

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего 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 38

Москва
Новокузнецк
2017

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. 38 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2017 – 230 с., ил.

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

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

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

Ил. 45, табл. 28, библиогр. назв. 222.

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; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянцев М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «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, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ
АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Базайкин В.И.	д-р техн. наук, проф., 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., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Дорофеев В.В.	д-р техн. наук, АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Оршанская Е.Г.	д-р пед. наук, проф., СибГИУ, 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

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	8
<i>Чжан Кэ</i>	
Проектно-исследовательский институт цветной металлургии Китая: научно-технологический потенциал, проектирование, строительство, инжиниринг, рециклинг горно-металлургических, энергетических и водохозяйственных объектов	9
<i>И.Н. Ганиев, Дж.Х. Джайлоев, И.Т. Амонов, Н.Р. Эсанов</i>	
Влияния щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде	13
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании	22
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей	30
<i>В.М. Павловец</i>	
Анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования в производстве окатышей, основанном на принудительном зародышеобразовании	37
<i>В.Б. Деев, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева</i>	
Влияние железа на характер кристаллизации, литейные и механические свойства заэвтектического силумина	43
<i>М.В. Темлянец, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго, В.Я. Целлермаер</i>	
Исследование высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окарины	48
<i>А.А. Уманский, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.В. Добрянский</i>	
Совершенствование режимов прокатки острых рельсов на универсальном рельсобалочном стане	55
<i>Е.С. Прусов, В.Б. Деев</i>	
Перспективы применения ультразвука при вводе наночастиц в алюминиевые расплавы	64
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев, С.Н. Кратько, Р.Е. Крюков</i>	
Поиск оптимальных технологических параметров режима работы рельсосварочной машины К1000	70
<i>Р.А. Шевченко, С.Н. Кратько, П.Е. Шишкин, Н.А. Козырев, В.И. Базайкин</i>	
Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов на машине К1000	76
<i>Р.А. Шевченко, В.И. Базайкин, С.Н. Кратько, Н.А. Козырев, А.О. Патрушев</i>	
Анализ токового режима работы сварочной машины К1000 при сварке рельсов на этапе оплавления	81
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	88
<i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония	89
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>	
Исследование механизма плазмосинтеза диборида титана	97

<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова</i>	
Окисление нанокристаллического диборида титана при хранении и нагревании в воздушной среде.....	107
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	117
<i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>	
Расчеты энергии атомных систем в приближении постоянной электронной плотности.....	118
<i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>	
Исследование взаимодействия электронных оболочек атомов с различным набором квантовых чисел	123
<i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>	
Выполнение теоремы Купманса в приближении постоянной электронной плотности.....	128
<i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>	
Расчет корреляционной поправки первого порядка в модели постоянной электронной плотности.....	133
<i>В.Б. Деев, О.Г. Приходько, А.И. Куценко, И.Ф. Селянин</i>	
Расчет корреляционной поправки в движении электронов в поле точечного положительного заряда ядра	142
<i>А.И. Гусев, Н.А. Козырев, Н.В. Кибко, Р.Е. Крюков, И.В. Осетковский</i>	
Свойства металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co.....	147
<i>И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков, М.В. Попова</i>	
Свойства металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W - V и Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V.....	155
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	163
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева, В.С. Александров</i>	
Мировое и отечественное производство алюминия: оценка, тенденции, прогнозы.....	164
<i>Т.А. Михайличенко, А.Г. Гальчун</i>	
Использование возобновляемых биоэнергетических ресурсов в разных странах.....	171
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	175
<i>Д.И. Оршанский, Е.Г. Оршанская</i>	
Личностно ориентированная модель деятельности современного преподавателя	176
<i>Т.Г. Моисеенко</i>	
Формы и методы повышения квалификации учителей.....	182
<i>Е.Г. Оршанская</i>	
Мастер-класс как средство повышения уровня владения иностранным языком	186
<i>Ю.К. Осипов</i>	
Архитектура, образование, проблемы и реальность.....	193
ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ	197
<i>Г.Г. Волокитин</i>	
Рецензия на учебное пособие «Оборудование и технология алюминиевого производства» (Авторы Галевский Г.В., Минцис М.Я., Руднева В.В. – М. : Наука : Флинта, 2017 – 265 с.)	198
<i>Г.Г. Волокитин</i>	
Рецензия на учебное пособие «Технологические и конструктивные измерения и расчеты в производстве алюминия» (Авторы Галевский Г.В., Минцис М.Я., Руднева В.В. – М. : Флинта : Наука, 2017. – 218 с.)	200

