальный вариант механизма образования нанокарбида кремния с участием паров кремния и циановодорода по схеме «пар – кристалл».

Плазмометаллургическая технология позволяет получать продукты в виде нанопорошков с минимальным количеством поверхностных дефектов, а управление процессом синтеза (регулирование состава газовой фазы, введе-

ние определенных добавок) обеспечивает требуемый состав. Получаемый таким способом порошок карбида кремния соответствует требованиям, предъявляемым к компонентам электроосаждаемых композиционных покрытий, и может быть использован в гальванотехнике. В настоящее время потребность в карбиде кремния с подобными характеристиками удовлетворяется, в основном, за счет особо тонких абразивных микропорошков.

При использовании технологии печного синтеза карбид кремния получается в виде микропорошка, температура синтеза может быть снижена на 800-900 ° (по сравнению с традиционным печным синтезом), а продолжительность – до 20-40 минут, что позволяет осуществить непрерывный технологический процесс, организовать экологически чистое производство, снизить расход электроэнергии почти в 2 раза, значительно уменьшить себестоимость продукции и, соответственно, расширить возможности ее использования. Однако, предложенная технология печного синтеза не решает проблему направленного получения карбида кремния со специальным и регулируемым комплексом свойств. Полученный таким способом высокодисперсный карбид кремния может быть использован в металлургии, в производстве огнеупоров и керамики.

А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Л.С. Ширяева
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ КАРБИДА ТИТАНА: НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

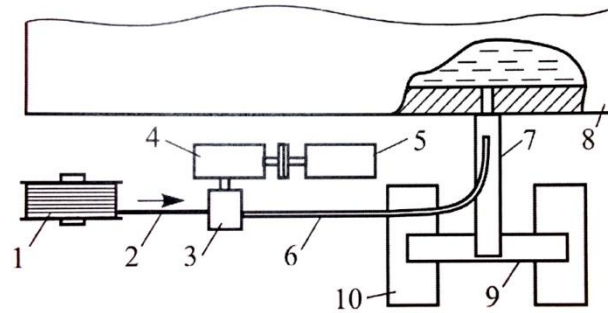
Карбид титана TiC – износо- и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал, востребован в различных областях для изготовления твердых сплавов, металллокерамического инструмента, жаропрочных изделий, защитных покрытий металлов. Новые перспективы применения карбида титана открываются при использовании его в наносостоянии: модифицирование сплавов различного состава и назначения.

Titanium carbide TiC – wear- and corrosion-resistant, hard, chemically inert material, has been used in various fields for the manufacture of hard metal, cermet tools, refractory products, protective coatings of metals. New perspectives for the use of titanium carbide are opened when used in nanostate: modification of alloys of different composition and appointment.

Введение

Карбид титана относится к группе синтетических, сверхтвердых, тугоплавких, жаропрочных материалов и достаточно востребован для производства металлообрабатывающего инструмента, защитных покрытий и карбидосталей.

Производство карбида титана в наносостоянии открывает новые перспективы его применения, одним из которых является модифицирование сплавов различного состава и назначения. В работе [1] исследовали введение в алюминиевые деформируемые и литейные сплавы нанопорошок карбида титана. Было установлено измельчение структуры литых изделий, повышение уровня характеристик механических свойств, пластичности и износостойкости. На рисунке 1 приведена схема установки для непрерывной подачи модифицирующего прутка в жидкий металл при литье слитков полунепрерывным способом. При полунепрерывном литье слитков прутки вводили в непрерывном режиме при помощи специально разработанного устройства, которое позволяло регулировать непрерывную подачу прутка из бухты в лунку кристаллизатора со скоростью, обеспечивающей требуемое содержание нанопорошка в слитках. Количество нанопорошка при последующем их введении в различные сплавы, не превышало 0,05 %, а расход прутка составлял 20...25 кг на 1 т металла.



1 – бобина с модифицирующим прутком; 2 – модифицирующий пруток; 3 – механизм подачи прутка; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – направляющая трубка; 7 – прилёточный желоб; 8 – миксер с жидким металлом; 9 – раздаточная коробка; 10 – кристаллизаторы

Рисунок 1 – Схема установки для непрерывной подачи модифицирующего прутка в жидкий металл при литье слитков полунепрерывным способом (для алюминиевых сплавов, вид сверху)

Сопоставление шлифов поперечного сечения проб показывает, что эффект модифицирования усиливается от прутка из лигатуры Al-Ti до прутка из крупки с нанопорошками (рисунок 2). Модифицирующий пруток отпрессован из гранул сплава Д16, алюминиевой крупки АКП, лигатуры Al-2,0 %Ti. Модифицирующий пруток отпрессован из нанопорошка: TaN; BN; VC; SiC; B_4C ; $Cr_3(C_{0,8}N_{0,2})_2$; LaB_6 и TiC.

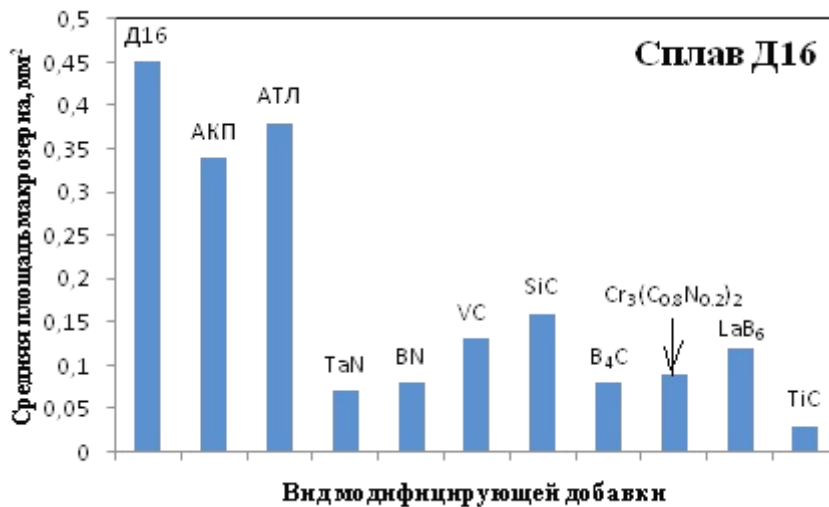


Рисунок 2 – Влияние вида нанопорошка на величину макрозерна на поперечном сечении проб диаметром 35 мм, отлитых в кокиль из сплава

Можно видеть из рисунка 2, что из всех исследованных модифицирующих добавок карбид титана занимает лидирующую позицию. Проведенные исследования позволили сформулировать следующие требования к карбиду титана – компонента модифицирующих комплексов [2]. Требования к карбиду титана представлены на рисунке 3. Основными из них являются уровень

дисперсности и тугоплавкость. Именно для карбида титана характерно сочетание данных требований.

В настоящее время в России карбид титана такого назначения не производится. Для исследовательских целей он поставляется латышской фирмой Neomat.Compani [3]. Прогнозируемая потребность в нанопорошке карбида титана составляет 400 т в год. Все это свидетельствует, что разработка и освоение технологии производства карбида титана является актуальной научно-технологической задачей.

Целью настоящей работы является научное, технологическое и экономическое обоснование плазменного синтеза карбида титана-компонента модифицирующих комплексов.

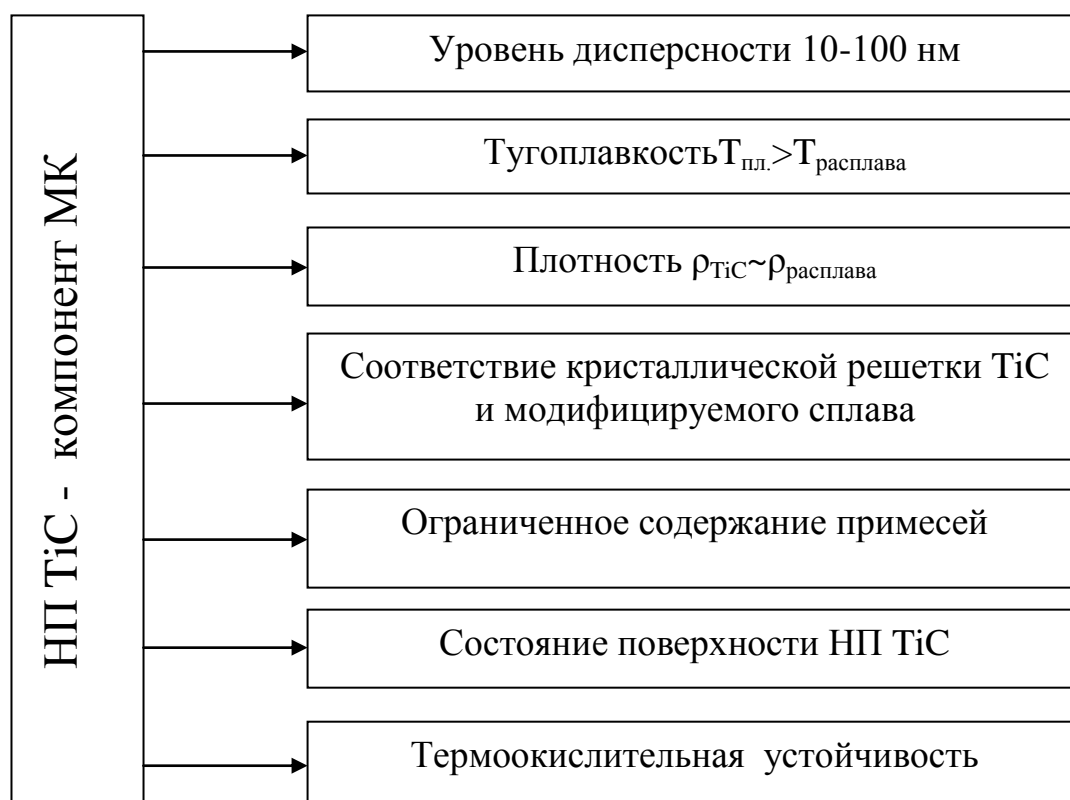


Рисунок 3 – Требования к карбиду титана TiC - компоненту модифицирующих комплексов

Оборудование для плазменного синтеза карбида титана

Для проведения экспериментальных исследований использовался промышленный плазмотехнологический комплекс, созданный СибГИУ и предприятием «Полимет». В основе комплекса трехструйный прямоточный вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт [4]. Общий вид реактора показан на рисунке 4. Реактор включает: камеру смешения с 3-мя плазмотронами ЭДП-104А, установленные под углом 30° , реактор и осадительную камеру. Наряду с реактором в комплекс входят системы шихтоподачи, электро-, газо-, водоснабжения, улавливания продуктов синтеза и вентиляции. Порош-

кообразное и газообразное сырье подается с помощью водоохлаждаемой фурмы в зону соударения плазменных струй. При этом формируется реакционная смесь заданного состава, осуществляется синтез и формирование нанодисперсных продуктов.



Рисунок 4 – Трехструйный прямоточный вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт

Основные характеристики реактора представлены в таблице 1. По уровню характеристик реактор может быть отнесен к современному электротермическому оборудованию.

Таблица 1 – Основные характеристики плазменного реактора

Характеристики	Значения
Мощность, кВт	150
Тип реактора	трехструйный прямоточный вертикальный
Тип плазмотрона, мощность, кВт	ЭДП-104А, 50
Плазмообразующий газ	азот
Масса нагреваемого газа, кг/ч	32,5

Характеристики	Значения
Внутренний диаметр, м	0,054
Объем реактора, м ³	0,001
Футеровка канала реактора	диоксид циркония
Температура плазменного потока, К	5400 (L=0) – 2200 (L=12)
Температура футеровки, К	1549 (L=0) – 770 (L=12)
Удельная электрическая мощность, МВт/м ³	2142
Ресурс работы: -анода	3125
-катода	112
Загрязнение карбида титана продуктами эрозии, % масс	Cu-0,0000954% W-0,0000002%
-анода	
-катода	

Характеристика сырьевых материалов

Экспериментальное исследование проводилось в реакторе, теплоизолированном футеровкой из диоксида циркония с толщиной стенок 0,005 м и наружным диаметром 0,066 м, уменьшающим его диаметр до 0,056 м. При выборе сырьевых материалов предпочтение было отдано порошкам титана и его диоксида, а в качестве карбидизатора-восстановителя использовался природный газ, содержащий до 96 % метана. Характеристики сырьевых материалов и плазмообразующего газа для синтеза карбида титана приведены в таблице 2 [5,6].

С учетом характеристик сырья, плазмообразующего газа и параметров работы реактора были сформированы необходимые данные для термодинамического и кинетического моделирования процессов.

Таблица 2 – Сырьевые материалы и плазмообразующий газ

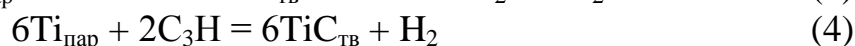
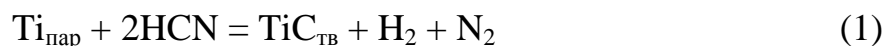
Сырьевой материал	Содержание основного вещества, % не менее	Дисперсность, мкм
Тонкодисперсный порошок титана ПТМк	99,9	0,5-5
Диоксид титана пигментный Р-1 (ГОСТ 9808-84, изм.)	99,0	-1
Метан (природный газ)	93,6 (этан-3,0; пропан-2,18; бутан-1,18)	-
Технический азот (ГОСТ 9293-74, изм.)	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)	-

Термодинамическое моделирование высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих системах

Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида титана (соотношения компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазмохимической технологии эффективную переработку дисперсного сырья.

В связи с использованием в процессах синтеза в качестве титаносодержащего сырья – титана, оксида TiO_2 , углеводородного сырья – метана и плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы C–H–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N.

В исследуемых системах получение карбида титана возможно при температуре ниже 3500 К [7], при всех учитываемых в расчетах компонентов, при этом термодинамически возможны следующие газофазные реакции образования карбида. Из них термодинамически более вероятной является реакция (1).

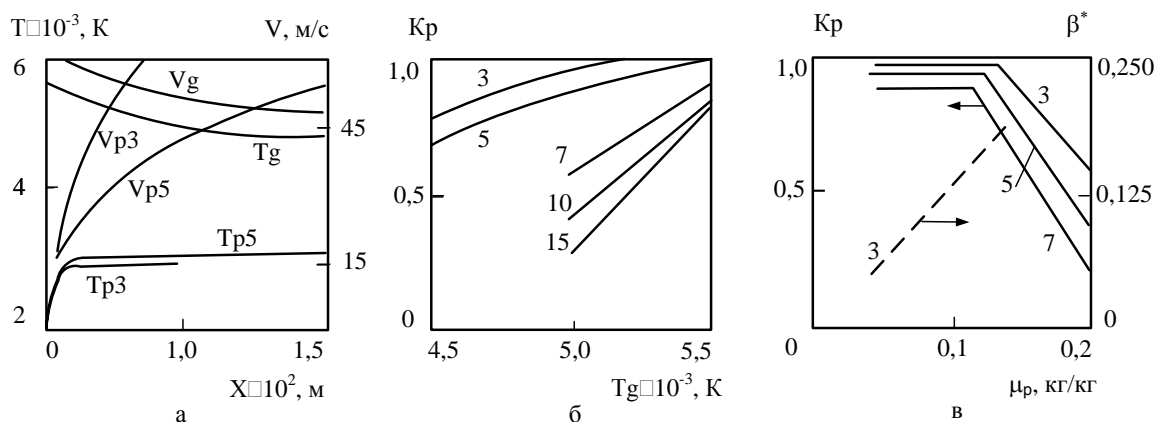


Образование карбида титана термодинамически возможно по газофазной реакции с участием паров титана и циановодорода, т.е. по схеме «пар-кристалл», что позволяет прогнозировать возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

Моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков

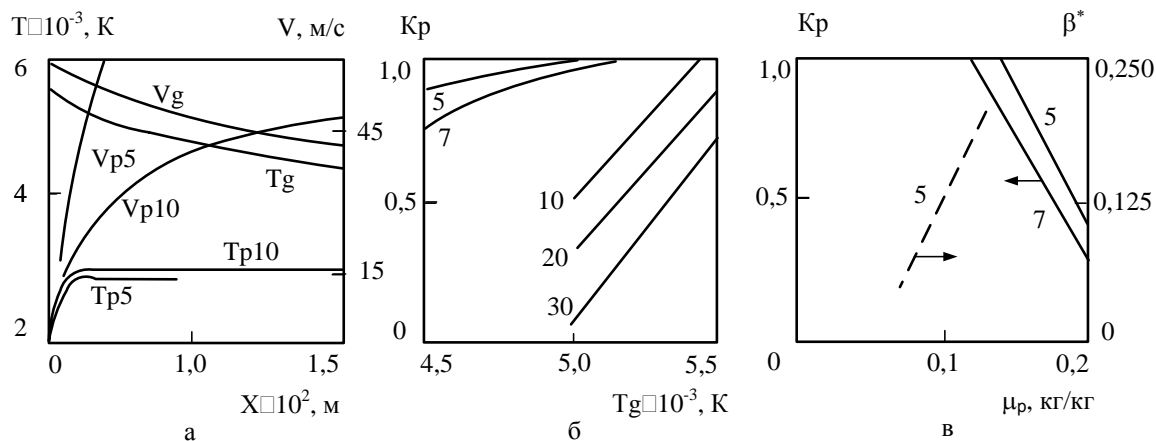
Для прогнозирования характеристик сырья и оценки гидродинамических и энергетических режимов его эффективной переработки проведено модельно-математическое исследование влияния на степень испарения начальной температуры плазменного потока, крупности сырья и массовой расходной концентрации ($\mu_p = G_p / (G_g + G_t)$). Результаты исследования приведены на рисунках 5 – 6. Можно видеть, что степень испарения зависит от крупности, массовой расходной концентрации и начальной температуры плазменного потока [8,9]. В зависимости от крупности время испарения частиц составляет 0,1-1 мс. При этом рабочие параметры реактора обеспечивают полное испарение порошков диоксида титана крупностью не более 5 мкм, Ti- не более 10 мкм. По результатам моделирования осуществлен выбор титаносодержащего сырья. Из оксидного сырья этим требованиям отвечает TiO_2 марки Р-1, поставляемый в виде порошка крупностью -1 мкм [6]. Однако производимые в настоящее время в России порошки Ti марок ПТС, ПТМ, ПТОМ – грубозернистые и

этим требованиям не удовлетворяют. Поэтому выбор сделан в пользу поставляемого зарубежными производителями микропорошка Ti марки ПТМк, крупностью менее 5 мкм, в целом доступного, но дорогостоящего [5].



- а) изменение среднemasовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ($N=75$ кВт, $G_g=9 \cdot 10^{-3}$ кг/с);
- б) влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц;
- в) влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ($N=75$ кВт, $G_g=9 \cdot 10^{-3}$ кг/с); 3,5,10,15 – размер частиц, мкм

Рисунок 5 – Гидродинамические и энергетические режимы переработки оксида титана (IV) в трёхструйном прямоточном реакторе



- а) изменение среднemasовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ($N=75$ кВт, $G_g=9 \cdot 10^{-3}$ кг/с);
- б) влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц;
- в) влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ($N=75$ кВт, $G_g=9 \cdot 10^{-3}$ кг/с).

Рисунок 6 – Гидродинамические и энергетические режимы переработки титана в трёхструйном прямоточном реакторе

Экспериментальное исследование технологических вариантов плазменного синтеза карбида титана методом планируемого эксперимента

При экспериментальном исследовании в обоих случаях реализована полуреплика полного факторного эксперимента 2^{5-1} . Учитываемые факторы и уровни их варьирования приведены в таблице 3. Оптимизировалось содержание продуктов синтеза карбида титана и свободного углерода. Обработка результатов проводилась по схеме с равномерным дублированием опытов [10]. Для исследуемых технологических вариантов получены следующие уравнения, описывающие зависимости содержания карбида титана и свободного углерода от основных факторов.

Таблица 3 – Переменные факторы, выбранные для исследования процессов синтеза карбида титана

Факторы, параметры оптимизации	Уровни факторов		
	Обозначение	Верхний (+)	Нижний (-)
Начальная температура плазменного потока, К	X_1	5400	5000
Температура закалки продуктов синтеза, К	X_2	2800	2000
Количество углеводорода от стехиометрически необходимого для получения карбида титана, %	X_3	150	100
Концентрация водорода в плазмообразующем газе, % об.	X_4	5	0
Количество атомарного азота в плазмообразующем газе, N(NH ₃)/C(CH ₄), % от стехиометрического	X_5	15	0

Полученные уравнения позволяют количественно оценить влияние отдельных факторов на параметры синтеза, оптимизировать и управлять процессами [11]:

$$[\text{TiC}(1)] = 17,3211 + 0,0105 \cdot T_0 - 0,0156 \cdot T_3 + 0,1859 \cdot [\text{CH}_4] - 3,432 \cdot \{\text{H}_2\} - 0,4078 \cdot [\text{N}] + 0,000004562 \cdot T_0 \cdot T_3 + 0,000782 \cdot T_0 \cdot \{\text{H}_2\} - 0,0000567 \cdot T_3 \cdot [\text{CH}_4] - 0,000435 \cdot T_3 \cdot \{\text{H}_2\} + 0,0001353 \cdot T_3 \cdot [\text{N}]; \quad (5)$$

$$[\text{TiC}(1) - \text{C}_{\text{своб}}(1)] = -53,95 + 0,01152 \cdot T_0 + 0,0476 \cdot [\text{CH}_4] + 0,1325 \cdot \{\text{H}_2\} + 0,09257 \cdot [\text{N}] - 0,00000576 \cdot T_0 \cdot T_3 - 0,002938 \cdot T_3 - 0,00000876 \cdot T_0 \cdot [\text{CH}_4] - 0,00000588 \cdot T_0 \cdot \{\text{H}_2\} + 0,00000728 \cdot T_3 \cdot [\text{CH}_4] - 0,000053 \cdot T_3 \cdot [\text{N}] + 0,000417 \cdot \{\text{H}_2\} \cdot [\text{N}]; \quad (6)$$

$$[\text{TiC}(2)] = -182,277 + 0,05187 \cdot T_0 + 0,000927 \cdot T_3 + 0,9428 \cdot [\text{CH}_4] - 0,4464 \cdot \{\text{H}_2\} - 0,1208 \cdot [\text{N}] - 0,0001878 \cdot T_0 \cdot [\text{CH}_4]; \quad (7)$$

$$[\text{TiC}(2) - \text{C}_{\text{своб}}(2)] = -13,162 + 0,01157 \cdot T_3 + 0,01588 \cdot [\text{CH}_4] - 0,1244 \cdot \{\text{H}_2\} + 0,00013 \cdot [\text{N}] - 0,000001162 \cdot T_0 \cdot T_3 + 0,00279 \cdot T_0 + 0,000057 \cdot T_3 \cdot \{\text{H}_2\} + 0,005707 \cdot \{\text{H}_2\} \cdot [\text{N}] \quad (8)$$

где T_0 – начальная температура плазменного потока, К; T_3 – температура закаливания продуктов синтеза, К; $[CH_4]$ – количество углеводорода от стехиометрически необходимого для получения карбида титана, %; $\{H_2\}$ – концентрации водорода в плазмообразующем газе, % об; $[N]$ – количество атомарного азота в плазмообразующем газе от стехиометрически необходимого для образования циановодорода, %

Содержание карбида титана в обоих вариантах зависит главным образом от концентрации карбидизатора-восстановителя, начальной температуры плазменного потока и температуры закаливания.