<i>Н.В. Немчинова</i>	
Рецензия на монографию «Применение буроугольного полукокса в процессах металлизации и карбидизации техногенного металлургического сырья» (Авторы Аникин А.Е., Галевский Г.В. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – 156 с.)	202
<i>В.В. Лавров</i>	
Рецензия на монографию «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением» авторы (М.В. Филиппова, В.Н. Перетяtko, М.В. Темлянцев. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2016. – 269 с.).....	205
<i>В.В. Дорофеев</i>	
Рецензия на монографию «Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением» авторы (М.В. Филиппова, В.Н. Перетяtko, М.В. Темлянцев. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2016. – 269 с.).....	207
<i>Ф.И. Иванов</i>	
Рецензия на монографию «Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях», авторов В.Е. Громова, С.В. Коновалова, К.В. Аксеновой, Т.Ю. Кобзаревой	209
<i>А.В. Маркидонов</i>	
Рецензия на монографию «Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях», авторов В.Е. Громова, С.В. Коновалова, К.В. Аксеновой, Т.Ю. Кобзаревой	211
<i>А.Н. Смирнов</i>	
Рецензия на серию монографий из двух книг «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» и «Металлография чугуна» авторского коллектива под руководством профессора В.К. Афанасьева	213
<i>В.А. Москинов</i>	
Рецензия на серию монографий из двух книг «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» и «Металлография чугуна» авторского коллектива под руководством профессора В.К. Афанасьева	214
<i>Е.П. Вольнкина</i>	
Рецензия на монографию Л.Б. Павлович, А.В. Салтанова, Н.Ю. Соловьевой «Утилизация отходов в коксохимическом производстве».....	216
<i>Б.И. Ермаченко</i>	
Рецензия на монографию «Новокузнецк. История создания генерального плана города». Автор: В.И. Магель – заслуженный архитектор РФ, профессор кафедры архитектуры СибГИУ.....	218
<i>Г.И. Стороженко</i>	
Рецензия на монографию «Новокузнецк. История создания генерального плана города». Автор: В.И. Магель	220
<i>А.А. Бабенко</i>	
Рецензия на учебное пособие «Энерготехнология твердого топлива» авторы Школлер М.Б., Протопопов Е.В., Юрьев А.Б.....	222
К 65-летию со дня рождения и 40-летию научной и педагогической деятельности Галевского Геннадия Владиславовича	2244
К 65-летию Андрея Ростиславовича Фастыковского.....	2266
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	2288

ПРЕДИСЛОВИЕ

38-й выпуск сборника научных трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» содержит статьи российских ученых, посвященные решению различных научно-технических проблем современной металлургии и материаловедения. Теоретические и прикладные исследования выполнены авторскими коллективами сотрудников Сибирского государственного индустриального университета, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», АО «РУСАЛ Новокузнецк», ООО «Проектно-исследовательский институт цветной металлургии» (Китай), Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, Технологического университета Таджикистана.

В традиционных разделах сборника научных трудов представлены результаты исследований в областях повышения качества железорудного сырья, металлосберегающего нагрева стали, совершенствования режимов прокатки остроголовых рельсов, литейных и механических свойств заэвтектических силуминов, синтеза порошковых материалов в плазменном потоке, оптимизации параметров контактной сварки рельсов.

Редакционная коллегия благодарит авторов за предоставленные материалы и приглашает принять участие в очередном 39-м выпуске сборника научных трудов.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

УДК 629(06)

Чжан Кэ

ООО «Проектно-исследовательский институт цветной металлургии»,
г. Чанша, Китай

**ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЦВЕТНОЙ
МЕТАЛЛУРГИИ КИТАЯ: НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ПОТЕНЦИАЛ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО,
ИНЖИНИРИНГ, РЕЦИКЛИНГ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ,
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

ООО «Проектно-исследовательский институт цветной металлургии» (Китай, г. Чанша) (CINF) осуществляет свою деятельность в рамках следующих направлений: геология, добыча и обогащение руды, оборудование, плавка, проектирование, строительство, защита окружающей среды, водоснабжение и водоотведение, электроснабжение, тепловая энергия, экономика. В числе партнеров CINF – металлургические и смежные предприятия Китая, Северной Кореи, Гонконга, Вьетнама, Таиланда, Монголии, Ирана, Испании, Румынии.

LLC Design and Research Institute of Nonferrous Metallurgy (China, Changsha) (CINF) carries out the activity within the following directions: geology, production and enrichment of ore, equipment, melting, design, construction, environment protection, water supply and water disposal, power supply, thermal energy, economy. Among partners of CINF – the metallurgical and adjacent enterprises of China, North Korea, Hong Kong, Vietnam, Thailand, Mongolia, Iran, Spain, Romania.

ООО «Проектно-исследовательский институт цветной металлургии», Китай, г. Чанша (сокращено CINF) – это бывшее управление цветной металлургии тяжёлой промышленности отделения чжунаньской проектной компании. Управление было основано в городе Ганьчжоу в провинции Цзянси в 1953 году и стало одной из первых комплексных проектно-исследовательских организаций. В 1954 году организация была перемещена в город Чанша.

CINF обладает богатым техническим потенциалом. На данный момент в институт работает более 1200 человек, в том числе 722 специалиста, из которых 273 имеют ученые звания, 268 – составляет инженерный корпус. В составе инженерного корпуса – горняки, металлурги, строители, электрики, экономисты и др.