Физико-химическая аттестация карбида титана

Продукты плазменного синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, электронно-микроскопического анализов, а также методом БЭТ определялась их удельная поверхность.

Фрагменты рентгеновских дифрактограмм продуктов синтеза обоих вариантов представлены на рисунке 7. В обоих случаях в продуктах синтеза присутствует монокарбид титана с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой с параметром $a = 0,4323$ нм, что на $0,0004$ нм меньше, чем у массивных кристаллов. Это может быть обусловлено неравновесным состоянием в частицах размером менее 100 нм приповерхностных слоев, приводящим к деформации (сжатию) кристаллических решеток, смещению атомов из идеальных положений, возникновению микронапряжений. В первом варианте карбиду титана сопутствует диоксид с кристаллической структурой рутила и анатаза. Сопутствующий карбиду свободный пиролитический углерод образуется, по-видимому, при разложении метана в аморфном состоянии и на дифрактограммах не проявляется. Продукты синтеза I и II вариантов содержат, % масс.: TiC – 91,88 и 93,15; $C_{своб.}$ – 1,44 и 1,33; N – 0,90 и 1,00, и имеют удельную поверхность 30000 и 34000 м²/кг.

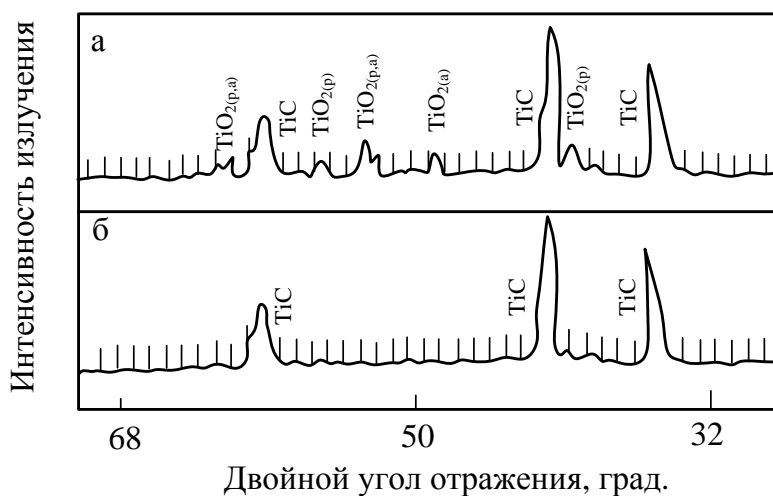


Рисунок 7 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм карбида титана, полученного плазменным синтезом из диоксида (а) и титана (б)

Результаты электронно-микроскопического исследования продуктов синтеза карбида титана по варианту 2 представлены на рисунке 8. Использовались методы просвечивающей (ПЭМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Можно видеть, что метод просвечивающей микроскопии обеспечивает при увеличении 30000 – 40000 раз только констатацию наноуровня. Метод растровой электронной микроскопии обеспечивает при увеличении 200000 раз визуализацию отдельных частиц, определение их размеров и формы, а также выявление сопутствующей карбиду примеси пиролитического, несвязанного в карбид, углерода. Можно видеть, что карбид титана получен в виде ограненных частиц кубической формы размерного диапазона от 10 до 40 нм. Карбиду сопутствует свободный углерод, представленный частицами шаровидной формы размером преимущественно 10 – 30 нм.

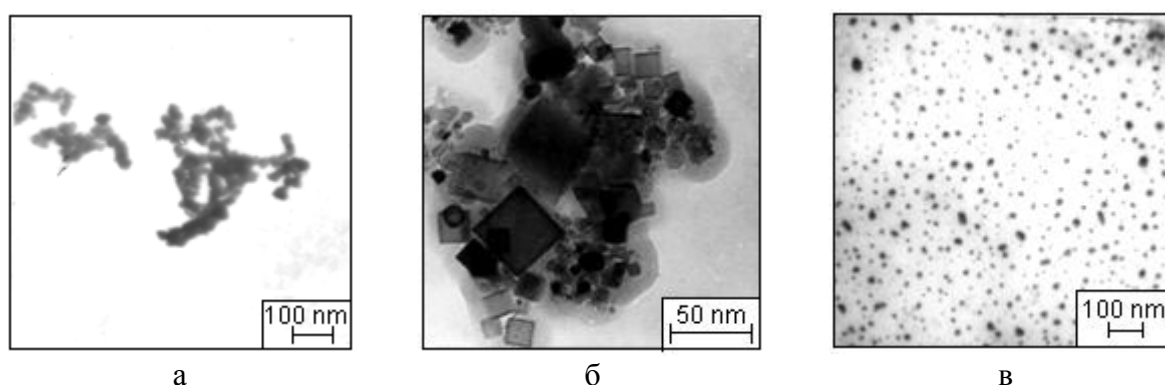


Рисунок 8 – Микрофотографии нанопорошка карбида титана (а – ПЭМ, б – РЭМ) и пиролитического углерода (в)

Исследование продуктов синтеза при увеличении 300000 раз позволяет получить более четкую морфологическую картину для карбида и свободного углерода (рисунки 9, 10). Нанопорошок карбида титана представлен агрегатами шаровидной формы размером от 150 до 600 нм, образованных сообществом частиц кубической формы достаточно широкого размерного диапазона – от 10 до 60 нм. Ограниченная форма частиц карбида титана свидетельствует об образовании их по механизму «пар – кристалл», предположительно при взаимодействии паров титана и циановодорода. Присутствие в продуктах синтеза агрегатов различного объема указывает на высокую вероятность дальнейшего укрупнения наночастиц при понижении температуры путем их коагуляции.

Отличительной особенностью нанопорошка пиролитического углерода является его способность образовывать микроагрегаты размером до 100 – 150 нм, включающие до 6 – 10 частиц размером до 30 – 40 нм. Естественно, что полученный карбид титана по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием карбида карботермического печного синтеза (рисунок 11).

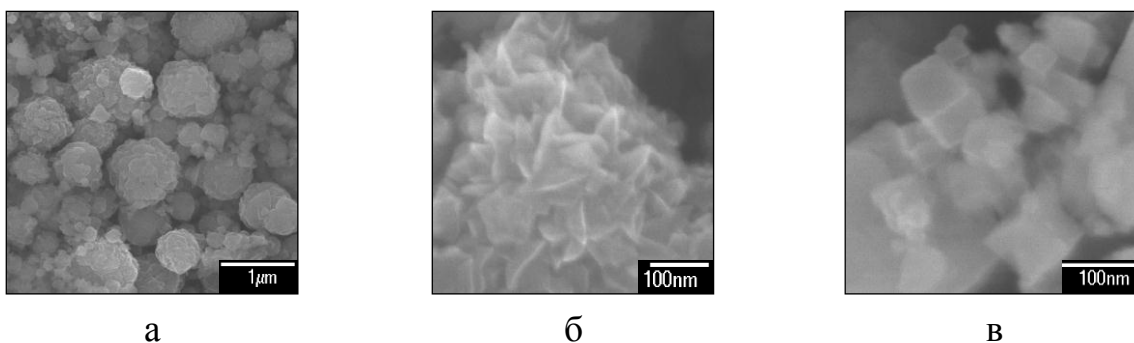


Рисунок 9 – Микрофотографии нанопорошка карбида титана – РЭМ: а – в состоянии поставки после синтеза; б – морфологическая картина агрегата; в – ансамбль наночастиц

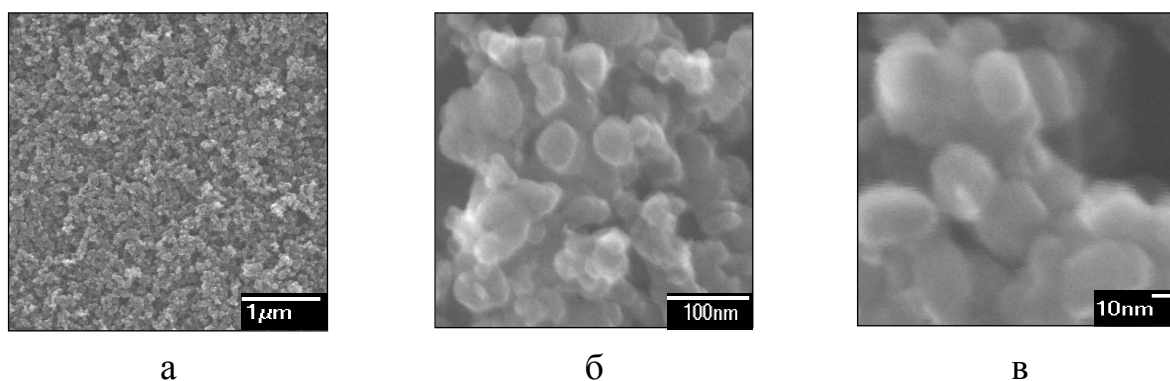


Рисунок 10 – Микрофотографии (РЭМ) нанопорошка пиролитического углерода: а – «микроагрегаты»; б – ансамбль частиц и «микроагрегаты»; в – отдельные частицы

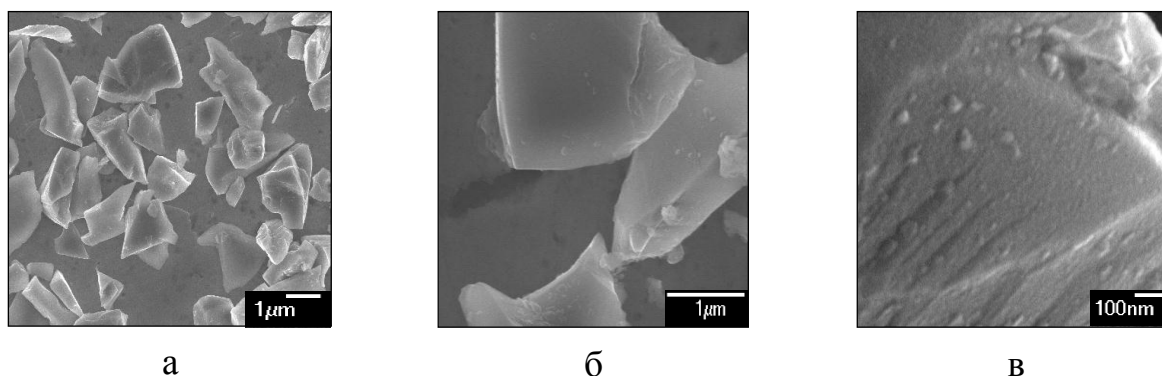


Рисунок 11 – Микрофотографии микропорошка карбида титана – РЭМ: а – ансамбль частиц; б – отдельные частицы; в – поверхность частицы

Выбор оптимального технологического варианта плазменного производства карбида титана

Результаты модельно-математического и экспериментального исследований позволили прогнозировать технологические показатели плазменного производства карбида титана для различного вида титансодержащего сырья и выбрать оптимальный технологический вариант.

Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана для 2х технологических вариантов

Параметры синтеза и характеристики карбида титана	Вариант I (TiO ₂ +природный газ)	Вариант II (Ti+природный газ)
Состав газа–теплоносителя, % об. –азот	99,5	99,5
Состав карбидизатора, % об. -метан -этан -пропан -бутан	93,6 3,0 2,2 1,2	93,6 3,0 2,2 1,2
Крупность титансодержащего сырья, мкм	1-3	5
Количество карбидизатора, % от стехиометрического	120-140	120-140
Начальная температура плазменного потока, К	5400	5400
Температура закалки, К	2600-2800	2600-2800
Химический состав, % масс -TiC - диоксид титана -титан свободный (Ti+O) -углерод свободный -летучие	91,62-92,13 6,56-6,82 - 1,31-1,56 0,82-0,97	92,88-93,42 - 5,37-5,68 1,21-1,44 0,97-1,11
Выход карбида титана, % масс.	92	92
Удельная поверхность, м ² /кг	29000-32000	33000–35000
Размер* частиц, нм	38-42	34-36
Параметры синтеза и характеристики карбида титана	Вариант I (TiO ₂ +природный газ)	Вариант II (Ti+природный газ)
Форма частиц	ограниченная, кубическая	ограниченная, кубическая
Окисленность нанопорошка карбида титана** × 10 ⁷ , кг O ₂ /м ²	12,5	8,6
Производительность, кг/ч	2,8	3,7
Примечание: *–рассчитывался по величине удельной поверхности; **–определялась после выдержки на воздухе в течении 24 ч.		

Сопоставление 2-х вариантов позволяет выбрать в качестве оптимального вариант карбидизации титанового порошка метаном. По комплексу свойств синтезированный карбид титана в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нанодисперсным модификаторам.

Экономическая эффективность производства нанопорошка карбида титана

Для оценки экономической эффективности выбранного технологического варианта, который заключается в карбидизации титана метаном, были определены основные экономические показатели [12]. Для этого работа организована в количестве одного реактора, продолжительность рабочего времени в рабочие дни – 8ч, в 3 смены, график 5/2.

Таблица 5 – Показатели экономической эффективности производства карбида титана (в расчете на один реактор мощностью 150 кВт)

Показатели	Значения
Инвестиции, млн. руб.	28,8
Объем производства, т/год	26
Производственная себестоимость, млн. руб.	5,64
Рентабельность продукции, %	80
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	1,0
Отпускная цена, тыс. руб./кг	12,0

Расчет экономических показателей выявил, что при объеме производства 26 т карбида титана в год отпускная цена составляет 400 \$/кг, что свидетельствует о конкурентоспособности его на мировом рынке наноматериалов.

Выводы

1. На основе анализа современного состояния производства и применения карбида титана установлено, что карбид титана – износостойкий и коррозионноустойчивый, твердый, химически инертный материал, который находит широкое применение в технике для изготовления защитных покрытий металлов, в качестве компонентов и легирующих добавок твердых сплавов. При использовании в наносостоянии открываются новые перспективы применения карбида титана – модифицирование сплавов различного состава и назначения.

2. Исследованы теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики трёхструйного прямогоплазменного реактора промышленного уровня мощности (150 кВт). Установлено, что на длине реактора с футеровкой из диоксида циркония 12 калибров среднемаховая температура плазменного потока и температура стенки изменяется в пределах (5400÷2200) К (1549÷770) К. Удельная электрическая мощность в камере смешения достигает 2142 МВт/м³. Расчётный ресурс работы электродов составляет для медного анода и вольфрамового катода 3125 и 112 часов соответственно. Прогнозируемое загрязнение карбида титана продуктами эрозии электродов составляет 0,0000954 % меди и 0,000002 % вольфрама. Подтверждено, что по совокупности характеристик трёхструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт

может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

3. Разработаны научные основы плазменного производства карбида титана, включающие термодинамические условия карбидообразования и кинетические закономерности испарения в этих условиях титансодержащего сырья. Степень плазменного испарения порошкообразного титансодержащего сырья определяется его крупностью и массовой расходной концентрацией. Установлено, что при подводимой к реактору мощности 75 кВт достигается 100 %-ная степень испарения частиц титана крупности не более 10 мкм, оксида титана (IV) не более 5 мкм. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза карбида титана.

4. На основе результатов моделирования прогнозированы технологические показатели плазменного производства карбида титана для двух технологических вариантов: восстановление оксида титана TiO_2 метаном и карбидизация титана метаном. Установлено, что оптимальным технологическим вариантом плазменного производства карбида титана является карбидизация титана. Для реализации данной технологии может применяться титан металлический марки ПТМк, в качестве плазмообразующего газа – технический азот (ГОСТ 9293-74, изм.), карбидизатора – метан (природный газ).

5. На основании выбранного технологического варианта реализовано получение карбида титана карбидизацией в условиях НПФ «Полимет» на базе промышленного плазмотехнологического комплекса мощностью 150 кВт. Продуктом плазменного синтеза является соединение TiC. Определены оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики карбида титана: крупность титансодержащего сырья, мкм - 5; количество карбидизатора, % от стехиометрически необходимого – 120-140; начальная температура плазменного потока, К – 5400; температура закалки, К – 2600-2800; выход карбида титана, % масс. – 92,0; производительность, кг/ч – 3,7; удельная поверхность, m^2/kg – 33000-35000; размер частиц – 34-36; форма частиц – ограниченная кубическая.

6. Проведена оценка экономической эффективности плазменного производства карбида титана. Установлено, что при производительности 26 т карбида титана в год (в расчёте на один реактор) и себестоимости 5,64 млн. руб./т полученная отпускная цена 400 \$/кг является оптимальной для плазменного производства карбида титана и отражает его конкурентоспособность на мировом рынке наноматериалов. Срок окупаемости капиталовложений в плазмометаллургическое производство составляет 1 год, что позволяет судить о его прибыльности и технологической целесообразности освоения плазменного производства карбида титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетникова С.Н. Применение нанопорошков химических соединений для повышения качества металлоизделий: автореф. дис. на соиск. учен.

степ. кандидата технических наук / С.Н. Решетникова: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2008. – 17с.

2. Галевский Г.В. Некоторые вопросы применения нанофазных порошков тугоплавких соединений в качестве модифицирующих комплексов различного назначения/ Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. трудов// СибГИУ.–Новокузнецк, 1999. – Вып. 8.- С.46-53

3. NEOMAT NANO POWDERS [Электронный ресурс]/ Products. – Электронные данные. – Саласпилс: Neomat Co., [2008]. – Режим доступа: <http://www.neomat.lv>, свободный. – Загл. с экрана. – яз. англ.

4. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В.П. Сабуров [и др.] – Новосибирск: Наука.Сибирская издательская фирма РАН, 1995. – 344с.

5. Электронный каталог ГПНТБ России [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о всех видах лит., поступающей в фонд ГПНТБ России. – Режим доступа: [<http://tokem.narod.ru>, 12.02.2013] – Загл. с экрана.

6. Боровинская И.П. Применение титана в процессах СВС / И.П. Боровинская, В.К. Прокудина, В.И. Ратников//Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2010, - №4. с.26-33.

7. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов: справочник / А.Л. Сурис. – М.: Металлургия, 1985. – 568 с.

8. Моссэ А.Л., Буров И.С. Обработка дисперсных материалов в плазменном реакторах. – Минск: Наука и техника, 1980.-208 с.

9. Руднева В.В. Модельно-математическое исследование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе/ В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Е.К. Юркова// Известия вузов. Черная металлургия. – 2007. - № 5. – С. 52-55.

10. Галевский Г.В. Исследование плазмохимического синтеза тугоплавких соединений методом планируемого эксперимента: методические указания/ Г.В. Галевский, Т.В. Киселева, В.В. Руднева; СибГИУ. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – 31 с.

11. Костин В.Н., Тишина Н.А. Статистические методы и модели: учеб. пособие/В.Н. Костин, Н.А. Тишина. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 138 с.

12. Методические указания к выполнению экономической части дипломных проектов: Метод. Указ./Сост.: Сидорова Л.Е.; ГОУ ВПО «СибГИУ». – Новокузнецк, 2007. – 40с.

УДК 661.655

А.К. Гарбузова, В.В. Руднева, Г.В. Галевский, Л.С. Ширяева
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА КАРБИДА ТИТАНА

Проведен термодинамический анализ высокотемпературных взаимодействий в системах C–H–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N, соответствующих процессам пиролиза метана и синтеза карбида титана в условиях плазменного потока с использованием различного титансодержащего сырья.

Thermodynamic analysis of interactions in systems of high C–H–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N, the respective processes of methane pyrolysis and synthesis of titanium carbide in the plasma flow using various titanium-containing raw materials.

Цели, задачи и методика моделирования

Плазменные струйные процессы получения карбидов как объекты термодинамического моделирования по сравнению с традиционными имеют ряд особенностей [1]:

- быстротечность процессов карбидообразования, что позволяет ряду исследователей ставить под сомнение возможность достижения равновесия [2];
- высокотемпературные условия протекания для достаточно быстрого достижения равновесия;
- возможность достижения высокого выхода карбидов только в условиях, обеспечивающих газофазный характер реакций карбидообразования;
- получение карбидов в системах, состоящих из нескольких химических элементов, образующих многофазные многокомпонентные смеси, обуславливает необходимость выполнения их термодинамического анализа на ЭВМ;
- изменение условий существования конденсированных фаз вследствие образования их в виде частиц наноразмерного уровня, т.е. с большой кривизной поверхности, для которых парциальное давление над конденсированной фазой превышает давление насыщения над плоской поверхностью; однако в настоящее время отсутствует единое мнение о размерном пороге (1 или 2–10 нм [3]) и соответствующие справочные данные;
- безусловная целесообразность выполнения термодинамических расчётов равновесных составов карбидообразующих систем при различных параметрах в связи с недостаточностью информации для описания с необхо-

димой точностью и достоверностью кинетики и механизма процессов карбидообразования.

С учётом отмеченных особенностей результаты термодинамического моделирования процессов карбидообразования следует рассматривать, с одной стороны, как прогнозные, требующие экспериментального подтверждения, а с другой – как технологические ориентиры и показатели совершенства реактора и уровня организации в нём процессов тепло- и массообмена.

Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведёно с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида титана (соотношения компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазмохимической технологии эффективную переработку дисперсного сырья.

В связи с использованием в процессах синтеза в качестве титаносодержащего сырья – титана, оксида TiO_2 , углеводородного сырья – метана и плазмообразующего газа – азота объектами исследования являлись системы C–H–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N. Следует отметить, что системы C–H–N, Ti–C–H–Cl, Ti–C–H–N и Ti–C–O–H–N анализировались авторами работ [1, 4-9], но применительно к условиям использования в качестве восстановителя и карбидизатора пропана и без учёта возможности образования в газовой фазе таких соединений, как C_2N , C_2N_2 , углеводородных радикалов типа C_2H , C_3H и ряда других.

Необходимые для анализа равновесные составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным методом», основанном на совместном решении следующих уравнений: закона действующих масс, материального баланса, суммарного числа молей газовой смеси, существования конденсированной фазы, закона Дальтона [1].

Расчёты выполнялись с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA» (ИХТТИМ СО РАН), имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. При расчётах рассматривалась область температур 1000-6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Исходными данными служили константы равновесия реакций образования соединений из элементов, приведённые в [9-15].

Принятые для расчётов составы газовой и конденсированной фаз исследуемых систем приведены в таблице 1.

Выбор в исследуемых системах соотношений исходных компонентов определялся стехиометрией реакций образования целевых продуктов и параметрами технологического оборудования. Соотношения, выбранные для расчётов, приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Составы газовой и конденсированной фаз

Система	Состав фаз	
	Газовой	Конденсированной
C-H-N	H, H ⁺ , H ₂ , N, N ₂ , NH, NH ₂ , NH ₃ , C, C ⁺ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , CH ₂ , CH ₃ , CH ₄ , C ₂ H, C ₃ H, C ₄ H, C ₂ H ₂ , C ₂ H ₃ , C ₂ H ₄ , CN, CN ⁻¹ , NCN, NCC, C ₂ N ₂ , C ₄ N ₂ , HCN, HCCN, C ₃ HN	C
Ti-O-C-H-N	H, H ⁺ , H ₂ , N, N ₂ , NH, NH ₂ , NH ₃ , C, C ⁺ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , CH ₂ , CH ₃ , CH ₄ , C ₂ H, C ₃ H, C ₄ H, C ₂ H ₂ , C ₂ H ₃ , C ₂ H ₄ , CN, CN ⁻¹ , NCN, NCC, C ₂ N ₂ , C ₄ N ₂ , HCN, HCCN, C ₃ HN, O, O ₂ , NO, NO ₂ , H ₂ O, CO, CO ₂ , Ti, TiO, TiO ₂ , TiOH	Ti, TiC, TiN, TiO, Ti ₂ O ₃ , Ti ₃ O ₅ , Ti ₄ O ₇ , TiO ₂ , C
Ti-C-H-N	H, H ⁺ , H ₂ , N, N ₂ , NH, NH ₂ , NH ₃ , C, C ⁺ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , CH ₂ , CH ₃ , CH ₄ , C ₂ H, C ₃ H, C ₄ H, C ₂ H ₂ , C ₂ H ₃ , C ₂ H ₄ , CN, CN ⁻¹ , NCN, NCC, C ₂ N ₂ , C ₄ N ₂ , HCN, HCCN, C ₃ HN, Ti	Ti, TiC, TiN, C

Таблица 2 – Соотношение компонентов в исследуемых системах

Соотношение компонентов, моль	Примечание
C:H:N=0,75:3:20	По стехиометрии для реакции CH ₄ =C+2H ₂ (1)
C:H:N=0,75:6:20	2-кратный избыток водорода по сравнению со стехиометрией для реакции (1)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.75:3:20	По стехиометрии для реакции TiO ₂ +3CH ₄ =TiC+2CO+6H ₂ (2)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.78:3.12:20	104%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.81:3.24:20	108%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)

Соотношение компонентов, моль	Примечание
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.84:3.36:20	112%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.875:3.5:20	116%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.91:3.64:20	120%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)
Ti:O:C:H:N=0.25:0.5:0.94:3.76:20	124%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (2)
Ti:C:H:N=0.25:0.25:1.0:20	По стехиометрии для реакции $Ti+CH_4=TiC+2H_2$ (3)
Ti:C:H:N=0.25:0.375:1.0:20	150%-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (3)

Термодинамика плазменного пиролиза метана

Термодинамический анализ системы C–H–N необходим для получения информации о возможном составе газовой фазы, формирующемся в результате пиролиза метана и его взаимодействия с газом–теплоносителем. Результаты расчёта равновесных составов рассматриваемой системы приведены на рисунке 1, а, б. В системе C–H–N в области температур 2800–3800 К основными углеродсодержащими компонентами газовой фазы являются HCN, C₃H, C₂H. Присутствующий в системе углерод перераспределяется следующим образом: HCN – 98 % масс., углеводородные радикалы – 2 % масс. Концентрация углеводородных радикалов растёт с увеличением содержания в системе водорода. Конденсация углерода из газовой фазы термодинамически возможна при температуре ниже 2800 К.

Наряду с анализом равновесных составов продуктов плазменного пиролиза метана представляется целесообразным выполнение термодинамических расчетов для квазиравновесных условий карбидообразования, исключающих присутствие углерода. Действительно, в работах [4, 6, 8] отмечается устойчивость циановодорода в плазменном потоке азота в интервале температур 2000-4000 К.

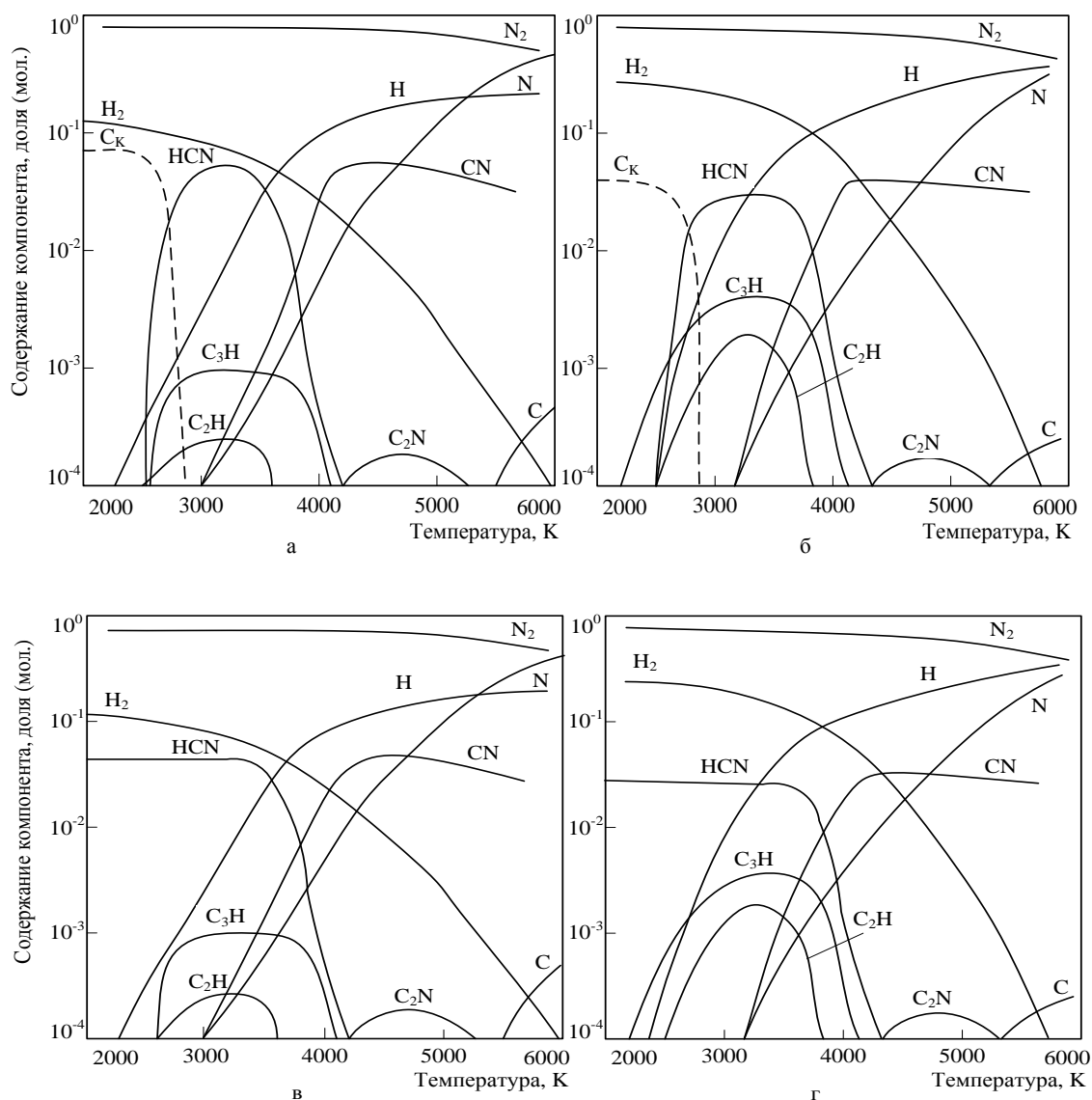


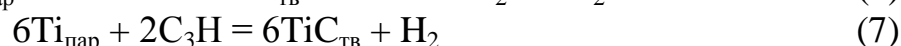
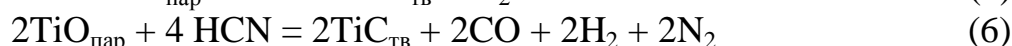
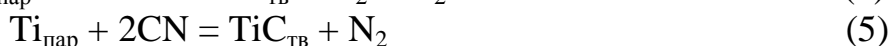
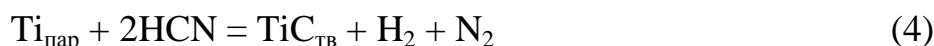
Рисунок 1 – Равновесный (а, б) и квазиравновесный (в,г) состав системы С-Н-Н в зависимости от соотношения компонентов и температуры

По мнению автора работы [1] при плазменном пиролизе углеводородов продолжительность образования углерода значительно превышает время протекания газофазных химических реакций. Поэтому, проводя термодинамические расчеты квазиравновесных составов в предположении, что разложение углеродсодержащих соединений не происходит, можно получить состав конечных продуктов и основные показатели процесса, хорошо соответствующие экспериментальным данным.

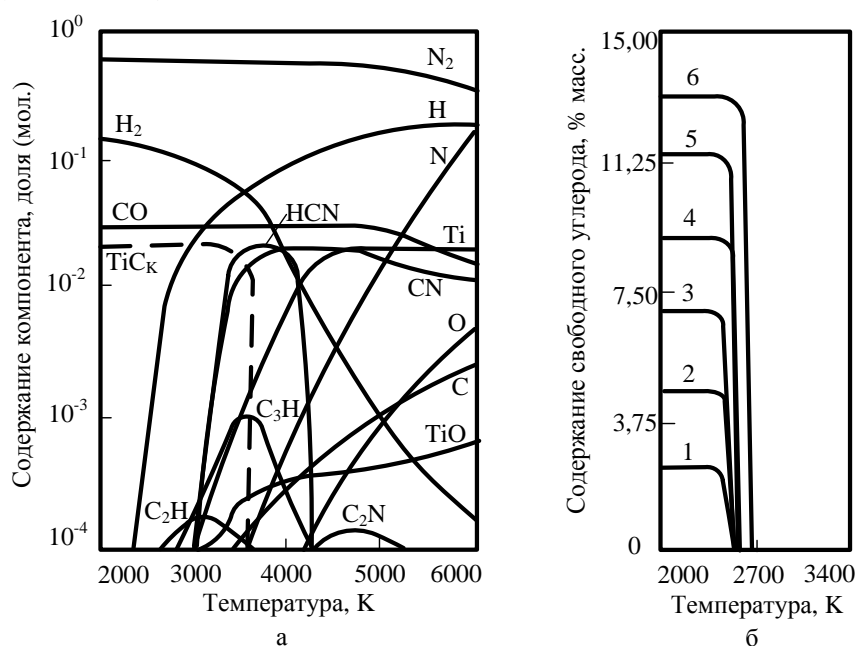
Действительно, квазиравновесные составы системы С-Н-Н (рисунок 1 в, г) характеризуются значительным расширением температурной области устойчивости циановодорода, составляющей 2000-3800 К.

Термодинамика высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих системах

Результаты термодинамических расчетов равновесных составов системы Ti-O-C-N приведены на рисунке 2. В рассматриваемой системе получение карбида титана возможно при температуре ниже 3500 К при всех учитываемых в расчетах соотношениях компонентов. Термодинамически возможны следующие газофазные реакции образования карбида титана:



Из реакций 4 и 7 термодинамически наиболее вероятной является реакция 4: степень превращения Ti в TiC по этой реакции составляет 0,94. Полное превращение титана в карбид достигается в интервале температур 3200-3500 К при стехиометрическом соотношении Ti/C (рисунок 2 а) и избытке углерода в системе (рисунок 2 б). Однако в этом случае в конденсированных продуктах содержится свободный углерод, равновесная концентрация которого изменяется от 2.55 до 12.75 % масс. при изменении соотношения Ti:C в пределах 0,25:(0,28÷0,44).



а) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Ti:O:C:N= 0.25:0.50:0.75:3:20

б) зависимость равновесной концентрации свободного углерода в конденсированной фазе от соотношения TiC=0.25:0.28 (1); 0.25:0.31 (2); 0.25:0.34 (3); 0.25:0.375 (4); 0.25:0.41 (5); 0.25:0.44 (6)

Рисунок 2 – Результаты термодинамических расчетов системы Ti-O-C-N

В условиях квазиравновесия при избытке карбидизатора (соотношение $Ti:C=0,25:0,375$) (рисунок 3) циановодород устойчив в более широкой области температур – (2000-3800) К, что делает возможным получение карбида, несодержащего свободного углерода.

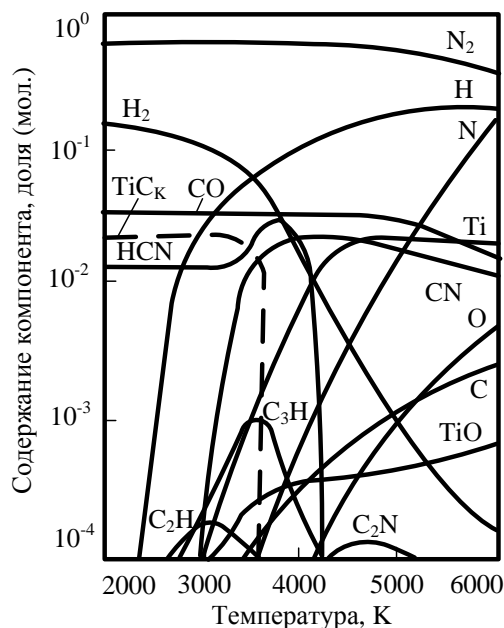


Рисунок 3 – Квазиравновесные составы газовой и конденсированной фаз системы Ti-O-C-H-N при соотношении компонентов $Ti:O:C:H:N=0.25:0.50:0.875:3.5:20$

В системе Ti-C-H-N образование карбида титана возможно в условиях равновесия (а) и квазиравновесия (б) (рисунок 4).

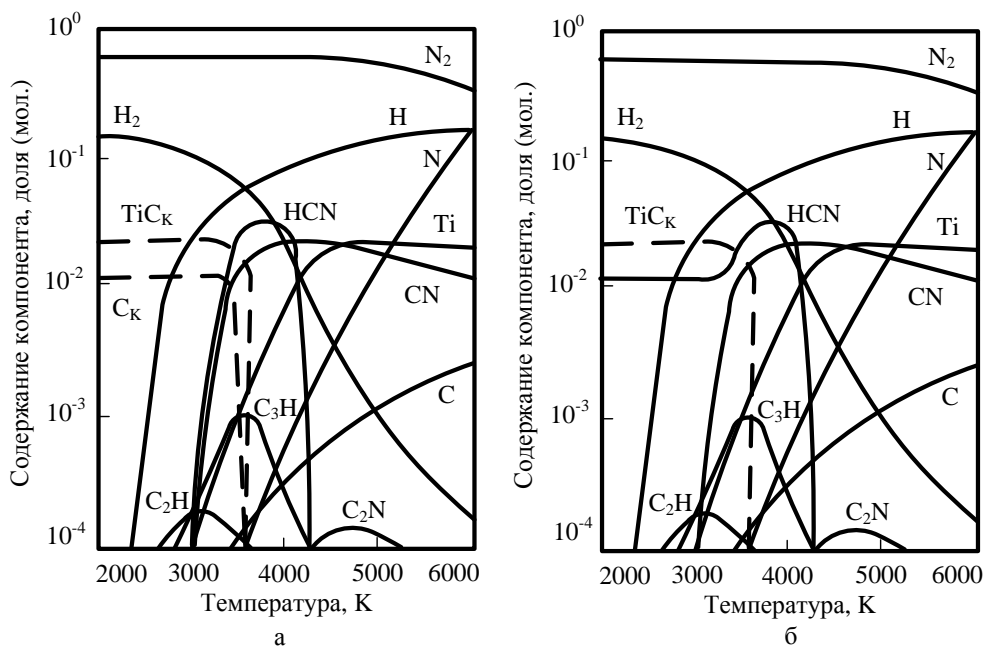


Рисунок 4 – Равновесные (а) и квазиравновесные (б) составы газовой и конденсированной фаз системы Ti-C-H-N при соотношении компонентов $Ti:C:H:N=0.25:0.375:1.5:20$

В первом случае при изменении соотношения $Ti:C=0,25:(0,0625-0,25)$ степень превращения титана в карбид изменяется от 0,25 до 1. При избытке карбидизатора (соотношение $Ti:C=0,25:0,375$) продуктом синтеза является карбид – углеродная композиция, содержащая 9,1 % масс. свободного углерода. Во втором случае конденсации углерода не происходит. В обоих случаях образование карбида термодинамически возможно по газофазной реакции (4).

Близость температур конденсации титана (3533 К) и образования его карбида (3530 К) не позволяет сделать однозначное предположение о возможном механизме карбидообразования, хотя более вероятным представляется образование карбида по механизму «пар-кристалл».

Выводы

Проведено термодинамическое моделирование высокотемпературного пиролиза метана и исследуемых технологических вариантов синтеза карбида титана. Установлено:

1. В системе С-Н-Н, моделирующей высокотемпературный пиролиз метана, в равновесных условиях в области температур 2800-3800 К основным углеродсодержащими компонентами газовой фазы является HCN, C_3H и C_2H .

Присутствующий в системе углерод перераспределяется следующим образом: HCN – 98 % масс., углеводородные радикалы – 2% масс. Концентрация углеводородных радикалов растет с увеличением содержания в системе водорода. Конденсация углерода из газовой фазы термодинамически возможна при температуре ниже 2800 К. Квазиравновесные составы системы С-Н-Н характеризуются значительным расширением температурной области устойчивости циановодорода, составляющей 2000-3800К.

2. В системе Ti-O-C-H-N образование карбида титана возможно при температуре ниже 3500 К при стехиометрическом и избыточном количестве углерода. При избытке углерода в конденсированных продуктах содержится свободный углерод, равновесная концентрация которого изменяется от 2,55 до 12,75 % масс. при изменении соотношения $Ti:C$ в пределах $0,25:(0,28\div 0,44)$. В условиях квазиравновесия при избытке карбидизатора циановодород устойчив в более широкой области температур – (2000-3800) К, что делает возможным получение карбида, несодержащего свободного углерода.

3. В системе Ti-C-H-N образование карбида титана также возможно в равновесных и квазиравновесных условиях. В условиях равновесия при изменении соотношения $Ti:C=0,25:(0,0625-0,25)$ степень превращения титана в карбид изменяется от 0,25 до 1, а при 1,5-кратном избытке карбидизатора карбид содержит 9,1 % масс. свободного углерода. В условиях квазиравновесия конденсации углерода не происходит.

4. В обоих случаях образование карбида титана термодинамически возможно по газофазной реакции с участием паров титана и циановодорода, т.е. по схеме «пар-кристалл», что позволяет прогнозировать возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов: справочник / А.Л. Сурис. – М.: Металлургия, 1985. – 568 с.
2. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы / С.А. Крапивина. – Л.: Химия, 1981. – 248 с.
3. Морохов И.Д. Современное состояние проблемы «Ультрадисперсные системы» / И.Д. Морохов // Физикохимия ультрадисперсных систем: сб. науч. тр. / ИМ АН СССР. – М.: Наука, 1987. – С. 5–10.
4. Залите И.В. Образование карбонитридных фаз титана в высокотемпературном потоке азота / И.В. Залин [и др.] // Физика и химия обработки материалов – 1980. - №1.-с.62-65.
5. Фильков М.Н. Синтез карбонитрида титана в трехструйном плазмохимическом реакторе / М.Н. Фильков [и др.] // Электродиффузия, электромеханика прикладная электротехника: сб. науч. тр. – Алма-Ата: КПИ, 1982. – с.17-25
6. Руднева В.В. Макрокинетика процессов пиролиза углеводородов в плазмометаллургическом реакторе / В.В. Руднева // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – №7. – С.16-19.
7. Галевский Г.В. Исследование пиролиза пропана в высокотемпературном потоке азота / Г.В. Галевский, А.А. Корнилов, Ю.А. Крутский // Известия вузов. Серия химия и хим. технология. – 1981. – Т. 24. – Вып. 7. – С. 874–877.
8. Залите И.В. Исследование образования карбонитридных фаз переходных металлов в высокотемпературном потоке азота / И.В. Залите, Т.Н. Миллер, Э.А. Палчевский // Применение низкотемпературной плазмы в технологии неорганических веществ и порошковой металлургии. – Т. 2. – Рига: Зинатне, 1985. – С. 30–37.
9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник: в 4 т. / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1978-1982 гг.
10. Spangeberg H.J. Thermodynamische Funktion verschiedener Kohlenwasserstoff – Stickstoff – Verbindungen und Radicals bei hohen Temperaturen und die Zusammensetzung von CHN – Plasmen // Zeitschrift für physikalische Chemie. – 1974. – В. 255. – № 1. – S. 1–15.
11. Гурвич Л.В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Т. 2 – М.: АН СССР, 1962. – 775 с.
12. Barin J. Thermochemical properties of Inorganic Substances / J. Barin, O. Knache. – N-Y.: Academicpress, 1973.–647 p.
13. JANAF Thermochemical tables. – Wash. Gov. print. off, 1966–1975.
14. Герасимов Я.Н. Химическая термодинамика в цветной металлургии: Т. 5 / Я.Н. Герасимов, А.Н. Крестовников, А.С. Шахов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
15. Уикс К.Е. Термодинамические свойства 65 элементов и их окислов, галогенидов, карбидов и нитридов / К.Е. Уикс, Ф.Е. Блок. – М.: Металлургия, 1965. – 126 с.