В результате серьёзных усилий на протяжении шестидесяти лет CINF переросло в крупное государственное предприятие, которое может заниматься инженерной консультацией, проектированием, генеральным подрядом проекта, инженерным надзором, инженерными изысканиями, строительством, экологической оценкой, научным исследованием и научной разработкой и т.п. Сейчас у CINF более 37 направлений, таких, как добыча и обогащение руды, геология, плавка, оборудование, строительство, защита окружающей среды, электроснабжение, водоснабжение и водоотведение, тепловая энергия, газ, генеральный чертёж, техническая экономика.

На протяжении 60 лет после основания CINF достиг больших успехов в областях проектных исследований: всего было выполнено больше десяти тысяч проектирований и консультирования в инженерии разных видов. Среди них – более тысячи государственных крупных и средних ключевых строительных проектов. Институт удостоен премии за лучшее проектное и консультирование на государственном, провинциальном и министерском уровнях, более 500 премий научно-технического прогресса; имеет около 400 действующих патентов.

Для того, чтобы выйти на международный рынок, CINF активно расширяет иностранное проектирование и операционное консультирование, предоставляет различные технические услуги Румынии, Северной Корее, Монголии, Вьетнаму, Таиланду, Ирану, Испании, Гонконгу и другим районам, создаёт хорошие кооперативные отношения со многими знаменитыми компаниями. CINF достиг выдающихся успехов в области генеральных подрядов, строительного надзора, инженерных изысканий. Генеральный подряд CINF в последние годы высоко оценивается в рамках единой системы управления строительными проектами Китая, а институт входит в «сто лучших предприятий».

В новых экономических условиях и конкурентной среде CINF будет следовать пути инноваций, побуждений, добросовестного обслуживания, непрерывно создавая блага клиентам и прилагать усилия, чтобы стать одной из ведущих компаний Китая.

Миссия компании: пользуясь ограниченными ресурсами, создавать неограниченные блага. Компания считает хорошими ресурсами способных сотрудников, их профессиональные навыки, совершенное инженерное управление и способность к отличному проектированию; активно ищет, развивает, предоставляет высококачественный сервис клиентам и обществу. Создание проектов высокого качества является нашей конечной обязанностью, а также целью, к которой компания непрерывно стремится.

Представление о будущем компании: стать одной из ведущих и знаменитых компаний в мире. Компания ориентирована на инновационное развитие, считает инновацию техники и управления источником силы, эффективно упорядочивает внутренние и внешние ресурсы, непрерывно совершенствует производственную цепочку, активно развивает консультиро-

вание проекта, генеральный подряд, изготовление оборудования, уход в эксплуатации и другие интегрированные модели деловой деятельности, создает структуру развития интеграции общей производственной цепочки, всемерно расширяет внутренний и внешний рынки услуг, прилагает все усилия, становясь конкурентоспособной, ведущей, международной и знаменитой инженерной компанией, которой глубоко верят клиенты.



В области добычи и обогащения руд CINF предлагает следующие технологии:

- технология комплексного освоения карстовых бокситовых отложений;
- технология комплексного освоения рудного месторождения большого и ультрабольшого формата в альпийско-арктическом районе;
- технологии добычи руды на месторождении с использованием глубокой шахты;
- ключевая технология разработки пологой тощей руды с нестабильной кровлей подземного боксита;
- технологии закладки и безотходного освоения;
- применение технологий колонно-надувной флотации и флотационной колонны CCF в новых областях;
- технологии флотации касситерита дисперсного ила;
- технологии комплексного извлечения железа и оксида алюминия из красного шлама;
- технологии извлечения пентооксида ванадия кислым выщелачиванием и экстракцией растворителями из каменного угля;
- технологии добычи и обогащения вольфрамсодержащих руд низкого сорта флотационной колонной;
- технологии высокоэффективной сепарации и смешивания руды боксита;

- технологии флотации свинца-цинка высокого алкали мелкого помола быстрой оптимизацией ответвлений;
- инженерная технология пассажирской (товарной) канатной дороги и экскурсионного лифта.

В области металлургии CINP предлагает следующие технологии:

- технология плавки цинка;
- технология плавки свинца;
- технология медно-никелевой плавки;
- технология плавки марганца;
- технология комплексного извлечения рассеянных металлов;
- технология комплексной переработки анодных шламов;
- технология плавки редких металлов: вольфрама, молибдена, тантала-ниобия, редкоземельных металлов.

В областях, смежных с горнодобывающей и металлургической отраслями, CINP предлагает следующие технологии:

- технология газовой распределённой энергетической системы;
- технология использования неизрасходованной энергии, технология тригенерации;
- технология коммунального водоснабжения/водоотведения;
- технология очистки кислых сточных вод от тяжёлых металлов;
- технология передачи по трубопроводу концентрата высокой концентрации на длинную дистанцию;
- технология предотвращения помутнения в хвостохранилище и ускорения затвердевания хвостов;
- технология безопасного запасного выпуска в начальный период строительства хранилища в карстовом районе;
- технология профилактики воды при освоении подземного рудника;
- технология изыскания бокситов.

В настоящее время CINP является первопроходцем и новатором в ряде перспективных технологий, защищенных патентами. Институтом заявлены 448 патентов, среди них 97 заявлений на изобретения, 352 новых прикладных заявлений; 364 накопленных авторизаций, 337 новых прикладных авторизаций.