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

В.Н. Цвигун, С.А. Куклин, Н.В. Козлов

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

УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИЗНОСО- И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА МИНИОБРАЗЦАХ.

В статье представлены результаты разработки установки и исследований износо- и трещиностойкости различных материалов, проведенных с ее помощью.

The methods are suggested for exact definition of the wear and tear (a rub against revolving small ball after the scheme of the Shcoda-Savin's machine) and the crack resistance of materials according to results of the trial of models 25×6×3 mm. Such decrease of the sizes of the standard models lets compare all these parameters of two modes within some hours of trials.

The morphology of the increase of fatigue and quasi-static cracks, their interaction with defects, become clearer from direct observations.

Трещиностойкость и износостойкость – очень важные и сложные свойства материалов, но исследования по их оценке, качественной и количественной, часто связаны с изучением монокристаллов, тонких образцов, покрытий, поверхностных обработок, коррозионной тематики (тем более, что у вершины усталостной трещины быстро формируются слои гидроксильных групп), необходимостью послойной вырезки образцов из больших изделий, типа рельс и т.д.

В данной работе использовали миниобразцы, размером 25×6×3 мм принятые в соответствии с геометрией британского стандарта на трёхточечный изгиб с одной боковой трещиной длиной от 1,2 до 3 мм. Такие образцы легко и быстро готовить, испытывать и изучать методами оптической и растровой микроскопии (РЭМ).

Дополнительно, становится возможным исследование фрактографических особенностей поверхностей разрушения двух половинок одного излома, когда они установлены рядом в камере РЭМ, а также прямое изучение расщепления, текстур в зоне вытяжки (перед разрушением) прямо в камере РЭМ.

На рисунке 1 изображен общий вид микропульсатора Ц75 для испытания образцов, схема крепления, и нагружения образца. Микропульсатор Ц75 состоит из основания (размером 300×380 мм), на котором установлен двигатель постоянного тока (400 Вт, 24 В), на валу двигателя закреплён фланец диаметром 40 мм, по которому может плавно перемещаться и фиксироваться

пластина кривошипа 3, имеющая четыре прорези под болты М5 (перемещением кривошипа устанавливается размах нагрузки, прикладываемой к образцу). На кривошипе установлен подшипниковый узел 4, нагружающий рычаг 5 (на нем размещён тензодатчик 13) поворачивается вокруг подшипникового узла 6.

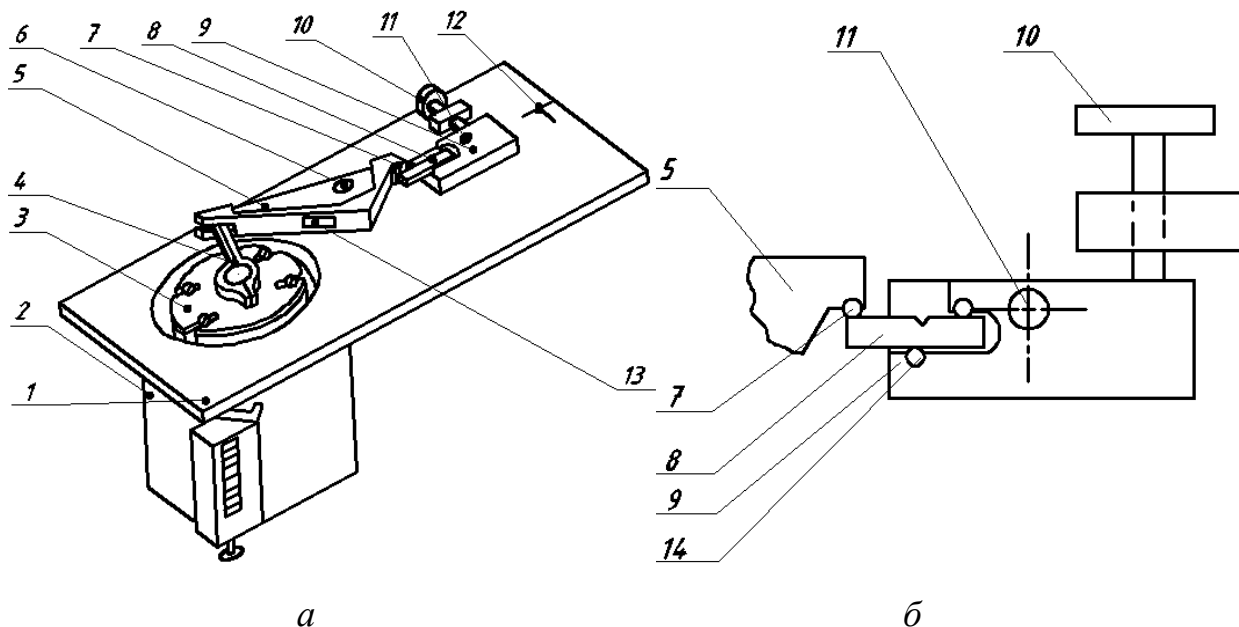


Рисунок 1 – Микропульсатор Ц75 для испытания миниобразцов на трещиностойкость (а) и схема крепление образца (б)

1 – основание; 2 – двигатель; 3 – пластина кривошипа; 4 – подшипниковый узел; 5 – нагружающий рычаг; 6 – подшипниковый узел; 7 – упор; 8 – образец; 9 – захват; 10 – нажимной винт; 11 – ось; 12 – штатив микроскопа; 13 – тензодатчик; 14 – цилиндрическая опора

Через упор 7 рычаг связан с образцом 8. Образец установлен в захвате 9 таким образом, что выполняется схема трехточечного изгиба (расстояние между опорами 24 мм). Нагрузка на образец создаётся нажимным винтом 10 при повороте держателя образца вокруг оси 11. В точке 12 на основании 1 установлен штатив микроскопа Цейсс с проекционной насадкой МНП-1 с экраном диаметром 150 мм (увеличение до 150 раз). Измерение длины трещины выполняется линейкой - по экрану, отсчётом от реперных линий, нанесённых на образце через 0,2 мм. Линии наносятся алмазной иглой от профилографа, когда образец установлен для разметки горизонтально (запрессовка прессиком на пластилин).

Микропульсатор Ц75 работает следующим образом. В паз держателя 9 устанавливаем образец 8, и фиксируем симметрично относительно цилиндрической опоры 14, и поджимаем механизмом статического нагружения 10 на необходимую величину нагрузки. При включении двигателя 2 сначала на частоте 3 Гц точно устанавливаем размах нагрузки и затем увеличиваем частоту до 30 Гц. Число циклов подсчитывается счётчиком СЭД-2.

Надрез на образце предварительно создаётся с помощью электролобзика. Установленная на нём молибденовая проволока диаметром 0,1 мм и длиной 150 мм (абразивом служит алмазная паста) за несколько минут создаёт идеальный надрез глубиной 0,8 мм и радиусом 0,05 мм.

Образец перед испытанием промывается от алмазной пасты в ультразвуковой ванне.

Периодически измеряя длину усталостной трещины, зная размах ΔP , строится график зависимости длина трещины - число циклов, далее вычисляем уравнение Пэриса.

Когда вершина усталостной трещины достигает последней реперной линии (зона долома будет 3 мм), образец устанавливается на стенд для окончательного разрушения с записью диаграммы раскрытия трещины - усилие. На боковую грань образца, вблизи надреза, устанавливаем скобу с тензодатчиками для регистрации раскрытия и выполняется плавное нагружение образца с записью сигналов на двухкоординатный самописец.

Можно также разрушать образец и статическим нагружением на пульсаторе Ц75 (винтом 10), значения K_c при этом определяются менее точно, но, наблюдая в микроскоп, хорошо видно образование ступеньки в вершине трещины и полос скольжения из углов этой ступеньки, сначала небольшого количества микротрещин, а потом сотен, которые при разрушении веером вскрываются внутри 120-градусного треугольника, образованного полосами скольжения. После разрушения эти трещины, в основном, уже не видны, т.к. быстро прошли реверсивные упруго-пластические сдвиги и развороты микрообъёмов.

На микропульсаторе Ц75 проведены исследования по прямому наблюдению механики образования усталостных бороздок и проверка известных моделей Смита-Лэйерда, Риппан, Томкинса, Ноймана, Виртмана, Херцберга, Якоби и других. На прозрачных образцах из ПММА, ПК и эпоксидной смолы, а также сталях, содержащих 0,2 - 1,2 % углерода и других материалах наблюдали реверсивные сдвиги, развороты в полосах скольжения, деформации в микрообъёмах и их исчерпание, далее вскрытие трещин, их соединение в цепочки.

Очень важны роли «насосов реверсивной накачки» деформаций в усах из вершины трещины и трёхмерных остаточных напряжений растяжения после захлопывания трещины, что теоретические работы пока не описывают. При небольших увеличениях это можно видеть снаружи и внутри прозрачного образца. На пульсаторе Ц75 можно в деталях напрямую рассмотреть ранее непонятную фрактографию: как перегрузки, траковые следы, ветвление и взаимодействие трещин - всё это хорошо поддаётся изучению.

Для изучения влияния небольших перегрузок на образование характерных усталостных бороздок (рисунок 2, а), нагрузили образец по специальной программе (рисунок 2, б). Прямое наблюдение образования бороздок с помощью стереомикроскопа (сбоку) выявило, что при очень низких циклических напряжениях усталостные бороздки выглядят как непрерывная череда мелких

волн (рисунок 2, в), поскольку у вершины трещины идет затупление трещины в момент старта трещины (рисунок 2, в, точка С) и соседняя и новая бороздка соединяются без квазискола. При больших напряжениях этот радиус разрыва становится больше и появляется прямой участок квазискола (рисунок 2, г) по трещине – лоцману (т.л.); трещина квазискола может начаться как в вершине зоны вытяжки, так и немного в стороне, на одном из усов деформации.

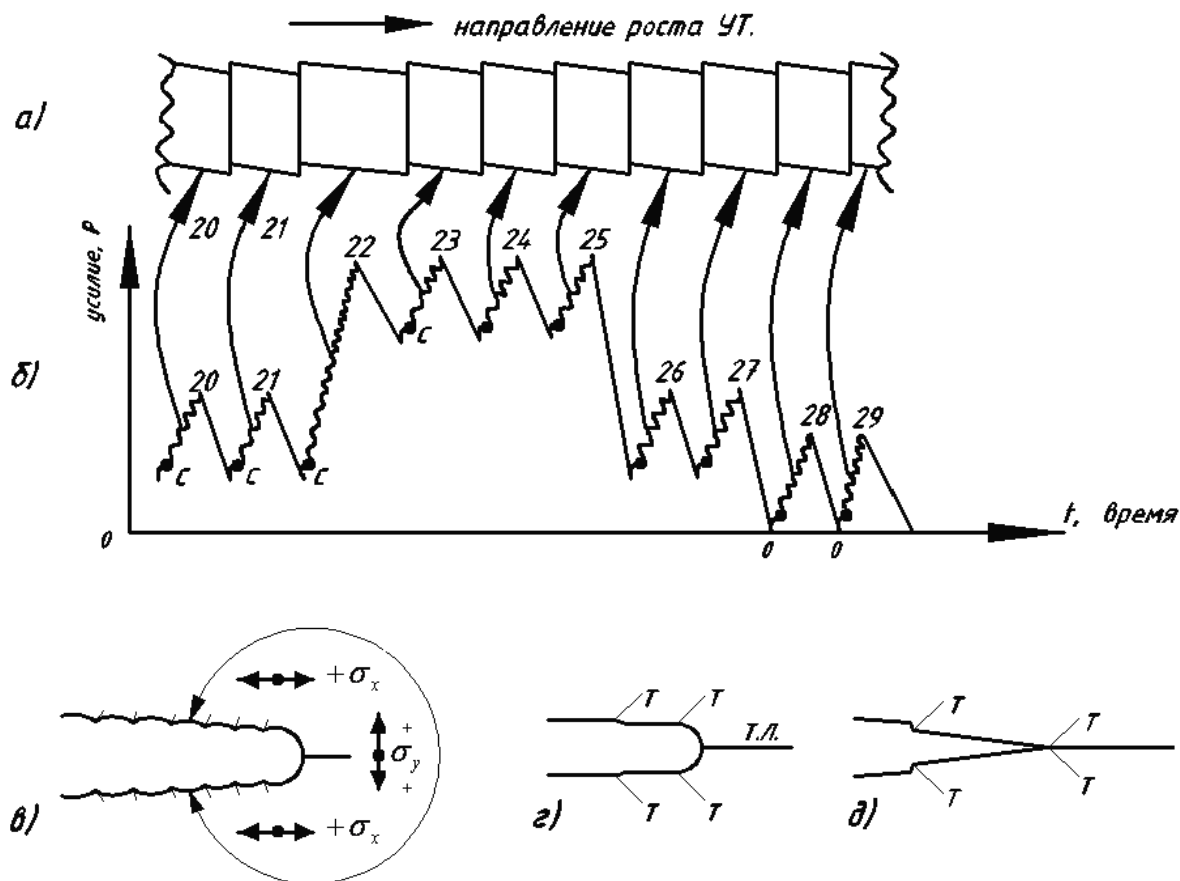


Рисунок 2 – Длина усталостных бороздок (а) в зависимости от величины циклических напряжений (б). Длина усталостной бороздки пропорциональна величине левого ската цикла нагружения; б) график циклическое усилие – время. Трещина растет только на участках : $C \div 20$, $C \div 21$, $C \div 22$ и т.д. Вид усталостных бороздок при низких (в), средних (г) и высоких (д) напряжениях. (образец – материал ПММА).

На склоне бороздки всегда есть вторичные трещины (рисунок 2, г-т), которые образуются в момент затупления трещины перед ее рывком по трещине – лоцману. Это происходит на левом склоне пилы напряжений, чуть выше точки (С). Трещина – лоцман растет до тех пор, пока идет наращивание напряжений цикла, а при переходе через максимальное значение трещина – лоцман начинает закрываться.

При очень высоких напряжениях гладкие участки трещины могут быть длинными (как у эпоксидной смолы 0,5 – 0,8 мм), т.е. длина квазискола определяется пластической деформацией цикла. Нельзя забывать и то, что мате-

риал у вершины усталостной трещины охрупчен циклическим изгибом на определенный угол (например стальная пластина при угле изгиба 90° выдерживает 2 изгиба, при угле 10° - 60 изгибов до разрушения).

На микропульсаторе Ц75 удобно изучать стабильный рост усталостных трещин на очень хрупких материалах, как мартенсит стали, НРС 64 или на пластинах эпоксидной смолы толщиной 1 – 4 мм. На больших образцах это сделать почти невозможно. Причём в поляризованном свете хорошо видно взаимодействие вершины трещины с встречающимися дефектами и включениями. На рисунке 3 показано образование трёхмерной усталостной трещины из-за образования поперечной трещины (её длина 0,06 мм), которая образовалась от включения и исказила рост плоских усталостных бороздок (шаг бороздок 0,016 мм).

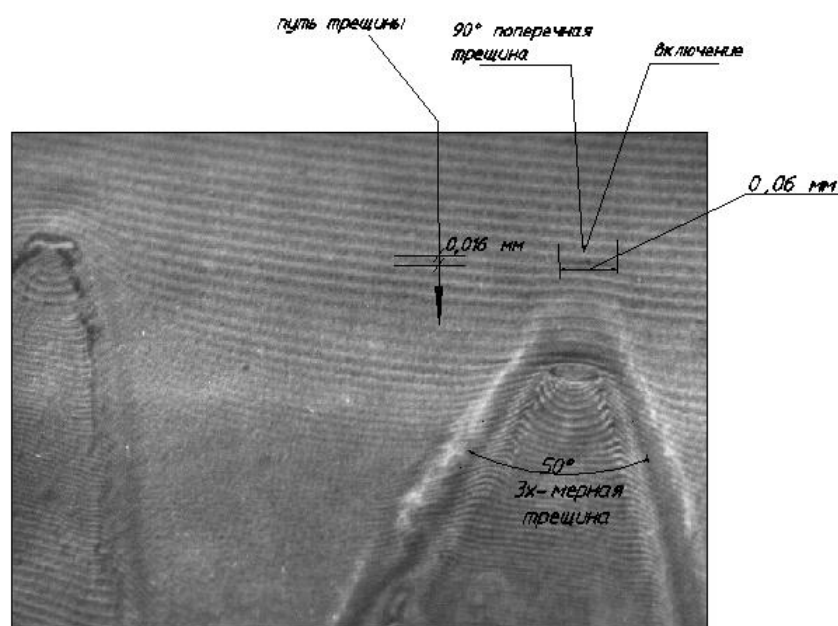


Рисунок 3 – Образование трёхмерной усталостной трещины при встрече с включением, которое зародило 90° – градусную трещину длиной 0,06 мм, которая привела к увеличению площади усталостной трещины; усталостные бороздки (материал ПММА) образуют сложный узор, углом расширения 50° градусов

Для малоциклового усталостного нагружения миниобразцов, с ранее наведённой на пульсаторе Ц75 усталостной трещиной был изготовлен пульсатор Ц82, размером $110 \times 80 \times 30$ мм, максимальное усилие 200 кг, частота нагружения: 2 Гц (рисунок 4), этот пульсатор можно устанавливать в 2-х положениях (когда трещина изучается на образцах $25 \times 6 \times 3$ мм в фас и в профиль):

а) на рентгеновском дифрактометре (измерения макро, микронапряжений в зоне вытяжки, текстур деформации, так на дюралевых образцах текстурные рефлексы хорошо видны в электронографе ЭР-100)

б) в камере РЭМ, когда образец можно нагружать и разгружать при наблюдении и останавливаться в любой точке цикла, что на пульсаторе Ц75 невозможно.

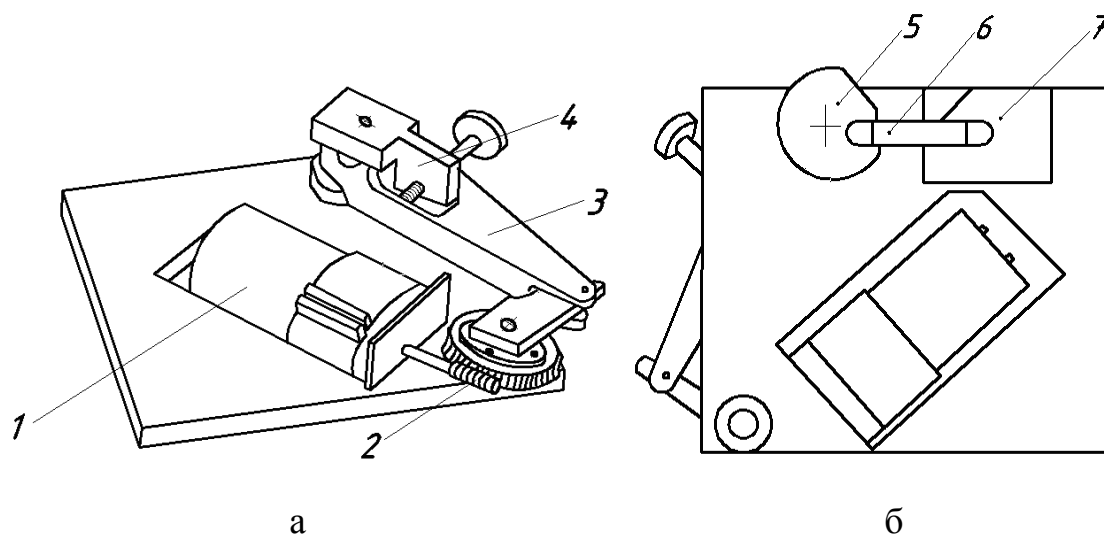


Рисунок 4 – Микропульсатор Ц82 для изучения усталостных трещин в камере РЭМ и методами рентгеновских микропучков

1 – двигатель постоянного тока; 2 – червячный редуктор; 3 – рычаг; 4 – винтовой механизм статического нагружения; 5 – нагружающий элемент; 6 – образец; 7 – держатель

Пульсатор Ц82 состоит из двигателя постоянного тока 1 (27 В, 2 А), червячного редуктора 2, рычага 3, винтового механизма статического нагружения 4, нагружающего элемента 5, образца 6, держателя образца 7.

Образцы после испытания на трещиностойкость можно испытывать на износ (истиранием) на специально созданной машине Ц83, рисунок 5. Она создана после длительного поиска разных вариантов (17 схем) испытаний, позволяет быстро, легко и с высокой точностью 5 – 10 % (от 20 до 10 измерений), оценивать материалы разной твёрдости (менее 45 НРС), в том числе и тонкие покрытия (от 10 мкм), сверхтвёрдые гальванические и полученные методами импульсной, плазмы (оксидов гафния, циркония и др.).

Машина на износ состоит из основания 9 (размером 210×340мм), на котором установлены: привод постоянного тока 6 (12 В, 3 А, 2 об/с) с плавным регулированием числа оборотов, вращающий стальной закалённый шарик 8 (диаметром 14 мм), устройство для вертикального и горизонтального перемещения образца 3, устройство для размещения грузов 1, счётчик числа оборотов электродвигателя 7 и микроскоп МБС-9. Узел 5 поворота рычага 4 выполнен как плунжерная пара, позволяющая точно опускать образец на вращающийся шарик и через 500 оборотов шара переводить образец в левое положение (поворот на 180 градусов), чтобы надвинуть микроскоп на образец, и измерить лунку износа. Обычно для одного образца делаем четыре измерения через 500 оборотов шара. По зависимости (рисунок 5) можно сравнить износоустойчивость двух материалов.

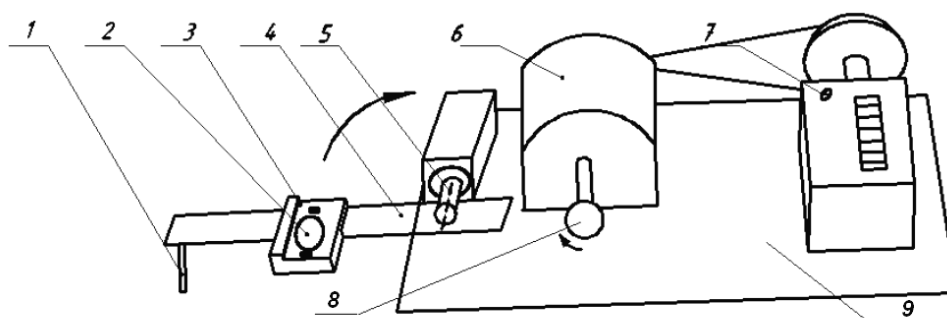


Рисунок 5 – Машина Ц83 для испытания миниобразцов на истирание
 1 – устройство для размещения грузов; 2 – образец; 3 – устройство для горизонтального и вертикального перемещения образца; 4 – рычаг; 5 – плунжерная пара; 6 – привод постоянного тока; 8 – вращающийся стальной закаленный шарик; 9 – основание

Образцы из титанового сплава ВТ-20 поверхностно легировали (слой до 80мкм) гетерогенной импульсной плазмой. К образцу под постоянной нагрузкой 0,8Н прикладывали вращающийся со скоростью 2 об/с шарик из закаленной стали ШХ-15, который истирал на нём лунку. При такой схеме испытаний постоянно увеличивается площадь контакта шарика с образцом и меняется удельное давление на изнашиваемую поверхность. Исходя из рис.6 , заключаем: материал № 2 лучше чем №1 в: $D_1^2/D_2^2 = 0,9^2/0,6^2 = 2,25$ раза кроме того, по току, потребляемому двигателем, можно оценивать коэффициент трения пары шар – плоскость, а также изучать влияние смазок, ингибиторов коррозии и т.д. Рядом с лункой износа на образце образуется небольшое количество микростружки и округлых оксидов, по анализу которых можно изучать условия сдирания оксидных плёнок с поверхности износа.

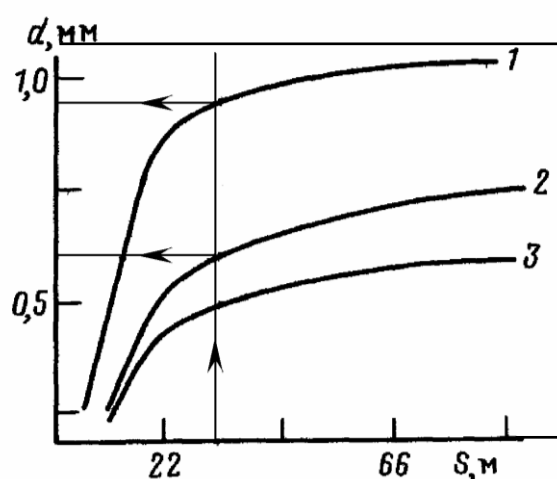


Рисунок 6 – Зависимость диаметра вытираемой на образце лунки от пути трения вращающегося шарика: 1 - нетермообработанная поверхность Ti, 2 - после легирования алюминием, 3 - после легирования никелем

По прямым наблюдениям механизмов роста усталостных трещин отметим следующее:

1. Расхождение берегов трещины у её вершины можно использовать как датчик деформации, ΔK , K , т.е. на коротких трещинах, когда линейная механика разрушения даёт ошибки, можно считать угол $\Delta\alpha$ - раскрытия усталостной трещины пропорциональным ΔK , и мерять его по катету, например, на расстоянии 1 мм от вершины трещины (с поправкой на ступеньку, если она есть).

2. Две прямые, проведенные по берегам усталостной трещины, в сторону вершины дадут угол α и точку вращения материала (шарнир), внутри этого шарнира идут деформации предразрушения и объединения трещин, но когда образуется ступенька, точка вращения передвигается вглубь материала.

3. Разрушения материала вблизи вершины усталостной трещины идёт по своим механизмам (слабо напоминающим то, что видно на макрообразцах), это: сложные процессы локального перегрева, вспучивания, кислотной коррозии, разрыхления, увеличения пор, трещин и тут же разгрузка плющит этот микрообъём, создаёт остаточные растягивающие напряжения и, вновь, нагрузка цикла усталости растягивает очень ограниченный пластически передеформированный микрообъём, который с пяти сторон зажат упругодеформированным объёмом.

**ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА
ПРЕДПРИЯТИЯХ**

УДК 669.338+658.012(075.8)

В.А. Быстров, Е.С. Вуцан, П.К. Дьяков, Т.Н. Борисова
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В работе рассмотрен алгоритм управления инновационно-изобретательской деятельностью развития металлургических предприятий на основе жизненного цикла создания новаций.

The control algorithm by is innovative-inventive activity of development of the metallurgical factories on the basis of life cycle of creation of innovations is in process observed.

В процессе инновационной деятельности современное металлургическое предприятие может повысить эффективность работы, лишь четко ориентируясь на производственный процесс и руководствуясь общим учетом воздействия факторов внешней и внутренней среды. Для этого необходима подробная классификация инноваций, их свойств и возможных путей разработки и применения наиболее перспективных технических решений. Наиболее характерными показателями нововведений являются такие показатели, как абсолютная и относительная новизна, приоритетность и прогрессивность, конкурентоспособность, адаптивность к новым условиям хозяйствования, способность к модернизации, а также показатели экономической эффективности, экологической безопасности. Показатели новшества являются составляющими технико-организационного уровня нововведения и его конкурентоспособности, значимость которых определяется по степени влияния на результаты деятельности предприятия: на себестоимость продукции, ее качество, объем продаж и прибыли; уровень рентабельности хозяйственной деятельности, что показано в алгоритме управления инновационным развитием металлургического комбината – рисунок 1.

Особенностью данного алгоритма является то, что источником средств на осуществление инновационной деятельности являются средства, сэкономленные в процессе совершенствования и социального развития металлургического производства.

Основополагающими в этом процессе являются два контура:

- моделирование технологического развития предприятия;
- проверка преобразований по критерию баланса интересов и ответственности взаимодействующих субъектов.

Последовательное выполнение всех стадий позволяет достичь комплементарного производственного взаимодействия и эффективно осуществлять инновационное технологическое развитие по всем металлургическим переделам.

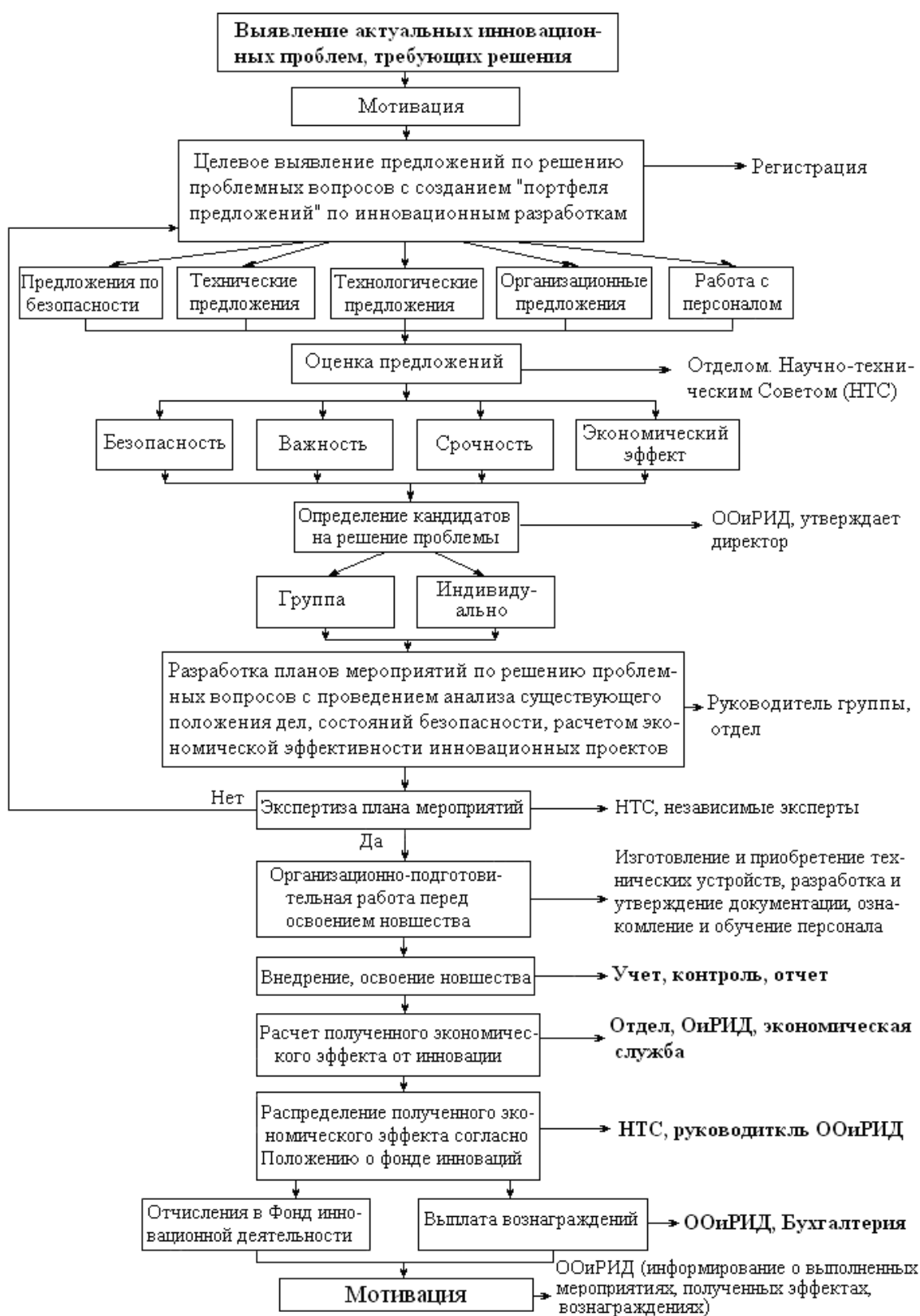


Рисунок 1 – Алгоритм управления инновационным развитием меткомбината

Для новых видов продукции, технологии и услуг особенно важен показатель их патентной и лицензионной чистоты и защиты, ибо они являются не только интеллектуальными продуктами первого рода, т.е. обладают приоритетностью, абсолютной новизной, но и являются оригинальным образцом, на

основании которого тиражированием получают новшества-имитации, копии или интеллектуальный продукт второго рода. Интеллектуальный продукт защищается правом собственности, поэтому предприятию для развития инновационной деятельности необходимо наличие патентов, лицензий, изобретений и ноу-хау. Развитию инноваций на металлургических комбинатах способствует изобретательская деятельность как работников научно-практических отделов и лабораторий комбината, так и профессорско-преподавательского состава вузов, взаимодействующих с ними.

Авторы статьи попытались определить интенсивность инновационно-изобретательской деятельности в России по ежегодному возрастанию номера изобретений. На рисунок 2 отчетливо просматриваются спады и подъёмы изобретательской, а следовательно, и инновационной деятельности, что точно соответствует характеру изменения экономической ситуации в целом по всей России.

В советский период плановой экономики на изобретательскую деятельность также распространялся определенный план (на 20 тыс. руб. хоздоговорных работ – как минимум одно изобретение). Хоздоговорные работы практически были прерваны в 1988 г (этому соответствует участок затишья 1988–1992 гг.). Переход к рыночным отношениям, казалось бы, открывал широкие перспективы перед новаторами производства, что вызвало определенный всплеск активности (1992–1994 гг.).



Рисунок 2 – Динамика изобретательской деятельности за период 1977–2009 гг

Но последующий развал экономики страны, ужесточение конкурентной борьбы, приведшее к сокращению затрат как на развитие производства, так и на новаторскую деятельность, что четко отражается на характере изобретательской деятельности (1993–1998 гг.). В период оживления экономической ситуации в России просматривается рост активности новаторов изобретателей (1999–2009 гг.), что, несомненно, сказалось на инновационной деятельности металлургических комбинатов. В связи с пересмотром политики Правительства России и особенно политики Президента России, на наш взгляд активность новаторской деятельности изобретателей резко возрастет, и не потому, что возрастут авторские вознаграждения, которые всегда были мизерными по сравнению с выплатами авторам значимых изобретений в развитых странах, а

потому что инновационные разработки стали, наконец-то, востребованными в России на производстве.

Жизненный цикл инновации представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов и стадий создания новшества. Жизненный цикл инновации определяется как промежуток времени от зарождения идеи до снятия с производства реализованного на ее основе инновационного продукта. Инновация в своем жизненном цикле проходит ряд стадий, включающих:

- зарождение, сопровождающееся выполнением необходимого объема НИОКР, разработкой и созданием опытной партии новшества;
- рост (промышленное освоение с выходом продукта на рынок);
- зрелость (стадия увеличения производства и объема продаж);
- насыщение рынка (максимизация производства и объема продаж);
- упадок (свертывание производства и уход продукта с рынка).

С позиций инновационной деятельности различают как жизненные циклы производства, так и жизненные циклы обращения новшества.

Первая стадия – внедрение новшества – является наиболее трудоемкой и сложной. На первой стадии воспроизводится и совершенствуется технология, отрабатывается регламент производственного процесса. И именно на данной стадии наблюдается высокая себестоимость продукции и незагруженность мощностей.

Вторая стадия – стадия промышленного освоения производства – характеризуется медленным и растянутым во времени наращиванием выпуска продукции с доработкой металлургических процессов по циклам.

Третья стадия – стадия подъема – отличается быстрым наращиванием производства, увеличением загрузки производственных мощностей, отлаженностью технологического процесса и организации производства.

Четвертая стадия – стадия зрелости и стабилизации – характеризуется устойчивыми темпами наибольших объемов выпуска продукции и максимально возможной загрузкой производственных мощностей.

Пятая стадия – стадия увядания или упадка – связана с падением загрузки мощностей, сворачиванием производства данного товара и резким уменьшением товарных запасов вплоть до нуля.

Состав и структура циклов жизни новой техники и технологии тесно связаны с параметрами развития производства. Так, например, на первой стадии жизненного цикла новой техники и технологии производительность труда низкая, себестоимость продукции снижается медленно, также медленно возрастает прибыль предприятия, а иногда экономическая прибыль может быть даже отрицательной. В период быстрого роста выпуска продукции заметно снижается себестоимость, окупаются первоначальные затраты. Частая смена техники и технологии создает большие сложности и нестабильность производства. В период перехода на новую технику и освоения новых технологических процессов снижаются показатели эффективности всех подразделений предприятия. Вот почему инновациям в области технологических процессов и орудий труда должны сопутствовать новые формы организации и управ-

ления, пооперационный, попроцессорный и поддетальный расчет экономической эффективности. Методика анализа продолжительности циклов жизни позволяет дать ответ о динамике технико-экономических показателей производства и прогнозировать тенденции развития.

Принципиальные отличия инновационной деятельности предприятия от текущего производства заключаются в том, что оценка текущего состояния предприятия, в том числе и техники и технологии, строится на выявлении условий успеха на основании прошлого опыта и сложившихся тенденций. Для такого анализа характерно применение ретроспективной корреляции между итогами хозяйственной деятельности и издержками. Характерными подходами являются: комплексный экономический анализ эффективности хозяйственной деятельности, анализ технико-организационного уровня производства, анализ использования производственных ресурсов и анализ взаимосвязи себестоимости, объема продукции (по ассортименту) и прибыли [1]. Для анализа инновационной деятельности предприятия необходим анализ-прогноз будущих факторов успеха в условиях неопределенности и обоснование затрат будущего периода. В отличие от детерминированных экономических процессов текущего производства процессы внедрения новой техники и технологии с их последующей коммерциализацией имеют стохастический характер. Поэтому анализ влияний на прибыль следует строить на основе методов прогнозирования, методов экспертных оценок, множественного регрессионного анализа, а также ситуационного и имитационного моделирования создания технологических новшеств, что нашло отражение в структуре алгоритма создания новаций (см. рисунок 1).

В современных условиях производительная работа всего металлургического производства зависит от устойчивой, взаимосвязанной работы инновационных потоков всех металлургических циклов, лимитирующих и образующих качество конечной продукции, а следовательно, её конкурентоспособность. Так, например, улучшение физических свойств агломерата и стабилизация его гранулометрического состава могут обеспечить ровный, стабильный ход доменных печей, полноту протекания металлургических процессов, увеличить выплавку чугуна на $9 \div 11$ %, снизить удельный расход кокса на $6 \div 9$ %, улучшить качество чугуна. Каждый процент мелочи в железорудной части доменной шихты снижает производительность доменной печи на $0,6 \div 0,8$ % и повышает расход кокса на $0,4 \div 0,7$ %. Содержание мелочи в скиповом агломерате не должно превышать $1 \div 2$ %. В начальный период работы дробильного органа агломашины обычно удается достигнуть таких показателей, но по мере износа бил роторных дробилок агломерата через три месяца стабильность гранулометрического состава агломерата ухудшается, при этом увеличивается выход мелочи до 45 %, что требует соответствующих затрат на переработку агломерата [2]. Упрочнение дробильных органов агломашины электрошлаковой наплавкой твердыми сплавами типа ТН 20 на основе карбидов титана позволило стабилизировать гранулометрический состав агломерата на всю кампанию агломашины.

Срок службы деталей засыпных устройств доменной печи (ЗУДП) на металлургических комбинатах России колеблется в широких пределах от 8 до 24 месяцев. Затраты на замену ЗУДП, в зависимости от мощности доменной печи, составляют от 2-х до 6-ти млн. руб. Длительность замены ЗУДП доходит до 72 ч. Следовательно, по этой причине на каждой доменной печи ежегодно теряется более 1 млн. руб. [1–3]. Упрочнение ЗУДП электрошлаковой наплавкой твердыми сплавами типа ТН 20 на основе карбидов титана позволило повысить срок службы практически до 36 месяцев, улучшить ход доменной печи и снизить себестоимость чугуна на 1,49 руб./т.

Одной из важнейших мер, способствующих увеличению выпуска проката, улучшению качества металлопродукции и снижению расходов по переделу, является повышение стойкости прокатных валков – основного рабочего инструмента прокатных станов горячего металла. Статистические данные, полученные как в нашей стране, так и за рубежом, достаточно красноречивы: 6 % всей стоимости прокатного стана составляет стоимость прокатных валков; 20÷25 % времени работы стана уходит на перевалки валков; в общих расходах по переделу затраты на валки по стану горячей прокатки составляют примерно 15÷17 % [4–7]. Упрочнение бандажированных валков, полученных электрошлаковым литьем с применением твердых сплавов типа ТН 20 на основе карбидов титана, позволило сократить время на перевалки валков и снизить расходы по переделу в 2–3 раза.

Выводы. Как следует из вышеизложенного, весьма важным этапом инновационной деятельности является поиск кардинальных взаимосвязей и взаимозависимостей между показателями технического уровня, качества применяемых новшеств с условиями их производства и эксплуатации и с экономической эффективностью. Дело в том, что в отдельности решить проблему качества и экономической эффективности новой техники и технологии невозможно. Наиболее целесообразно применить обобщенную технико-экономическую модель (или в простейшем варианте блок-схему), которая выявляет воздействие показателей технического уровня на обобщающие технико-экономические показатели: себестоимость, производительность, приведенные затраты и т.д. Для этого необходимо на самом начальном этапе проектирования новшества избрать альтернативный вариант: 1) оптимальные свойства новшества при максимальной экономической эффективности; или 2) максимально совершенный уровень новшества при удовлетворительной экономической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров В.А. Экономическая эффективность инноваций повышения долговечности металлургического оборудования / В.А. Быстров, Н.И. Новиков, Д.А. Лубяной // Современное предпринимательство: / Под общ. ред. О.И. Кирикова. – Книга 18. – Воронеж: ВГПУ, 2007 г. – 320 с. – (С. 289–318).

2. Быстров В.А. Эффективность инновационных решений в промышленности / В.А. Быстров, Н.И. Новиков, Д.В. Подъяпольский. // Отв. ред. В.В. Титов, В.А. Быстров. Новосибирск: Сибирское научное издание, 2011. 412 с.

3. Быстров В.А., Новиков Н.И. Управление инновационным развитием промышленных предприятий. / «Развитие инновационной экономики в условиях финансового кризиса» // Отв. ред. А.В. Бабкин. – СПб: Изд-во Политехнического университета. – 2012. 484 с. – (С. 282–331).

4. Быстров В.А. Методы принятия инновационных решений в промышленности: учеб. пособ. / В.А. Быстров, Н.И. Новиков; – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. –409 с.

5. Быстров В.А. Инновации, обеспечивающие снижение издержек, рост производства и повышение качества металлопродукции / В.А. Быстров, Н.Ю. Грекова, О.Г. Трегубова // Инновационная экономика и промышленная политика региона (ЭКОПРОМ-2010): труды международной НПК. Т.1. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. – 627 с. (С. 408–415).

6. Bystrov V.A., Verevkin V.I., Selyanin I.F. Electroslag technology of strengthening metallurgical equipment details with composite materials /Izv. Institute of higher education. Iron and steel industry. 2005. № 6. S. 28-32.

7. Ott G.A. The development of forged steel roll metallurgy for hot steel mill applications // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. Baltimore, M. D., USA, October 24-27, 1999. P. 321-334.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Е.П. Волынкина, Е.В. Протопопов, М.В. Темлянцев, Г.В. Галевский
ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
университет», г. Новокузнецк

РАЗВИТИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В СИБГИУ

В статье представлен опыт Сибирского государственного индустриального университета по созданию и развитию системы экологического образования.

In the article the experience of the Siberian state industrial university on creation and development of a system of ecological formation is shown.

В 2012 г. Президентом РФ утвержден программный документ экологической реформы в России «Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года». Важнейшими задачами государственной экологической политики объявлены развитие экологического образования и приведение экологического законодательства в соответствие с международными нормами.

Министерством природных ресурсов и экологии подготовлено и направлено в ГосДуму 48 законопроектов и других нормативных актов (т.н. пакет «зеленых законов»), целью которых является переход на новые принципы нормирования негативного воздействия предприятий на окружающую среду и введение мер экономического стимулирования для внедрения наилучших доступных технологий (НДТ), многократное увеличение экологических платежей и штрафов, ликвидацию накопленного экологического ущерба, усиление экологического контроля и надзора, стимулирование переработки отходов, регулирование деятельности особо охраняемых природных территорий и др.