При этом интеллектуально-технологические усилия сотрудников CINP сосредоточены в следующих направлениях:

1) Новейшие технологии в области добычи руды – более 40 запатентованных технологий, в т.ч. технология разработки глубокой шахты (более 1000 метров) в сложных геологических условиях, технология закладки и безотходной добычи, технология ультрабольшого рудного месторождения на большей высоте над уровнем моря и в альпийско-арктических районах, технология открытой добычи ультрабольших карстовых бокситовых отложений, технология рекультивации, технология разработки пологой тощей руды с нестабильной кровлей подземного месторождения и т.д. Кроме то-

го, CINF имеет много патентов на пассажирские, товарные канатные дороги и экскурсионные лифты, представляющих самые передовые технологии, имеющих высокую экономическую эффективность и занимающих большую долю рынка.

2) Новейшие технологии обогащения руды: более 100 запатентованных технологий, в т.ч. CCF – новая технология контактной колонно-надувной флотации; крупная высокоэффективная рудомойка производительностью 110 тонн/час и степенью отмывки 97 %; высокоэффективный сгуститель для обезвоживания; энергосберегающий смеситель для пульпы.

3) Новейшие технологии в производстве цветных металлов: меди, никеля, цинка, свинца.

4) Комплексное использование новых источников энергии.

5) Очистка сточных вод – более 20 патентов на оборудование и технологии водоподготовки: проекты очистки сточных вод от тяжелых металлов горно-металлургических комбинатов, очистки воды для коммунального хозяйства, очистки сточных вод с высоким содержанием фтора и др.

6) Комплексное оборудование для автоматического управления – более 50 патентов, в т.ч. система и метод измерения толщины футеровки, электронные датчики температуры и уровня жидкости, разноплановое лазерное оборудование и др.

УДК 620. 193 + 669. 715

И.Н. Ганиев¹, Дж.Х. Джайлоев¹, И.Т. Амонов², Н.Р. Эсанов¹

¹Институт химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан

²Технологический университет Таджикистана, г. Душанбе, Таджикистан

ВЛИЯНИЯ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА Al + 2,18 % Fe В НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение сплавов Al + 2,18 % Fe с щелочноземельными металлами (ЩЗМ). Показано, что стационарный потенциал свободной коррозии сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации щелочноземельного металла из-

меняется в положительном направлении, а с концентрацией хлорид-иона – в отрицательном направлении ординат оси в среде электролита NaCl. Величины потенциалов питтингообразования и репассивации сплавов Al + 2,18 % Fe с ЩЗМ по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите уменьшаются. Увеличение концентрации легирующего компонента в сплаве Al + 2,18 % Fe способствует росту величины потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-иона. Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) с ростом добавок ЩЗМ уменьшается, а от концентрации хлорид-иона увеличивается. Последняя зависимость характерна для всех сплавов, независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента.

Potentiostatic method in potentiodynamic mode at a speed of scanning potential 2 mV / s investigated anodic behavior of alloys Al + 2.18 % Fe with alkaline earth metals (alkali-earth metals). It is shown that the stationary potential of corrosion-free, alloys of Al + 2.18 % Fe -Ca (Sr, Ba) with increasing concentration of the alkaline earth metal is changed in the positive direction, and a concentration of chloride ion in the negative y-axis direction in NaCl electrolyte medium. The pittingpotentials repassivation alloy Al + 2.18 % Fe with AEM(alkali-earth metals) with increasing concentration of chloride ions in the electrolyte is reduced. Increasing the concentration of alloying element in the alloy Al + 2.18 % Fe contributes value pitting and repassivation potentials in all environments, regardless of the concentration of chloride ion. Corrosion current density and thus, with an increase in corrosion rate AEM(alkali-earth metals) additives Al + 2.18 % Fe-Ca (Sr, Ba) alloy systems is reduced and the concentration of chloride ion is increased. This dependence is typical for all alloys, regardless of their composition and characteristics of physical and chemical properties of the doping component.

Железо всегда присутствует в алюминии, так как является преобладающей примесью технического алюминия и основной примесью чистого алюминия. Оно попадает в алюминий при использовании стальной оснастки при плавке и литье, значительная часть – из сырья для производства алюминия – глинозема.

При изучении физико-химических свойств высокопрочных, высокопроводящих сплавов Al – Fe выявлено, что с ростом содержания железа повышается вязкость расплавов, снижается теплопроводность, увеличива-

ется электросопротивление, значительно повышается предел ползучести, тогда как предел усталости снижается благодаря присутствию фазы FeAl_3 .

Электродный потенциал меняется незначительно, поскольку потенциал фазы FeAl_3 находится в пределах $-0,4 \div -0,5$ В, а алюминия – 0,8 В, разность потенциалов 0,4 В между алюминием (матрицей) и частицами фазы FeAl_3 снижает коррозионную стойкость сплавов. Влияние фазы FeAl_3 достаточно велико, так как несколько сотых долей процента железа входят в состав твердого раствора, сегрегируя по границам зерен и субзерен, что может привести к межкристаллитной коррозии. Последующие добавки к сплавам Al – Fe образуют дисперсные частицы FeAl_3 и тем самым меняют характер коррозии от межкристаллитной до питтинговой [1 – 4].

В работах [5, 6] показано влияние чистоты алюминия на его коррозионную стойкость. Так, сравнительное исследование коррозионной стойкости алюминия марок А6 (99,6 % Al) и А995 (99,995 % Al) показало, что скорость коррозии металла марки А6 составляет $8,04 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а алюминия А995 – $1,68 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ в среде 3%-ного NaCl.

Известно, что низкосортный алюминий с повышенным содержанием железа практически не находит применения, за исключением дегазации и раскисления стали. Цель настоящих исследований заключается в разработке сплавов на основе низкосортного алюминия с тем, чтобы превратить этот металл в сплав, который отличался бы особыми свойствами и мог применяться в промышленности. Для достижения поставленной цели в качестве объекта исследования выбран сплав эвтектического состава Al + 2,18 % Fe, который подвергался легированию щелочноземельными металлами (Ca, Sr, Ba) в количествах от 0,005 до 0,5 % (по массе). Ранее сообщалось о влиянии кальция и стронция на анодное поведение указанного сплава [7, 8]. Однако нет данных о влиянии добавок бария на коррозионно-электрохимическое поведение сплавов.

Экспериментальная часть

Сплавы для коррозионно-электрохимических исследований получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ с использованием двойных алюминиевых лигатур с железом (2,18 %) и щелочноземельными металлами (5 %). Применение лигатур дает возможность уменьшить угар легирующих металлов, а также получить сплавы исследуемых систем при более низких температурах. Из полученных сплавов отливали в графитовую изложницу стержни диаметром 8 мм и длиной 140 мм. Нерабочая часть образцов изолировалась смолой (смесь 50 % канифоли и 50 % парафина). Рабочей поверхностью служил торец электрода. Перед погружением образца в рабочий раствор его торцевую часть зачищали наждачной бумагой, полировали, обезжиривали, тщательно промывали спиртом и затем погружали в раствор электролита NaCl. Температура раствора в ячейке поддерживалась постоянной (20°C) с помощью термостата МЛШ-8.

Для изучения электрохимических свойств тройных сплавов применяли потенциостатический метод исследования. Электрохимические испытания образцов проводили в потенциодинамическом режиме на потенциостате ПИ-50-1.1 со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с в среде электролита NaCl. ГОСТ 908 – 85 «Металлы и сплавы. Определение показателей коррозии и коррозионной стойкости» рекомендует провести определение коррозионной стойкости металлов в среде электролита 3 %-ного раствора NaCl. Для выяснения влияния хлорид-иона на коррозионную стойкость сплавов исследования также проводились при 10 кратном (0,3 % NaCl) и 100 кратном (0,03% NaCl) уменьшении концентрации коррозионно-активного хлорид-иона. Электродом сравнения служил хлорсеребряный, вспомогательным – платиновый.

Образцы потенциодинамически поляризовали в положительном направлении от потенциала, установившегося при погружении, до резкого возрастания тока в результате питтингообразования (рисунок 1, кривая I). Затем образцы поляризовали в обратном направлении (рисунок 1, кривая II) и по перечению кривых I и II определяли величину потенциала репассивации. Далее образцы полировали в катодной области до значения потенциала –1,1 В для удаления оксидных плёнок с поверхности электрода (рисунок 1, кривая III) в результате подщелачивания при электродной поверхности. Затем образцы поляризовали вновь в положительном направлении, и из анодных кривых определяли основные электрохимические параметры (рисунок 1, кривая IV).

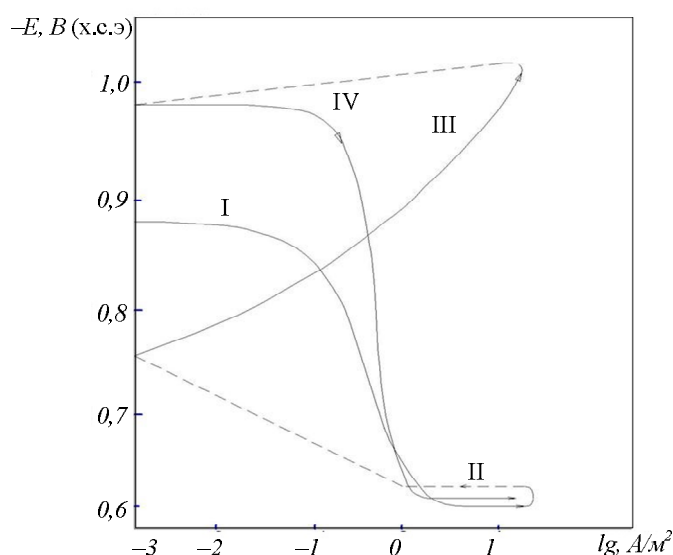


Рисунок 1 – Полная поляризационная кривая сплава Al + 2,18 % Fe в среде электролита 3 %-ного NaCl при скорости развертки потенциала 2 мВ/с