Реализация реформы экологического законодательства требует притока на предприятия всех уровней профессионально подготовленных специалистов. В связи с этим профессия эколога в России приобретает все большую популярность. Сегодня наличие в штате профессионала-эколога становится для любого предприятия вопросом выживания в новых условиях, соответственно и растет спрос на таких специалистов на рынке труда. Согласно исследованию, проведенному самым авторитетным рекрутинговым порталом SuperJob, профессия инженера-эколога входит в список самых востребованных и интересных профессий на рынке труда России. Эколог стал также необходим, как бухгалтер, и промышленному предприятию, и торговому центру, и жилищной компании, и малому бизнесу.

Уровень подготовки профессиональных экологических кадров имеет большое значение и для решения региональных экологических проблем. Куз-

басс относится к числу наиболее сложных экологических регионов России. 49 % населения региона проживает в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха. Промышленный центр Кузбасса г. Новокузнецк традиционно входит в пятерку самых загрязненных городов России, занимая в отдельные годы 2 и 3 места. Реки бассейна реки Томь существенно загрязнены сточными водами предприятий горнодобывающей, коксохимической, топливно-энергетической, металлургической, химической промышленности, агропромышленного комплекса и коммунального хозяйства. Кемеровская область занимает первое место в России по количеству образующихся отходов: свыше 2 млрд. т в год при общем образовании в России более 4 млрд. т. Около половины образующихся отходов не перерабатывается и складывается в отвалах, свалках, шламо- и хвостохранилищах, оказывая негативное воздействие на окружающую среду. Накопления отходов превышают 20 млрд. т.

В настоящее время переработка отходов рассматривается руководителями нашего региона как одно из перспективных направлений диверсификации экономики. В связи с этим в регионе разработан и принят ряд важных документов, стимулирующих развитие отходоперерабатывающих предприятий. Разработана и направлена в Правительство РФ Комплексная целевая Программа «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011-2016гг. и на период до 2020 г.». Кемеровская область вошла в число пяти пилотных регионов России, которые включены в долгосрочную инвестиционную программу Правительства РФ по обращению с отходами. Правительством РФ отмечено, что в Кузбассе имеются идеальные условия для создания отходоперерабатывающей отрасли: огромная масса образующихся и накопленных отходов, традиционная производственная ориентация работающего населения, наличие десятков действующих отходоперерабатывающих предприятий, создание их профессиональной Ассоциации, а также существующая система подготовки профессиональных кадров в области переработки отходов в СибГИУ.

Переработка отходов входит в перечень приоритетных видов деятельности малого и среднего бизнеса. В регионе действует и успешно развивается Кузбасская Ассоциация переработчиков отходов. В настоящее время в Ассоциацию входит 37 организаций, из которых 55 % – переработчики ТБО, 29 % – переработчики промышленных отходов, 8 % – операторы полигонов, 7 % – перевозчики отходов, 1 % – проектировщики. Участниками Ассоциации перерабатывается ежегодно более 60 тыс.т отходов, а реализуемые в этой области инвестиционные проекты обеспечат увеличение объемов переработки до 730 тыс.т отходов в год.

В настоящее время в СибГИУ создана комплексная система экологического образования, структура которого включает 5 основных компонентов (модулей) (рис. 1):

- общая экологическая подготовка;
- основное профессиональное экологическое образование;
- дополнительное профессиональное экологическое образование;

- научно-образовательная и внедренческая деятельность;
- внеучебная и эколого-просветительская деятельность.

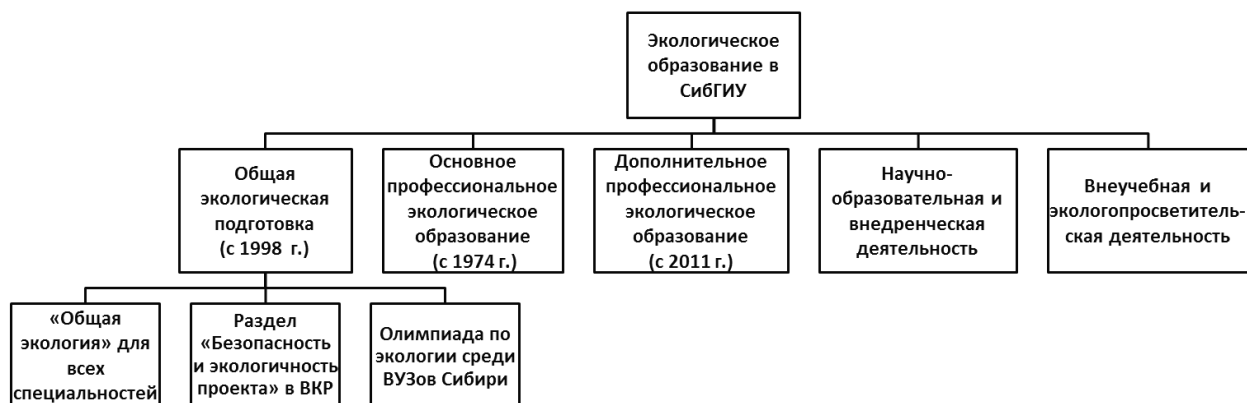


Рисунок 1 – Структура экологического образования в СибГИУ

Общая экологическая подготовка включает преподавание дисциплины «Экология» для всех специальностей, а также консультирование выполнением раздела «Безопасность и экологичность проекта» в ВКР и осуществляется созданной в 1998 г. кафедрой экологии и БЖД. В рамках общей экологической подготовки с 1999 г. в СибГИУ проводится Олимпиада по экологии среди вузов Сибири. За этот период в стенах вуза проведено шесть олимпиад, в которых приняли участие студенты 22 вузов Сибири. Для олимпиады была разработана компьютерная экономико-экологическая деловая игра «Чистый воздух», которая в настоящее время используется в учебном процессе. В процессе игры студент должен получить максимальную прибыль от производственной деятельности предприятия с учетом капитальных и текущих затрат и экологических платежей за выбросы.

Основное профессиональное экологическое образование (рисунок 2)

СибГИУ является первым университетом в Кемеровской области, на базе которого в 1974г. была организована подготовка профессиональных экологических кадров. На кафедре металлургических печей в рамках специальности «Теплотехника и автоматизация металлургических печей» была создана вначале специализация, а в 1982г. специальность «Улавливание и утилизация пылей и газов». С 1989г. обучение экологов ведется в рамках специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей», специализации «Промышленная экология». За истекший период по этому направлению выпущено 597 инженеров. Подготовленные кафедрой специалисты на протяжении почти 30 лет являлись единственным кадровым резервом региональных промышленных предприятий для укомплектования экологических служб, отделов, управлений, цехов по улавливанию и очистке выбросов и сбросов. Среди выпускников кафедры такие известные руководители как И.А. Климовская – руководитель Управления Росприроднадзора по

Кемеровской области, В.П. Долгополов – заслуженный эколог РФ, И.Н. Савина – Председатель Комитета ООС и ПР Администрации г. Новокузнецка, А.А. Попов – главный эколог ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и др.



Рисунок 2 – Структура основного профессионального экологического образования

СибГИУ является первым университетом в России, начавшим в 2003 г. подготовку инженеров по специальности 150109 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», специализация «Переработка комплексного и техногенного сырья». Первоначально обучение по данной специальности осуществлялось на кафедре теплофизики и промышленной экологии, в июле 2009 г. оно было организовано на специально созданной кафедре, которая имела название «Кафедра экстракции и рециклинга черных металлов», в марте 2010 г. кафедра переименована в кафедру техногенных и вторичных ресурсов.

В 2011 г. организована подготовка бакалавров и магистров по направлению 150400 «Металлургия», профиль «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. открыто направление подготовки бакалавров по направлению 022000 «Экология и природопользование», профиль «Экология».

В 2012 г. открыта аспирантура по научной специальности 05.16.07 «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов».

В 2013 г. открыта магистратура по направлению «Экология и природопользование», программа «Ресурсосбережение и утилизация отходов», начат прием на заочную форму обучения бакалавров.

Кафедра техногенных и вторичных ресурсов является первой и единственной в Сибири специализированной кафедрой, выпускающей специалистов в области переработки, обезвреживания и захоронения промышленных и бытовых отходов. Необходимо отметить, что обучение по этой специальности с самого первого дня было построено таким образом, чтобы обеспечить выпускникам возможность последующего трудоустройства не только в сфере переработки отходов, но и в качестве эколога на предприятии любого профиля.

Современные требования к профессиональному экологу включают помимо базовых знаний в области общей экологии, экологического права и экономики природопользования, необходимость инженерной подготовки. Эколог, независимо от того, работает он на промышленном предприятии, в проектной или консалтинговой компании, государственных природоохранных структурах, должен разбираться в технологических процессах, конструкциях технологического оборудования и любой используемой техники, системы очистки газов и воды, проектировании полигонов для захоронения промышленных и бытовых отходов, в специализированном оборудовании для переработки и обезвреживания отходов.

Поэтому в учебный план кроме обязательных профессиональных дисциплин по ГОС («Оценка и пути достижения экологической чистоты металлургического производства», «Техногенное сырье и вторичные ресурсы», «Конструкции и оборудование цехов для переработки техногенного сырья», «Рециклинг материалов») были включены такие дисциплины как «Химия окружающей среды», «Технологии переработки ТБО», «Основы проектирования полигонов», «Природоохранная деятельность предприятия», «Очистка сточных вод и утилизация осадков», «Очистка и обезвреживание дымовых газов», «Энергосбережение», «Экологические проблемы Кузбасса», «Теплогенерирующие установки по утилизации отходов», «Регулирование и технологии обезвреживания опасных отходов» и др.

Новое для университета направление обучения «Экология и природопользование» по ФГОС является гуманитарным, а не техническим. Для ведения таких специализированных дисциплин как «География», «Биология», «Почвоведение», «Биоразнообразие», «Ландшафтоведение», «Экология человека», «Учение о биосфере» и др. на кафедру были приглашены сотрудники КузГПА в качестве профессора и старшего лаборанта. Для обеспечения технической и практической подготовки будущих экологов в учебный план помимо требуемых ФГОС включены такие дисциплины как «Механика жидкости и газа», «Планирование эксперимента и математическая статистика», «Основы проектирования полигонов», «Рециклинг материалов», «Природоохранная деятельность предприятия», «Теплогенерирующие установки по утилизации отходов», «Технологии переработки ТБО», «Регулирование и технологии обезвреживания опасных отходов», «Очистка сточных вод и утилизация осадков», «Очистка и обезвреживание дымовых газов», «Техногенное сырье и вторичные материалы».

Для обеспечения качественной профессиональной подготовки специалистов в области экологии и переработки отходов подготовлены и изданы свыше 50 учебных пособий и методических материалов: «Экологические проблемы горно-металлургического региона: Кузбасс», «Природоохранная деятельность предприятия», «Газоочистные устройства сталеплавильных агрегатов и утилизация промышленных отходов», «Металлургические технологии переработки промышленных и бытовых отходов», методические указания «Проектирование полигонов твердых бытовых отходов», «Проектирование полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов», «Рециклинг твердых отходов в металлургии», «Комплексная переработка и использование твердых дисперсных отходов в металлургии», «Мартеновские шлаки и их использование», Монография «Техногенные месторождения» и др.

Созданы учебно-научные лаборатории «Техногенных и вторичных ресурсов», «Рециклинга материалов», «Экологии и природопользования», «Лаборатория экологии и комплексного использования минеральных отходов», «Лаборатория пылеулавливающих аппаратов», «Лаборатория БЖД», «Лаборатория вентиляции и экологии».

Все преподаватели прошли переподготовку и повышение квалификации в области экологии и преподавания экологических дисциплин. Для ведения ряда дисциплин привлечены руководители и ведущие специалисты природоохранных организаций и предприятий города.

Кроме этого даются знания, необходимые для будущего предпринимателя в сфере переработки отходов, что открывает возможности для открытия своего дела еще в стенах вуза. Так, например, студенты разрабатывают и защищают бизнес-планы по определенному направлению переработки отходов.

Обучение ведется под патронажем Кузбасской Ассоциации переработчиков отходов, специализированных отходоперерабатывающих предприятий и проектных экологических компаний, с которыми заключены договора о сотрудничестве.

Программа обучения предусматривает прохождение практики в экологических службах крупных промышленных предприятий (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», «ЕВРАЗруда», ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», ОАО «Кузнецкие ферросплавы», ООО «Недра Сибири», ОАО «Северсталь»), а также на специализированных отходоперерабатывающих предприятиях, с которыми заключены договора о стратегическом сотрудничестве («Экологический региональный центр», «Эколэнд», «Экошина», «Экомаш», СМЦ, СГМК и др.), в государственных и муниципальных природоохранных организациях (Комитет ООСиПР, Управления Росприроднадзора и Роспотребнадзора), в специализированных аналитических лабораториях (Западно-Сибирский испытательный центр, Новокузнецкая государственная метеообсерватория), в проектных и консалтинговых экологических компаниях.

Дипломные проекты студентов всегда направлены на решение актуальных практических проблем предприятий Кузбасса, как образующих, так и

утилизирующих отходы. Нередко темы дипломных работ согласуются непосредственно с предприятиями и наши выпускники после защиты дипломов трудоустраиваются на эти предприятия в качестве специалистов экологических и технических служб. Как правило, более половины выполненных дипломных работ рекомендовано к внедрению или уже внедрено. Наиболее значительными являются следующие дипломные работы:

- Разработка стратегии и технико-экономической модели устойчивого развития Кузбасса.
- Исследование и технико-экономическое обоснование диверсификации экономики Кузбасса путем создания отрасли по переработке отходов.
- Разработка проекта полигона ТБО в Новокузнецком районе.
- Исследование отходов в теле свалки ТБО г. Новокузнецка и разработка проекта пилотной установки для извлечения и тестирования свалочного биогаза.
- Разработка технологии и установки по переработке отходов обогащения железных руд ОАО «Евразруда».
- Разработка технологии и установки по получению экологически чистых топливных брикетов в ООО «Сиберц».
- Исследования и разработка пилотной установки для получения биогаза из органических отходов.
- Исследование и разработка технологии переработки техногенного месторождения на территории шламонакопителя ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».
- Разработка балансовой схемы управления ресурсами горно-металлургического региона на примере Кемеровской области.
- Исследования и разработка математической модели для прогнозирования образования свалочного газа в условиях Сибири.
- Разработка программы комплексной оценки и выбора модели регионального управления ТБО.

Государственная аттестационная комиссия представлена руководителями Комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка (Савина И.Н.), Департамента промышленности Кемеровской области (Громов А.В.), службы охраны окружающей среды ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (Полковникова И.Б.), специализированных отходооперерабатывающих предприятий и др. Председателем ГАК по кафедре ТиВР является руководитель Росприроднадзора по Кемеровской области И.А. Климовская. Лучшие выпускники вместе с дипломами получают рекомендательные письма от членов ГАК, помогающие им найти работу по специальности.

Успешное трудоустройство выпускников обеспечивается благодаря:

1) Организации производственной практики на предприятиях, которые рассматриваются, особенно на старших курсах, как потенциальные работодатели. В результате, около 50 % выпускников по окончании вуза трудоустраиваются на предприятия, где проходили производственную или преддипломную практику.

2) Сотрудничеству с Кузбасской Ассоциацией переработчиков отходов, региональными и местными властями по созданию условий для развития отходоперерабатывающих предприятий, где создаются новые рабочие места;

3) Тесной совместной работе студентов разных курсов в созданном в «Студенческий экологический отряд ЭКОС», нередко выпускники прошлых лет находят работу для еще обучающихся студентов;

4) Постоянной обратной связи с выпускниками, которые, трудоустроившись сами по специальности, сообщают на кафедру о ставших известных им вакансиях.

В результате количество выпускников, направленных на работу таким образом, достигло в 2012 г. 63 %. При этом число выпускников, работающих по профилю подготовки, составило по кафедре ТиВР 88 %. В 2012 г. количество заявок на трудоустройство превысило количество выпускников.

Выпускники экологических специальностей нашего университета трудятся в Администрации Кемеровской области и г. Новокузнецка, Управлении Росприроднадзора по Кемеровской области, на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», ОАО «Кузнецкие ферросплавы», ОАО «Южный Кузбасс», ОАО «Газпромнефть Кузбасс», ОАО «Кузбассразрезуголь», ООО «Сибэнергоуголь», ООО «Новокузнецкий вагоностроительный завод», ООО «Экологический региональный центр», ЗАО «Сибирская консалтинговая компания», Кузнецкая проектная компания и др.

Дополнительное профессиональное экологическое образование (рисунок 3)



Рисунок 3 – Структура и содержание дополнительного профессионального экологического образования

С одной стороны требования совершенствующегося российского экологического законодательства, с другой потребности развивающегося рынка труда в специалистах высокого уровня профессиональных знаний в области

экологической безопасности, способствовали созданию в 2010г. совместно с факультетом дополнительного профессионального образования учебного центра «Экологическая безопасность». Основными задачами Центра являются: переподготовка специалистов, включая выпускников университетов, с целью получения нового дополнительного профессионального образования в области экологии и природопользования; подготовка, организация аттестации и проверка знаний требований экологической безопасности руководителей и специалистов предприятий в области охраны окружающей среды, экологической безопасности и обращения с отходами. С 2013г. дополнительная профессиональная подготовка осуществляется через Институт дополнительного профессионального образования.

В настоящее время осуществляется дополнительная (к высшему или среднетехническому) профессиональная переподготовка по следующим программам:

- «Эколог в области профессиональной деятельности (металлургия)» (1600 часов) – рассчитано на подготовку управленческих кадров в сфере природопользования и природоохранной деятельности.
- «Экология и рациональное природопользование» (520 часов) – направлено на профессиональную переподготовку специалистов для осуществления нового вида профессиональной деятельности в сфере природопользования, экологической безопасности и охраны окружающей среды (очно-заочное).

Курсы повышения квалификации в области экологической безопасности направлены на подготовку и аттестацию руководителей и специалистов предприятий по 4 программам:

- «Обеспечение экологической безопасности руководителями и специалистами общехозяйственных систем управления» (72 час.).
- «Обеспечение экологической безопасности руководителями и специалистами экологических служб и систем экологического контроля» (90 час.).
- «Обеспечение экологической безопасности при работах в области обращения с опасными отходами» (120 час).
- «Профессиональная подготовка лиц на право работы с отходами 1-4 классов опасности» (112 час.)

За период 2011-2013 гг. курсы повышения квалификации прошли 372 слушателя из 85 организаций Кемеровской области, Читы, Улан-Удэ, Нерюнгри. По программам переподготовки обучено 60 чел. из различных городов Кемеровской области, а также Липецкой и Оренбургской областей, Красноярского края, Пензы, Владивостока. На курсах повышения квалификации и семинарах повышают свою квалификацию и преподаватели кафедры.

Научно-образовательная и внедренческая деятельность (рисунок 4)

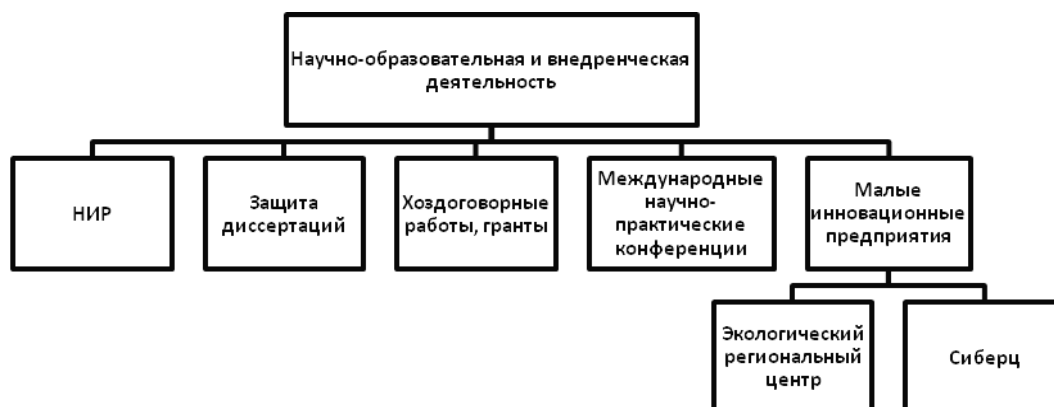


Рисунок 4 – Структура научно-образовательной и внедренческой деятельности

Научно-внедренческая деятельность является одним из приоритетов СибГИУ. В университете развиваются следующие научные направления в области экологии и управления отходами:

- теоретические основы ресурсосберегающих и экологически безопасных процессов комплексной переработки минерального сырья и отходов (научная школа «Развитие теории и разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий производства черных металлов с использованием техногенных отходов», рук. проф. Е.В. Протопопов);
- развитие концепции управления отходами и разработки методологии ее реализации на промышленных предприятиях;
- разработка модели регионального управления отходами;
- разработка технологий переработки отходов производства и получения на их основе инновационных видов продукции;
- разработка новых видов альтернативного топлива на основе отходов;
- исследование закономерностей формирования техногенных месторождений на территории объектов захоронения отходов.

За последние 10 лет защищены диссертации экологического направления:

- Развитие концепции управления отходами и разработка методологии ее реализации на металлургическом предприятии, д.т.н. Е.П. Волынкина;
- Рекультивация техногенно нарушенных земель Южного Кузбасса с использованием нетрадиционных мелиорантов, д.с.-х.н. А.С. Водолеев;
- Исследование и разработка процессов получения безобжиговых композиционных материалов из техногенного сырья, к.т.н. И.В. Гладких;
- Оценка и рациональное использование природных ресурсов для рекультивации почв в горно-таежной зоне Кузбасса, к.б.н. И.С. Семина;
- Постмелиоративное развитие и почвенно-экологическое состояние рекультивированных территорий лесостепной зоны Кузбасса, к.с.н. А.М. Шипилова;

- Разработка ресурсосберегающей технологии использования металлургических шлаков в каталитических процессах очистки выбросов, к.т.н. О.О. Медведская.

Завершается работа над кандидатской диссертацией (соискатель Зоря В.Н.) по теме «Исследование и разработка способов переработки техногенных отходов шламонакопителя металлургического предприятия».

Разработаны и внедрены в производство десятки новых технологий переработки и обезвреживания различных видов отходов, получено свыше 50 патентов на изобретения, опубликовано более 500 научных статей и докладов. Суммарный экономический эффект от внедрения научных разработок в производство составил более 400 млн. руб.

Разработаны и внедрены в производство:

- технологии выплавки чугуна и стали с использованием экологически чистых углей;
- экологически чистые типы топлив для угольных котельных;
- технология переработки измельченных отработанных автомобильных покрышек в смеси с углем на угольных котельных, оборудованных топками прямого хода;
- технология переработки отработанных автомобильных покрышек в кислородных конвертерах;
- технология переработки в кислородных конвертерах горючих компонентов твердых бытовых отходов;
- технология высокотемпературного обезвреживания в кислородных конвертерах отходов лечебно-профилактических учреждений;
- технология производства синтетических легкоплавких флюсов для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства;
- технология рекультивации промышленных отвалов с использованием отходов от очистки сточных вод;
- технология производства металлургических брикетов на основе железо- и углеродсодержащих отходов;
- технология производства экологически чистых топливных брикетов на основе древесных и угольных отходов.

Сотрудниками университета созданы 2 малых инновационных предприятия, осуществляющих экологически направленную практическую деятельность в области переработки и обезвреживания отходов и внедривших собственные научные разработки.

Так, например, в ООО «Экологический региональный центр» (директор проф. Е.П. Волюнкина), созданном в рамках программы «Старт», организовано производство синтетических легкоплавких флюсов для металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства. В настоящее время производство синтетических флюсов осуществляется предприятием непосредственно на полигоне промотходов НКАЗ. ООО «Экологический региональный центр» широко известен в Кемеровской области, как современ-

ное отходоперерабатывающее предприятие, утилизирующее свыше 100 наименований отходов и производящее на их основе целый ряд новых видов инновационной продукции: синтетические легкоплавкие флюсы, вторичную полимерную гранулу из отходов полиэтилена, декоративную мульчу из древесных отходов, вторичный щебень из строительных отходов и др., обезвреживающее ртутьсодержащие и нефтезагрязненные отходы.

В 2010 г. создано малое вузовское предприятие ООО «Сиберц» (директор ст. препод. А.Е. Аникин), реализующее проект «Создание производства вторичного топлива на основе органосодержащих отходов». В 2011г. предприятие получило грант Губернатора, на средства которого было приобретено оборудование. В 2012г. начато производство древесных брикетов, которые пользуются спросом у потребителей.

В рамках программы международного сотрудничества «Глобальная метановая инициатива» (GMI) при поддержке Администрации г. Новокузнецка и Агентства по защите окружающей среды США (EPA) реализован первый в СФО проект по созданию пилотной установки по извлечению свалочного биогаза на закрытой в 2009 г. городской свалке ТБО. Проект реализован совместно с компанией SCS Engineers (США), НТЦ «Биомасса» при Институте технической теплофизики НАН Украины и Администрацией г. Новокузнецка. В рамках проекта была создана общественная библиотека и Веб-сайт, где размещены электронные ресурсы на русском и английском языках в области современных методов проектирования и эксплуатации полигонов ТБО, включая методы и технологии извлечения и утилизации свалочного биогаза. Разработана технология и создана пилотная установка, включающая 3 скважины глубиной 9–10 м, систему очистки газа от конденсата, компрессор, измерительную систему и факельную установку. Проведены полевые исследования, включая тестовые измерения состава, температуры, давления и расхода биогаза, исследованы свалочные грунты на глубину до 10 м, выполнены прогнозные расчеты выделения биогаза на период до 2030г. с использованием известных математических моделей, разработана математическая модель для прогнозирования образования и извлечения свалочного биогаза с территории закрытых свалок, разработано технико-экономическое обоснование организации промышленного извлечения и утилизации биогаза путем частичной замены природного газа на цементном заводе и получения электроэнергии. Реализация полномасштабной системы дегазации свалки обеспечит прекращение пожаров на свалке, утилизацию свалочного биогаза в период с 2013 по 2035 гг. в количестве от 9 до 2,6 млн. м³ в год, снижение выбросов парниковых газов в пересчете на СО₂ от 60 до 17 тыс. т в год, доход от продажи углеродных квот в размере от 36,5 до 10,3 млн. руб. в год.

С 2005 г. (2005, 2008, 2010, 2012 гг.) в СибГИУ проводится Международная научно-практическая конференция «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе». Конференция является значимым событием не только для Кузбасса, но и вызывает большой интерес среди других российских регионов. В рамках конференций проведены:

- круглые столы «Проблемы формирования рынка продукции и услуг в сфере управления отходами», «Проблемы и перспективы развития отходов перерабатывающей отрасли в Кузбассе»;
- городской конкурс научно-исследовательских работ студентов и учащихся старших классов «Экологичный город»;
- семинары «Экологически безопасное захоронение бытовых отходов и утилизация биогаза», организованные совместно с Агентством по защите окружающей среды США.

Издано 4 сборника докладов, каждый из которых включает 50-70 докладов.

В конференциях участвует, как правило, свыше 200 чел., включая представителей исполнительной и законодательной власти Кемеровской области и практически из всех городов и районов региона, ученых, аспирантов и студентов из Новокузнецка, Кемерово, Барнаула, Томска, Новосибирска, Москвы, Санкт-Петербурга, Абакана, Красноярска, Ульяновска, руководителей специализированных отходов перерабатывающих предприятий из Новокузнецка, Кемерово, Ленинск-Кузнецкого, Барнаула, представители промышленных предприятий, научно-исследовательских и проектных организаций, Росприроднадзора, Роспотребнадзора, руководители полигонов ТБО, специалисты из Польши, США и Украины.

В 2013 году в СибГИУ совместно с Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН проведена Международная научная конференция «Природно-техногенные комплексы: рекультивация и устойчивое функционирование».

Международное сотрудничество позволило повысить квалификацию преподавателей и аспирантов, пересмотреть программы и лекционные курсы с учетом полученного опыта от зарубежных партнеров, что положительно влияет на качество подготовки выпускников.

Внеучебная и эколого-просветительская деятельность (рисунок 5)

Большое значение в СибГИУ придается участию преподавателей и студентов-будущих экологов в экологическом просвещении широких слоев населения.

Сотрудники специализированных кафедр университета ведут активную общественную деятельность в области экологического просвещения и пропаганды грамотного управления отходами, входят в состав Общественных экологических Советов при Главе г. Новокузнецка и Управлении Росприроднадзора по Кемеровской области.

Преподавателями университета 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», «20 советов, как остановить мусорное нашествие», «Не жгите мусор и опавшую листву», «Как самому сделать компостный ящик», календари, плакаты, листовки.

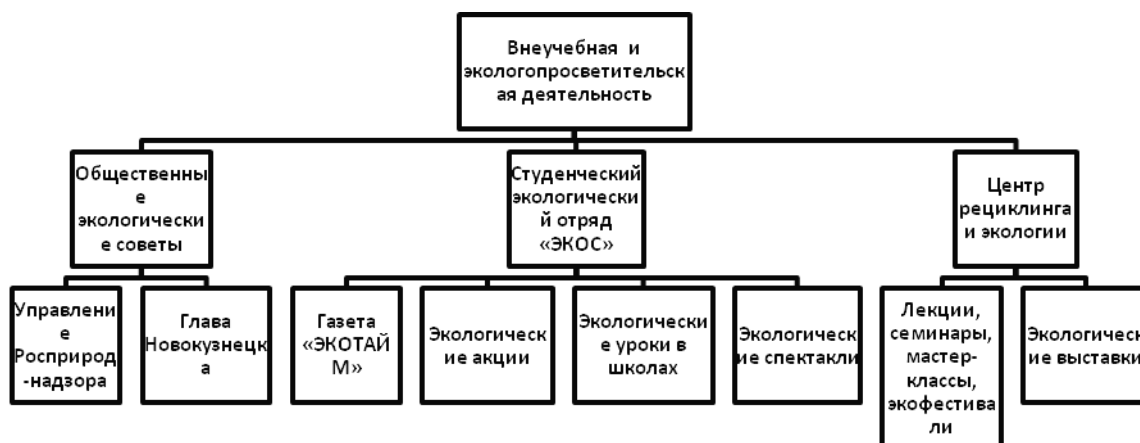


Рисунок 5 – Структура и содержание внеучебной и эколого-просветительской деятельности

Студенты-экологи всех курсов – с первого по пятый – объединены в студенческий экологический отряд «ЭКОС», созданный в 2005 г. ЭКОС – это общественное объединение будущих экологов с целью осуществления уже в период студенчества просветительской и практической деятельности в сфере охраны окружающей среды и управления отходами. Девиз ЭКОСа – «Кто, если не мы». Деятельность «ЭКОСа» широко известна не только в г. Новокузнецке и Кемеровской области, но и в других регионах России.

Известной в России является студенческая газета «ЭКОТАЙМ», что означает экологичное время. Каждый номер газеты посвящен отдельной теме, например «ЭКОдом», «Упаковка», «Зеленый офис», «Обращение с опасными отходами» и др. «Экотайм» является участником профессиональных журналистских конкурсов и лауреатом премии Кузбасса. Она распространяется не только в университете, но и в школах, на городских предприятиях и в организациях. Для эффективного распространения и привлечения внимания к актуальным темам, освещаемым в газете, студенты используют флэш-моб, которые проводят в университете, на улицах города, в городских парках и скверах.

Разные поколения активистов ЭКОСа реализовали множество проектов: «БУМ» и «ПластиБУМ» по разделному сбору отходов, Экологичная аллея, провели экологический слет кузнецких инициативных молодежных организаций «Эскимо», в котором приняли участие свыше 500 студентов, школьников и молодых сотрудников городских предприятий и организаций, экологическое шоу «Гарболог», «Марш парков» и др. Организовали и провели конкурсы «Лучший бумагер», городской конкурс «Город будущего своими руками», включающий конкурс граффити на экологические темы, в котором приняли участие около 100 школьников и студентов, организовали передвижную выставку детских рисунков, посвященных экологическим проблемам. И, конечно, многочисленные акции по уборке мусора.

Наши студенты первыми в Новокузнецке начали проводить уборку мусора в городских парках и скверах с организацией и пропагандой разделного

сбора. А сейчас такие акции стали уже привычными для горожан, потому что наши выпускники организуют их и на своих предприятиях и в рамках городских акций «Сделаем», так как работают и в Комитете охраны окружающей среды г. Новокузнецка. В 2013 г. реализован проект «Уютный город своими руками», победивший в конкурсе «Студенческие инициативы». Студенты активно работают с жителями г. Новокузнецка по пропаганде и обучению раздельному сбору мусора: в 2011 г. – в рамках городского проекта «Умный город», в этом году совместно с Кузбасской Ассоциацией переработчиков отходов в проекте «Собиратор».

Идея создания города нового типа – экологически чистого, биопозитивного, устойчивого, а также воспитание просвещенного общества с высоким уровнем экологической культуры воплощена «ЭКОСом» в проекте «ЭКОсити – город будущего». Студенты написали сценарий с таким названием и с помощью режиссера Е. Речкуновой сделали замечательный, эффектный и не оставляющий никого равнодушным спектакль. В связи с тем, что поколения студентов быстро меняются, сегодня в спектакле участвует уже четвертый состав.

Необходимо отметить важность студенческой инициативы по проведению лекций и практических занятий в школах. Особенно, ребята любят это делать в тех школах, где они учились. Нами разработаны и сами лекции для студентов и интерактивные игры с детьми, обучающие их правилам обращения с отходами.

На Web-сайте СибГИУ студентами создана страничка отряда <http://www.sibsiu.ru/ecology/>, на котором размещается информация о реализованных проектах отряда, экологических новостях, фотоотчеты.

Наиболее активные студенты и аспиранты ежегодно выезжают на Всероссийский студенческий экологический семинар в г. Екатеринбург, являются стипендиатами Фонда им. В.И. Вернадского, губернаторскими стипендиатами.

Студентами подготовлен фотоколлаж для рекламного щита, пропагандирующего раздельный сбор бытовых отходов, который был установлен в г. Новокузнецке.

Благодаря такой деятельности студенты не только интересно проводят свои студенческие годы, но и со студенческой скамьи выполняют свой профессиональный долг, ближе знакомятся между собой, а также со своими будущими коллегами на уровне города, региона и даже России. Закончив университет, они попадают в знакомую среду и продолжают встречаться уже на профессиональном уровне.

Стратегически важное государственное значение имеет создание просветительских центров в области экологии и обращения с отходами, прежде всего в регионах и городах с напряженной экологической обстановкой. В 2012 г. совместно с Администрацией г. Новокузнецка в университете создан городской Центр рециклинга и экологии, главной задачей которого является создание системы непрерывного экологического просвещения горожан. В

Центре представлены созданные и реализованные в г. Новокузнецке и Кемеровской области технологии переработки отходов, образцы вторичной продукции из отходов, информационные и методические материалы в области обращения с отходами, проводятся лекции, семинары, мастер-классы, городские экологические фестивали. Центр является презентационной площадкой для представления широким кругам населения современных экологических технологий в быту, сфере услуг и производственной сфере.

Перспективы развития экологического образования

Целью перспективного развития экологического образования в университете является обеспечение полного цикла образования по всем образовательным программам: бакалавриат, магистратура, аспирантура с возможностью защиты диссертаций в специализированных диссертационных советах.

В настоящее время наши диссертанты защищают диссертации в различных советах, зачастую в других регионах. Вероятно, в условиях современной реформы образования, является целесообразным рассмотрение вопроса об открытии в Кемеровской области специализированного или объединенного диссертационного совета экологической направленности.

С учетом особой значимости экологического образования для нашего региона, значительного и всестороннего опыта нашего университета и других вузов региона, востребованности профессиональных экологов на рынке труда необходимо увеличение бюджетных мест для приема абитуриентов на экологические направления.

Т.А. Михайличенко¹, О.Б. Громова²

¹ ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

² ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет», г. Москва

БЛИЦ-ИГРА КАК ФОРМА ИНТЕРАКТИВНОГО ЗАНЯТИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ

В работе изложена методика проведения практического занятия в интерактивной форме, а именно, в виде блиц-игры. Игра включает как элементы обучения, так и позволяет за короткое время осуществить контроль сформированности профессиональных и некоторых общекультурных компетенций.

The work deals with the experience of classes using interactive form, like blitz games. The game includes elements of learning and allows to control the formation of professional and some common cultural competences.

Высшее профессиональное образование в России (ВПО) регламентируется Федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОСами), содержание которых определяется направлением подготовки. Согласно ФГОСам результат образования – общекультурные и профессиональные компетенции, которые раньше в рамках специалитета назывались квалификационными характеристиками. Набор этих компетенций определяется уровнем подготовки (бакалавр, магистр) и направлением подготовки.

Одной из главных особенностей новых ФГОСов является огромная роль самостоятельной работы студентов (СРС) в процессе обучения. При этом преподаватель должен не только подготовить методическое сопровождение всего цикла СРС дисциплины, но и обеспечить контроль качества усвоения материала на всех этапах обучения (рубежный, текущий и промежуточный) [1]. В связи с этим перед преподавателями высшей школы в современных условиях стоит задача разработки механизмов эффективного и оперативного тестирования. Известно, что все попытки улучшить образование, не подтвержденные действенной реформой системы проверки знаний, не приносят, как правило, желаемых результатов [2]. Одной из альтернатив традиционным методам контроля знаний является проведение занятий в интерактивной форме, например, в форме блиц-игры. Ниже излагается опыт использования блиц-игр как интерактивной формы проведения контролирующего и несущего элементы обучения практического занятия.

На этапе подготовки лектор (или преподаватель, ведущий практические занятия по дисциплине) выбирает тему занятия, определяет глоссарий, выбирает конкретную форму интерактивного занятия, которая может быть эффективной для работы по данной теме в данной группе с целью достижения поставленных целей.

При разработке структуры занятия необходимо учесть связь темы занятия с будущей специальностью, форму проведения занятия, временные рамки, мотивацию студентов, цель занятия, методическое обеспечение. Должен быть продуман алгоритм действий преподавателя, подготовлены соответствующие раздаточные материалы, а студенты должны подготовиться к занятию. Последним выдается задание для составления глоссария по теме занятия.

В качестве примера рассмотрим порядок проведения практического занятия на тему: «Термодинамический цикл Ренкина – основа работы паросиловой установки». Этот элемент дидактической единицы учебных планов важен для ряда технических направлений подготовки, т. к. паросиловые установки являются до настоящего времени основой теплофикации России, и эта тема напрямую связана с актуальной проблемой энергосбережения.

Занятие предлагается проводить в виде блиц-игры, основным достоинством которой в данном случае является оперативность и результативность: за сравнительно небольшое время (при ответственном отношении студентов к подготовке к занятию это время составляет 20-30 минут) можно осуществить контроль знаний принципа работы паросиловой установки и оценить сформированность у студентов профессиональных и выборочно некоторых общекультурных компетенций.

Целью данного занятия является выявление основополагающих знаний по термодинамическим циклам, в частности, циклу Ренкина, что, в свою очередь, предполагает знание основ термодинамики водяного пара. Оценка этих знаний позволяет судить о сформированности профессиональных компетенций (на первом уровне усвоения знаний). Другая цель занятия – попытка сформировать у студентов некоторые общекультурные компетенции, такие, как умение работать в команде, умение убеждать и быть убедительным, систематизировать и оценивать результаты работы в команде и др.

Раздаточный материал – контрольные таблицы для заполнения их каждым студентом. Задача студентов – в условиях ограниченного времени расположить процессы, протекающие в паросиловой установке, в нужной последовательности, что будет свидетельствовать о понимании сути процессов, составляющих термодинамический цикл Ренкина. Форма таблицы представлена ниже, таблица 1. Строки таблицы – термодинамические (и нетермодинамические) процессы в паросиловой установке. Столбцы (слева направо): индивидуальная оценка, командная (групповая) оценка, оценка эксперта, индивидуальная ошибка, командная ошибка.

В начале занятия студентам сообщается тема и цели занятия. Преподаватель информирует студентов о временных условиях, правилах работы в

группе: активность, доброжелательность, уважительное отношение к мнению товарищей, заинтересованность, креативность и т. д.

Таблица 1 – Блиц-игра «Работа паросиловой установки»

Укажите последовательность процессов, происходящих в паросиловой установке	Инд. оценка	Ком. оценка	Эксп. оценка	Инд. ошиб.	Ком. ошиб.
Парообразование в котле					
Адиабатное расширение пара в турбине					
Подача конденсата в питательный бак с помощью конденсационного насоса					
Перегрев пара в пароперегревателе					
Нагрев воды в котле до t кипения					
Повышение давления конденсата при работе питательного насоса					
Подача воды в котел					
Конденсация пара в конденсаторе					
Итого:					

На этом этапе занятия преподаватель должен убедиться в однозначном понимании студентами терминов и понятий. Для этого с помощью вопросов и ответов следует уточнить терминологическое поле изучаемой темы, ее понятийный аппарат.

Здесь возможны два сценария:

- Студенты не выполнили задание по составлению глоссария (или его выполнили не все студенты). В этом случае с помощью вопросов и ответов все-таки следует уточнить основные термины и понятия изучаемой темы.
- В случае выполнения студентами задания кто-то из них зачитывает свои термины и определения, при этом остальные корректируют свои записи. На этом этапе выявляются «победители» - студенты, записавшие наибольшее количество терминов, или записавшие термины, не отмеченные другими студентами и др.

Систематическое уточнение понятийного аппарата сформирует у студентов привычку оперировать только общепринятыми терминами, не употреблять малопонятные слова и систематически пользоваться справочной литературой.

Особенности основной части занятия полностью определяются выбранной формой интерактивного занятия (в данном случае – это блиц-игра).

Этапы достижения поставленных целей описаны в таблице 2 и ниже.

На этапах 1, 2 преподаватель должен исключить всякую коммуникацию между студентами и Интернетом (можно разместить их по одному человеку на парте и т. д.).

На этапах 3, 4 производится сегментация аудитории по желанию участников – формируются команды (в зависимости от количества участников игры по 3-5 человек) и организация коммуникации между членами каждой команды.

Таблица 2 – Алгоритм действий преподавателя и студентов

Этапы	Преподаватель	Студенты	Время, мин
1	Предлагает студентам ознакомиться с содержанием таблицы 1 и поясняет порядок заполнения графы «Индивидуальная оценка»	Знакомятся	2-3
2	Предлагает студентам заполнить графу «Индивидуальная оценка»	Заполняют	5-7
3	Предлагает студентам разбиться на группы	Составляют команды	2-3
4	Предлагает командам заполнить графу «Командная оценка»	Обсуждают, принимают командное решение и заполняют	7-10
5	Предлагает студентам заполнить графу «Эксперт», т. е. предлагает правильный вариант ответа	Заполняют	1-2
6	Предлагает студентам заполнить графы «Индивидуальная ошибка» и «Командная ошибка»	Заполняют	3-5
7	Предлагает командам обсудить результаты по предложенной схеме обсуждения. Наблюдает за обсуждением, анализирует и делает выводы	Принимают схему и обсуждают	3-5
8	Предлагает командам изложить результаты обсуждения. По итогам делает вывод и называет команду-победителя.	Выбирают представителя и докладывают	3-5

Перед выполнением 5, 6 этапов преподаватель кратко излагает методику подсчета индивидуальных и командных ошибок.

Перед выполнением 7, 8 этапов преподаватель предлагает при обсуждении результатов ответить на следующие вопросы:

- У кого из членов команды лучший результат и какой?
- У кого из членов команды худший результат и какой?
- Каковы результаты работы команды относительно лучшего и худшего результатов отдельных членов команды?

Рефлексия заканчивается общими выводами, которые делает педагог на основе анализа этапа 7 (см. таблицу 2). Здесь преподаватель должен организовать коммуникации между командами. Этот шаг является особенно эффективным, если занятие проводится с достаточно большой аудиторией. Этот этап требует определенной квалификации преподавателя в области педагогики и психологии обучения, но чрезвычайно эффективен с точки зрения мотивации студентов, т. к. анализируя обсуждение в командах, преподаватель имеет возможность оценить уровень сформированности некоторых общекультурных компетенций у студентов (к сожалению, не у всех, а только у тех, кто проявлял активность в дискуссии). Уровень же профессиональных компетенций по выбранной теме оценивается по столбцу таблицы 1 «Индивидуальная оценка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самостоятельная работа студентов при реализации новых образовательных стандартов / Т.А.Михайличенко, О.Б.Громова // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сборник научных трудов. Вып.30. – Москва-Новокузнецк: ГОУ ВПО «СибГИУ», 2012. – С. 189-192.
2. Аванесов В.С. Композиция тестовых заданий / В.С. Аванесов. – М.: АДЕПТ, 1998. – 217 с.