В качестве примера на рисунке 1 представлена полная поляризационная диаграмма исходного сплава Al + 2,18 % Fe в среде электролита 3%-

ного NaCl. На полученных таким образом поляризационных кривых определяли основные электрохимические характеристики сплавов: потенциал питтингообразования ($E_{по}$), потенциал и ток коррозии ($E_{кор}$ и $i_{кор}$). Потенциал репассивации ($E_{рп}$) определяли графически как первый изгиб на обратном ходе анодной кривой или как точку пересечения прямого и обратного ходов. Расчет тока коррозии как основной электрохимической характеристики процесса коррозии проводили по катодной кривой с учетом таффеловской наклонной $B_k = 0,12$ В, поскольку в нейтральных средах процесс питтинговой коррозии алюминия и его сплавов контролируется катодной реакцией ионизации кислорода. Скорость коррозии в свою очередь является функцией тока коррозии, находимой по формуле

$$K = i_{кор}k,$$

где $k = 0,335$ г/(А·ч) для алюминия.

Подробная методика снятия поляризационных кривых представлена в работах [7 – 13].

Обобщенные результаты исследования сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) представлены в таблицах 1 и 2. Потенциал свободной коррозии сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации щелочноземельного металла изменяется в положительном направлении оси ординат. С увеличением концентрации хлорид-иона потенциал свободной коррозии сплава Al + 2,18 % Fe уменьшается от –0,680 В в среде 0,03 % NaCl до –0,860 В в среде 3 %-ного NaCl (таблица 1).

Таблица 1 – Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии ($-E_{св.кор}$) и питтингообразования ($-E_{по}$) сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca(Sr, Ba) в среде электролита NaCl

Среда	Содержание ШЗМ % (по массе)	Сплавы с Ca		Сплавы со Sr		Сплавы с Ba	
		$-E_{св.корр}$, В	$-E_{по}$, В	$-E_{св.корр}$, В	$-E_{по}$, В	$-E_{св.корр}$, В	$-E_{по}$, В
0,03 % NaCl	–	0,680	0,484	0,680	0,484	0,680	0,484
	0,005	0,700	0,350	0,690	0,518	0,672	0,450
	0,01	0,690	0,340	0,682	0,500	0,665	0,440
	0,05	0,670	0,320	0,670	0,487	0,654	0,440
	0,1	0,660	0,320	0,658	0,460	0,640	0,430
	0,5	0,640	0,300	0,640	0,450	0,634	0,415
0,3 % NaCl	–	0,850	0,560	0,850	0,560	0,850	0,560
	0,005	0,840	0,520	0,794	0,530	0,790	0,480
	0,01	0,830	0,520	0,780	0,510	0,770	0,450
	0,05	0,790	0,480	0,768	0,500	0,754	0,440
	0,1	0,770	0,460	0,740	0,480	0,720	0,440
	0,5	0,762	0,450	0,700	0,464	0,695	0,418
3 % NaCl	–	0,860	0,600	0,860	0,600	0,860	0,600
	0,005	0,860	0,560	0,860	0,550	0,858	0,500
	0,01	0,856	0,520	0,848	0,534	0,840	0,484
	0,05	0,844	0,500	0,832	0,518	0,832	0,460
	0,1	0,830	0,470	0,818	0,500	0,810	0,446
	0,5	0,820	0,460	0,800	0,480	0,798	0,420

Таблица 2 – Зависимость скорости коррозии сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) от содержания ЦЗМ в среде электролита NaCl

Среда	Содержание ЦЗМ, % (по массе)	Скорость коррозии					
		сплавов с Ca		сплавов со Sr		сплавов с Ba	
		$i_{кор} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$	$i_{кор} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$	$i_{кор} \cdot 10^{-2}$	$K \cdot 10^{-3}$
		A/м ²	г/(м ² ·ч)	A/м ²	г/(м ² ·ч)	A/м ²	г/(м ² ·ч)
0,03 % NaCl	–	0,130	4,35	0,130	4,35	0,130	4,35
	0,005	0,125	4,19	0,122	4,09	0,118	3,95
	0,01	0,120	4,02	0,118	3,95	0,115	3,85
	0,05	0,115	3,85	0,115	3,85	0,112	3,75
	0,1	0,113	3,79	0,112	3,69	0,090	3,01
	0,5	0,110	3,69	0,100	3,35	0,080	2,69
0,3 % NaCl	–	0,160	5,36	0,160	5,36	0,160	5,36
	0,005	0,148	4,96	0,145	4,86	0,140	4,69
	0,01	0,135	4,52	0,130	4,45	0,133	4,36
	0,05	0,130	4,35	0,124	4,35	0,130	4,15
	0,1	0,127	4,25	0,120	4,15	0,124	4,02
	0,5	0,122	4,08	0,118	3,95	0,110	3,68
3 % NaCl	–	0,170	5,70	0,170	5,70	0,170	5,70
	0,005	0,165	5,53	0,162	5,42	0,160	5,36
	0,01	0,156	5,22	0,150	5,03	0,148	4,96
	0,05	0,150	5,02	0,146	4,89	0,140	4,69
	0,1	0,145	4,86	0,134	4,52	0,135	4,48
	0,5	0,130	4,35	0,130	4,35	0,128	4,29

Такая зависимость имеет место также и для сплава Al + 2,18 % Fe, легированного ЦЗМ, т. е. при переходе от слабого электролита к более сильному электролиту наблюдается уменьшение величины потенциала свободной коррозии независимо от содержания легирующего компонента. Значения потенциалов питтингообразования и репассивации сплава Al + 2,18 % Fe с ЦЗМ также, по мере роста концентрации хлорид-иона в электролите, изменяются в более отрицательном направлении оси ординат. Увеличение концентрации легирующего компонента способствует росту потенциалов питтингообразования и репассивации во всех средах независимо от концентрации хлорид-иона. Установленные зависимости характерны для сплавов Al + 2,18 % Fe со всеми щелочноземельными металлами. При переходе от сплавов Al + 2,18 % Fe с кальцием к сплавам со стронцием и барием потенциал свободной коррозии уменьшается, т.е. изменяется в отрицательном направлении оси ординат, потенциал питтингообразования также уменьшается (таблица 1).

Плотность тока коррозии и соответственно скорость коррозии сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba) с ростом концентрации хлорид-иона увеличиваются. Указанная зависимость характерна для всех сплавов независимо от их состава и особенностей физико-химических свойств легирующего компонента. При переходе от сплавов Al + 2,18 % Fe с кальцием к сплавам со стронцием и барием наблюдается рост скорости коррозии, что коррелирует со свойствами самих щелочноземельных металлов. Для

сплава Al + 2,18 % Fe также характерен рост скорости коррозии с увеличением концентрации хлорид-иона в электролите (таблица 2).

Анодные ветви потенциодинамических кривых сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr) в среде 3%-ного NaCl (рисунок 2) показывают, что кривые, относящиеся к легированным сплавам, располагаются левее кривой исходного сплава Al + 2,18 % Fe, т.е. скорость анодной коррозии легированных сплавов несколько меньше скорости анодной коррозии сплава Al + 2,18 % Fe во всех исследованных средах.

Положительное действие щелочноземельных металлов на анодные свойства сплава Al + 2,18 % Fe не может объясняться только увеличением истинной поверхности анода или уплотнением продуктов коррозии на поверхности электрода. Стойкость сплава Al + 2,18 % Fe, легированного ЦЗМ, зависит также от изменения и модифицирования структуры эвтектики (α -Al + FeAl₃), которая является основной фазой сплавов. Добавки ЦЗМ значительно измельчают структуру эвтектики (α -Al + FeAl₃), изменяя величину кристаллов фазы FeAl₃ в эвтектике.

Как известно, модификаторами структуры сплавов могут служить металлы, имеющие малую межатомную связь и следовательно низкую температуру плавления, малую прочность и твердость [14 – 16]. Диффузия в металлах происходит быстрее вдоль границ зерен, чем в самих зернах.

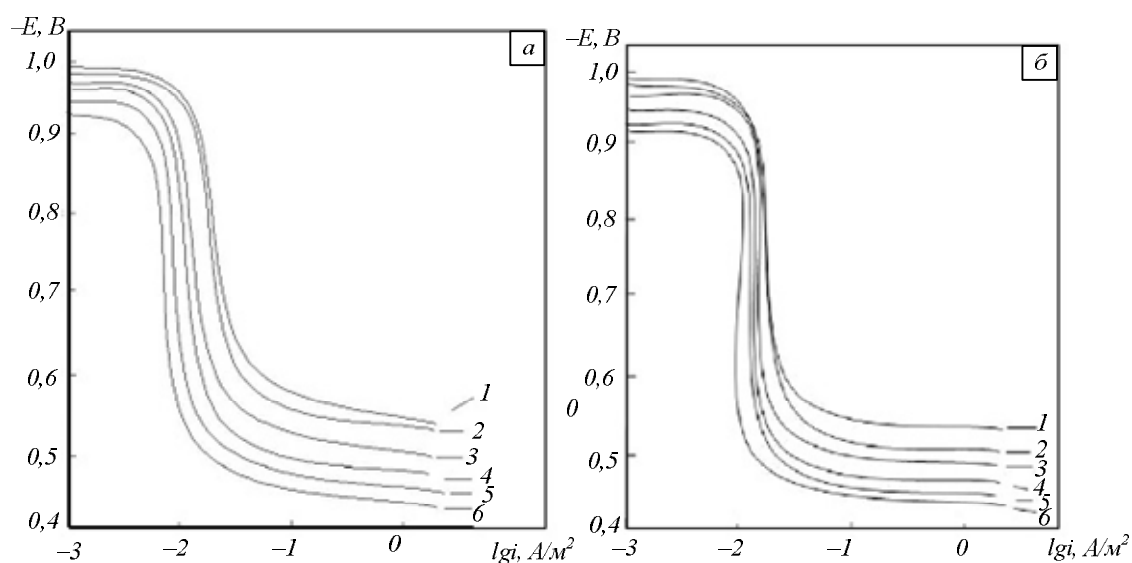


Рисунок 2 – Анодные ветви потенциодинамических кривых (2 мВ/с) сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca и Al + 2,18 % Fe – Sr, содержащих кальций (а) и стронций (б): 1 – 0 %; 2 – 0,005 %; 3 – 0,01 %; 4 – 0,05 %; 5 – 0,1 %; 6 – 0,5 % в среде электролита 3 %-ного NaCl