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ

А.М. Апасов, Ч.В. Едешева

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

БОЛЬШАЯ РУДА БАКЧАРА

Изложены основные исторические условия и причины зарождения Бакчарского железорудного месторождения. Представлен обобщенный процесс появления заводов по переработке железной руды. Приведена острая потребность в строительстве крупнейших предприятий черной металлургии в Сибири для обеспечения жизнедеятельности населяющих народностей, и создания мощной производственной базы на Востоке страны.

The basic historical conditions and cause of conception the Bakchar iron ore deposit was stated. The article introduces the generalized process of formation metallurgical works on remaking iron-stone. It's shown critical necessity on building the big industrial Siberian works of ferrous metallurgy for guaranteeing life the settled nationality and organization great industrial centre in the East of Russia.

Введение

Изменившаяся за последние годы геополитическая ситуация привела к тому, что восточные регионы России обладают в настоящее время основными перерабатывающими мощностями черной металлургии, а европейская часть страны – сырьевой базой для этой отрасли. В частности, на Урале и в Сибири расположены 2/3 металлургических мощностей и только 1/3 запасов железной руды. И наоборот, в европейской части сосредоточены 2/3 разведанных железорудных запасов России (преимущественно Курская магнитная аномалия и северо-запад) и всего 1/3 металлургических мощностей. Это приводит к дополнительным затратам на встречные перевозки руды, передачи энергоресурсов, транспортировки готовой продукции. Одной из причин сложившегося положения является, в частности, неполная оценка ресурсов Бакчарского железорудного месторождения и, как следствие, доставка руды за 2-6 тыс. км.

История открытия

Бакчарское железорудное месторождение является одним из крупнейших месторождений железной руды в России и мире. Оно находится на территории Бакчарского района Томской области в междуречье рек Андорма и Икса (притоки реки Чая) и приурочено к верхнемеловым и палеогеновым отложениям, перекрытым довольно мощной толщей (160-200 м) неоген-четвертичного возраста. Железные руды связаны с несколькими горизонтами:

нарымским, колпашевским, тымским и бакчарским. Мощность продуктивных пластов колеблется от 2 до 40 м. Железорудные горизонты прослеживаются на всей площади месторождения, а также за ее пределами и разделяются слабожелезистыми породами [1].

Месторождение было открыто случайно при разведке нефти в 1960-х годах. Однако рудные горизонты и вышележащие толщи сильно обводнены, поэтому планы разработки месторождения площадью в 16 тыс. км². появились только в начале XXI века. Железорудные образования находятся в трёх горизонтах на глубинах от 190 до 220 метров. Руды аналогичны рудам лотарингского типа, и содержат до 57% железа, а также примеси фосфора, ванадия, палладия, золота (в промышленных концентрациях) и платины. Содержание железа в обогащённой руде составляет 95-97%. Запасы железной руды оцениваются в 28,7 млрд. тонн. Предварительная оценка запасов руды Бакчарского рудного узла составляет 25-30 миллиардов тонн со средним содержанием валового железа в руде 37,5-42,5%. Около 30% запасов находится в рыхлом, сыпучем или полусцементированном состоянии. Бакчарское железорудное месторождение наряду с Васюганским болотом может вполне претендовать на строчку в Книге рекордов Гиннеса.

Начало промышленного освоения Бакчара обязательно повлечет за собой серьезное изменение всех этих пропорций. В более отдаленной перспективе Бакчарское месторождение может послужить отправной точкой отсчета для строительства нескольких металлургических комбинатов нового поколения, что повлечет за собой уже не только географический, но и экономический передел рынка. Запуск производства на Бакчарском месторождении существенно перераспределит расстановку сил на российском металлургическом рынке [2, 3].

Состояние и анализ путей решения проблемы Бакчара

Бакчарское месторождение выглядит весьма конкурентоспособным и более предпочтительным, потому что многие действующие российские рудоуправления, горнообогатительные и металлургические комбинаты обеспечены запасами всего на 10-15 лет. Причем эти запасы рассредоточены на большом количестве мелких и средних месторождений, имеют невысокое содержание железа в руде, а их разработка связана с постоянно растущими глубинами добычи, а, следовательно, и с более высокой себестоимостью. Так обстоит дело и с предлагаемыми к освоению в ближайшие годы резервными месторождениями юга Сибири. В частности, у наших соседей на Алтае: Холзунское месторождение характеризуется сложной местностью и отсутствием инфраструктуры при содержании железа 28,9 процентов; Белорецкое – содержание железа около 31,1 процента, однако пласт руды находится на глубине от 500 до 600 метров; Инское – содержание железа составляет 45,2 процента при сложном рельефе месторождения и глубине залегания порядка 700-1200 метров. Не поражают добытчиков и месторождения юга Красноярского края со сложным строением профиля земной коры, низкими запасами руды, боль-

шими глубинами ее залегания и, следовательно, значительными капитальными затратами на разработку месторождения. На этом фоне Бакчар выглядит более предпочтительнее.

Вышеприведенные данные по запасам железной руды и попутным компонентам Бакчарского месторождения, его возможностям с учетом сложившейся ситуации на рынке продукции черной металлургии, предоставляют Томской области редчайший исторический шанс быть не только географическим, но и геополитическим центром России. А как утверждают некоторые специалисты, возможно, и в мире. Именно Томск является отправным пунктом дальнейшего развития на восток и на юг (Алтай-Урумчи) крупной мировой системы газопроводов с участием томских дочерних предприятий «Газпрома» – «Томсктрансгаза» и авторов-инициаторов «алтайского» варианта «Востокгазпрома». Именно многочисленные томские проектные и строительно-монтажные предприятия существующей нефтегазовой структуры будут одними из исполнителей по строительству гигантского нефтепровода. В том числе томские новые предприятия и принципиально новые направления промышленности в области металлургии, трубопрокатного производства по новым современным мировым технологиям могут и должны оказаться в центре этих мегапроектов.

Полноценная эксплуатация Бакчарского месторождения, в лучшем случае, начнется лет через десять. Из них три года уйдет на доразведку, еще полтора-два – на привлечение недропользователя. Как минимум пять лет понадобится на организацию производства и строительство необходимой инфраструктуры. Таким образом, сталь из Бакчарской руды начнут выплавлять в 2022 году. Поэтому в районе месторождения может быть создан целый добывающий комплекс, который сможет извлекать из недр не только железо, но и редкие элементы таблицы Менделеева, например, цирконий.

В конце 2014 года извлекаемые запасы месторождения должны быть поставлены на баланс. Затем Роснедра объявят аукцион по передаче в недропользование лицензионных участков для доразведки и добычи сырья. Бакчарский узел через 10-15 лет способен превратиться в основного поставщика металлического концентрата и металлопроката на востоке России, а также для Китая, Кореи, Японии. Предприятие и весь проект назвали «Бакчарская сталь».

Тем не менее на сайте корпорации «Металлы Восточной Сибири» указано, что еще в сентябре 2008 года ООО «Бакчарская сталь» получила лицензию с целевым назначением на геологическое изучение и добычу железной руды на Польшинском участке недр Бакчарского железорудного поля. Участок расположен в 200 км к северо-западу от Томска в Бакчарском районе, а его площадь составляет 37,5 кв. км. Как утверждает на сайте, на участке бурятся поисковые и оценочные скважины. При этом, как утверждает, разработка месторождения приведет к формированию совершенно нового промышленного района и будет во многом определять дальнейшие перспективы социально-экономического развития Томской области.

В этих условиях власти Томской области ищут инвесторов за рубежом. Недавно стало известно, что администрация региона и крупная индийская сталелитейная корпорация Concast Exim начали переговоры и процедуру подписания меморандума о сотрудничестве. В качестве предполагаемого стороннего инвестора на разведку железосодержащего участка рассматривается индийская Concast Group.

С самого начала Бакчарского проекта Томская область определила для себя цель, которая заключалась не только в простой добыче руды, обогащении ее и переработке, но и в доведении ее до состояния конечного продукта для металлургии и металлопроката. 38-40 % железа в руде – это очень хороший результат. Ведь в нашей стране осваиваются железорудные месторождения с содержанием железа в руде порядка 17-18 % (например, Качканарский ГОК) [4]. И они, тем не менее, считаются рентабельными. А в бакчарской руде железа в два раза больше. Участок размерами всего пять на семь с половиной километров содержит около трех миллиардов тонн в пересчете на чистое железо. Это значительно выше суммарных запасов более 15 месторождений, обеспечивающих сырьем Западно-Сибирский металлургический комбинат.

Согласно предварительным расчетам, проект освоения месторождения и строительства перерабатывающей металлургической, трубопрокатной и энергетической инфраструктуры характеризуется очень существенными начальными инвестициями, при высокой рентабельности и относительно быстрой окупаемости. При формировании добывающих и перерабатывающих мощностей будет принята модульная технология. Это позволит уже через 2-3 года получать товарный продукт в виде концентрата или слитков металла и обеспечивать быстрый возврат вкладываемых инвестиций. Начальные инвестиции для различных стадий разработки и объектов обустройства в зависимости от участков колеблются от 175 млн. долларов до 1,250 млрд. долларов.

Энергетическая политика России ближайшей четверти века предусматривает одновременно с ростом поставок энергоносителей в страны Запада и Восточной Европы выход на энергетические рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) – Китая, Японии, Кореи. Это связано с формированием протяженной трубопроводной системы трансазиатского направления, измеряемого десятками тысяч километров. В первую очередь, это известные и представленные на Российско-Германском саммите в Томске нефтегазопроводы Восточная Сибирь – Тихий океан, а также два главных варианта российско-китайских газопроводов: Западный (Алтай) и Восточный (Ковыкта). Естественно, запуск транснациональных трубопроводов потребует строительства многочисленных внутренних трубопроводов, связанных с освоением новых газовых и нефтяных месторождений в Западной Сибири. Одновременно с внешними поставками газа на юго-восточный рынок предусматривается также газификация восточных регионов России, что связано с развитием сетей высокого и низкого давления. С учетом очень низкой степени развития трубопрокатного производства на востоке России возможность разработки Бакчарского комплекса приобретает геополитическое значение.

Начавшееся геологическое изучение Бакcharского железорудного месторождения предусматривает после государственной экспертизы запасов руды начало промышленной эксплуатации с дальнейшим выходом на полноценную промышленную разработку и добычу от 30-50 до 90-100 млн. т сырой руды ежегодно. Одновременно с добычей руды, ее обогащением и поставками незначительной части концентрата на ближайшие металлургические комбинаты Урала и Сибири (ММК, КМК, ЗСМК) основную часть добываемой и перерабатываемой руды предполагается использовать на месте. Специалистами Томской горнодобывающей компании («Том ГДК руда») (недропользователя основного, Восточного, участка) совместно с администрацией области и проектных специализированных институтов начата подготовка и проектирование добывающего производства, перерабатывающего горно-обогажительного комбината (ГОК), горно-металлургического комбината (ГМК), а также трубопрокатного завода (ТПЗ). С учетом наличия практически неограниченной сырьевой базы железной руды и необходимых легирующих компонентов в ней этот комплекс не имеет никакой альтернативы.

Направления развития качественной металлургии Сибири и Дальнего Востока

С учетом вышеизложенного следует отметить, что впервые создается уникальная возможность строительства в центре России единственного в стране (и, пожалуй, в мире) комбината по производству металлов и сплавов особого качества методами рафинирующего переплава, а также синтеза сверхчистых металлов методами глубокой очистки, в частности, таких сопутствующих элементов, как цирконий и ванадий.

Методы, применяемые для глубокой очистки веществ, разнообразны. Выбор метода определяется свойствами очищаемого металла и природой отделяемых примесей. Характерной особенностью применяемых в настоящее время методов глубокой очистки является то, что все они основаны на использовании различия в химических или физико-химических свойствах разделяемых металлов, т.е. в свойствах, обусловленных главным образом строением электронных оболочек атомов или молекул разделяемых металлов. При этом актуальность проводимых в настоящее время комплексных исследований в области получения особо чистых металлов продолжает оставаться незыблемой. Это объясняется тем, что:

- высоко чистые металлы – это «особое» фазовое состояние вещества, находящегося в экстремальных условиях, при котором кардинально изменяется поведение известных свойств и выявляются новые, ранее «завуалированные» примесными и структурными дефектами;
- кроме прямого практического применения, например, в микроэлектронике, атомной энергетике, специальном машиностроении и других областях, высокочистые металлы являются незаменимыми объектами для разработки теории и практики синтеза новых материалов с заданными

свойствами. Как известно, технологии подобного высшего класса прецизионности называются нанотехнологиями.

Для повышения эффективности очистки металлов на комбинате предполагается внедрить новейшие технологии, заключающиеся в последовательном использовании ряда методов рафинирования, имеющих различные механизмы разделения примесей, в частности:

- вакуумная дистилляция, в т. ч. с конденсацией пара на колонку с градиентом температуры в замкнутом объеме, прогрев и перегонка металла в одном цикле рафинирования и их сочетание в определенной последовательности;
- плавка и зонная перекристаллизация в сверхвысоком вакууме и контролируемых (активных) средах с применением электронно-лучевого нагрева;
- зонная плавка (ЗП) в сочетании с электропереносом;
- различные сочетания вышеперечисленных методов.

Чтобы повышать надежность и долговечность машин и сооружений при понижении их металлоемкости и трудоемкости изготовления, необходимо расширять на комбинате масштабы производства специальных сталей и сплавов особого качества. При этом используются процессы вакуумного дугового переплава (ВДП) в охлаждаемой изложнице, электрошлакового переплава (ЭШП) расходоуемых электродов, электронно-лучевого переплава (ЭЛП) и плазменно-дугового переплава (ПДП) металла в охлаждаемых изложницах (кристаллизаторах).

Высокая эффективность перечисленных процессов определяется прежде всего тем, что их применение наиболее полно позволяет решать задачу получения слитка с минимальной химической, физической и структурной неоднородностью, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность и долговечность изделий самого ответственного назначения. Последнее в значительной мере обусловлено достигаемым в этих процессах повышением чистоты металла. Однако определяющим преимуществом процессов рафинируемого переплава все же являются благоприятные условия формирования качественного слитка различного развеса (массой от нескольких килограммов до сотни тонн) [5]. Эта продукция будущего крупнейшего Сибирского металлургического комбината по производству металлов и сплавов особого качества будет направлена, в первую очередь, на решение одной из важнейших стратегических задач – дальнейшего развития действующих в регионах Сибири и Дальнего Востока многочисленных предприятий атомной отрасли, тяжелого и транспортного машиностроения, специального судостроения, авиационной и космической техники.

Программа реализации Бакчарского горно-металлургического комплекса

Создание и функционирование Бакчарского горно-металлургического комплекса в составе вышеперечисленных объектов, а также с учетом естественного появления города-спутника численностью от 250 до 500 тысяч человек, потребует формирования собственного источника электрической и

тепловой энергии, практически равной ныне существующим энергетическим мощностям всей Томской области. Особенность Бакчарского железорудного месторождения состоит еще и в том, что совершенно рядом находятся гигантские залежи бурого угля. В Германии имеются точно такие же бурые угли. Немцы уже заинтересовались нашими бурыми углями.

Для того, чтобы ГОК ставить, нужна электроэнергия. Из-за достигнутых высоких тарифов на электроэнергию и общему ее дефициту на рынке Томской области инициаторы Бакчарского проекта предусматривают проектирование и строительство автономного энергетического комплекса мощностью 750-1000 МВт с использованием местного сырья: бурого угля, торфа и продуктов их переработки, в частности: полукокса, кокса, пылевидного топлива на основе каменного угля. Это сырье будет использоваться и в металлургическом производстве. Для реализации этого проекта должен быть привлечен крупный инвестор, который в дальнейшем способен обеспечить не только высокотехнологичную добычу, строительство ГОКа и электростанции, но и комплексно использовать попутное сырье, в частности, мергель, фосфор, ванадий и цирконий.

В наиболее полном объеме программа реализации предлагаемого горно-металлургического комплекса вместе с необходимой инфраструктурой отражена в Распоряжении Правительства Российской Федерации от 5 июля 2010 г. № 1120-р, г. Москва «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Сибири до 2020 года» [6].

В рамках данной Программы основные направления, механизмы и инструменты достижения стратегических целей по сооружению и развитию Бакчарского горно-металлургического комплекса на период до 2020 года заключаются в следующем.

В Стратегии понятие «Сибирь» включает в себя территории 12 субъектов Российской Федерации, входящих в состав Сибирского федерального округа, – Республики Алтай, Республики Бурятия, Республики Тыва и Республики Хакасия, Алтайского, Забайкальского и Красноярского краев, Иркутской, Кемеровской, Новосибирской, Омской и Томской областей. Основные положения Стратегии представлены с учетом географического деления Сибири на следующие 3 пояса развития:

- Арктический пояс развития, включающий в себя север Красноярского края с прилегающими островами и акваториями;
- Северный пояс развития, включающий в себя Средний Иртыш (север Омской области), Среднее Приобье (север Томской области), центральные районы Красноярского края (территория между реками Ангара и Нижняя Тунгуска), север Иркутской области, зону Байкало-Амурской магистрали (БАМ) в Забайкальском крае, север Республики Бурятия;
- Южный пояс развития, включающий в себя центральные и южные районы Омской и Иркутской областей, Республики Бурятия, южные районы Томской области, Забайкальского и Красноярского краев, Алтайский

край, Новосибирскую и Кемеровскую области, Республику Алтай, Республику Тыва и Республику Хакасия.

Бакчарский горно-металлургический комплекс располагается на территории Томской области. Стратегической целью развития Томской области является обеспечение устойчивого повышения уровня и качества жизни населения на основе сбалансированной социально-экономической системы инновационного типа, гарантирующей национальную безопасность, динамичное развитие экономики и реализацию стратегических интересов России в мировом сообществе. Ведущие отрасли промышленности Томской области – топливная промышленность, цветная металлургия, химическая и нефтехимическая промышленность, машиностроение и металлообработка, электроэнергетика, лесная, деревообрабатывающая и пищевая промышленность. Основными стратегическими приоритетами социально-экономического развития Томской области в 2010 - 2020 годах будут являться дальнейшее освоение природных ресурсов (углеводороды, железная руда, лес и т.д.) и развитие соответствующих добывающих и перерабатывающих производственных комплексов (нефтегазодобывающего, металлургического, лесопромышленного) на севере Томской области, развитие инновационных производств и научно-образовательного комплекса.

Развитие Томской области связано с созданием нефтегазодобывающего комплекса (правобережье р. Оби), освоением запасов деловой древесины северных районов Томской области и освоением Бакчарского железорудного месторождения. Реализация проекта по освоению правобережья р. Оби приведет к появлению нового высокоперспективного объекта для развития нефтегазодобывающего сектора Томской области, что также потребует дополнительного развития нефте- и газопроводного транспорта.

Разработка Бакчарского месторождения предполагает создание современного металлургического комплекса, работающего полностью на местном сырье и производящего 7 - 10 млн. тонн готовой продукции (металлоизделий) широкого номенклатурного спектра, который станет основой формирования нового сектора экономики Томской области. Переход к новым технологическим схемам в черной и цветной металлургии не только увеличит технико-экономические показатели металлургии до мирового уровня, но и позволит полностью обеспечить современной металлопродукцией потребности железнодорожного транспорта, электроэнергетики, нефтяной и газовой промышленности, а также увеличить эффективность экспорта Сибири. Основными рынками сбыта для томского металлургического комплекса (как для проката и слэбов, так и для концентрата) станут восток России, Китай, Корея и Япония.

Индустриальному развитию будет способствовать развитие транспортной инфраструктуры, включая участок северной широтной автодороги Нижневартовск – Томск, сеть специализированных дорог, внутренние водные пути и авиационные маршруты. Основу индустриального развития Северо-Томской зоны составят ресурсы Бакчарского месторождения, являющегося самым крупным в России и мире железорудным бассейном.

Выводы

На основе анализа проведенного исследования установлено, что:

1. Освоение Бакcharского железорудного месторождения существенно перераспределит расстановку сил на российском металлургическом рынке.

2. Разработка Бакcharского месторождения предполагает создание крупнейшего современного металлургического комплекса, работающего полностью на местном сырье, который станет основой формирования совершенно нового сектора экономики Томской области. Основными рынками сбыта продукции томского металлургического комплекса (проката и слябов, концентрата, металлов и сплавов особого качества) станут центр и восток России, Китай, Корея и Япония.

3. Значимость созданного Бакcharского современного металлургического комплекса в будущем будет состоять в:

- обеспечении устойчивого развития экономики Томской области, Сибири, Дальнего Востока;
- ускоренном социальном развитии сибирских регионов;
- развитии энергетической инфраструктуры, новой схемы железных и автодорог, частичном восстановлении и оптимизации водного и воздушного транспорта. Это обеспечит цивилизованное проживание населения, а также жизнедеятельность коренных народностей на данных территориях;
- сохранении территориальной целостности Российского государства.

Все это входит в разряд стратегических приоритетов обеспечения национальной безопасности России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаева И.В. Бакcharское месторождение оолитовых железных руд / И.В. Николаева. - Новосибирск: АН СССР. - 1967. - 129 с.

2. Евсеева Н.С. География Томской области. (Природные условия и ресурсы). - Томск, 2001, С. 205-206.

3. Морозова Т.Г. Экономическая география России. - М.:ИНФРА-М, 2003. - 354 с.

4. Бабин А.А., Бабина Е.А. Колпашевско-Бакcharский район Западно-Сибирского бассейна // Материалы по геологии Западно-Сибирской низменности. - 1962. - № 3. - С. 131-152.

5. Апасов А.М. Специальная электрометаллургия: учебник / А.М. Апасов; Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета. - 2-е изд. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. - 286 с.

6. <http://www-sbras.nsc.ru/win/anons/1689/10/str-razv-sib.pdf> стратегия социально-экономического развития Сибири до 2020 года.

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 транскрипция, 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 подрисуночные 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 «Издательская деятельность».

Срок представления материалов для следующего выпуска «Вестника горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» – до 1 июня 2014 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 Темлянцев Е.Н.

Подписано в печать 20.12.2013 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 11,6 Уч.-изд.л. 12,4 Тираж 300 экз. Заказ № 75

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