Наличие границ зерен в поликристаллах влияет на такие свойства, как внутреннее трение, скольжение и т.д. В случае диспергирования структуры продукты коррозии полностью перекрывают незначительную

по величине межкристаллитную прослойку и этим усиливают пассивность металла. Таким действием чаще всего обладают *s*- и *p*-элементы, к которым относятся и щелочноземельные металлы. Таким образом, существует корреляция между увеличением коррозионной стойкости и изменением зернистости сплава, что подтверждает существующие представления о модифицирующей роли модификаторов в коррозии сплавов. Как известно, при переходе границы растворимости на кривой зависимости состав – свойства наблюдается перелом, что соответствует точке предельной растворимости второго компонента в металле – основе (Al + 2,18 % Fe). Были исследованы электрохимические характеристики сплавов систем Al + 2,18 % Fe – Ca (Sr, Ba), содержащих до 0,5 % (по массе) ЩЗМ. В изученном диапазоне концентраций зависимость плотности тока коррозии от состава носит монотонный характер, т.е. отсутствует точка перегиба, характерная для перехода границы области твердого раствора ЩЗМ в сплав Al + 2,18 % Fe.

Следовательно, ЩЗМ до содержания 0,5 % (по массе), растворяясь в сплаве Al + 2,18 % Fe, модифицируют кристаллическую структуру эвтектики (α -Al + FeAl₃), не изменяя его фазовый состав, повышают анодную устойчивость. Последнее подтверждается диаграммой состояния системы Al – Fe – Sr, в которой отсутствует кристаллизация тройных фаз [17, 18].

Выводы. Установлено, что легирование щелочноземельными металлами сплава Al + 2,18 % Fe до 0,5 % (по массе) повышает его анодную устойчивость в 1,5 – 2 раза в среде электролита NaCl. При этом с ростом концентрации легирующего компонента отмечается изменение в положительном направлении оси ординат потенциалов свободной коррозии, питтингообразования и репассивации. С увеличением концентрации хлорид-иона в электролите потенциалы свободной коррозии, питтингообразования и репассивации сплавов уменьшаются, скорость коррозии увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. – Самара: изд. Самарского государственного технического ун-та, 2013. – 81 с.
2. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение). Справочник / Под ред. И.Н. Фридляндера. – Киев: КОМИТЕХ, 2005. – 365 с.
3. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. – 639 с.
4. Красноярский В.В., Сайдалиев Н.Р. Коррозионно-электрохимические свойства сплавов алюминия с железом в нейтральных растворах. Э.И.: Защита от коррозии и окружающей среды. – М., 1991. Вып. 3. С. 14 – 19.

5. Умарова Т.М., Ганиев И.Н. Анодные сплавы алюминия с марганцем, железом и редкоземельными металлами. – Душанбе: Дониш, 2009. – 232 с.
6. Ганиев И.Н., Умарова Т.М., Обидов З.Р. Коррозия двойных алюминиевых сплавов в нейтральных средах. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 198 с.
7. Джайлоев Дж.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. Потенциодинамическое исследование сплава Al + 2,18 % Fe, легированного барием // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 2. С. 97, 98.
8. Джайлоев Дж.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Азимов Х.Х. Анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe, легированного кальцием в среде электролита NaCl // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 12. С. 38 – 42.
9. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И. Влияние лантана на анодное поведение сплава Al + 6 % Li // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 1 (44). С. 49 – 53.
10. Раджабалиев С.С., Ганиев И.Н., Амонов И.Т. Влияние свинца на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe // Вопросы материаловедения. 2016. № 2 (86). С. 147 – 152.
11. Азимов Х.Х., Ганиев И.Н., Амонов И.Т., Джайлоев Дж.Х. Потенциодинамическое исследование сплава Al + 2,18 % Fe, модифицированного литием в среде электролита NaCl // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2016. Т. 59. № 2. С. 74 – 79.
12. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Норова М.Т., Ганиева Н.И. Потенциодинамическое исследование сплава Al+6%Li с иттрием в среде электролита NaCl // Вестник Магнитогорского Государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 2. С. 95 – 100.
13. Одинаев Ф.Р., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г., Якубов У.Ш. Потенциодинамическое исследование сплава АЖ4.5, легированного свинцом в среде электролита NaCl // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. № 2 (45). С. 64 – 68.
14. Модифицирование силуминов стронцием / И.Н. Ганиев, Г.А. Пархутик, А.В. Вахобов, И.Ю. Куприянова. – Минск: Наука и техника, 1985. – 143 с.
15. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
16. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. – М.: Изд-во научно-техн. литературы, 1956. – 135 с.
17. Ганиев И.Н., Вахобов А.В., Назаров Х.М. Металлургия стронция и его сплавов. – Душанбе: Дониш, 2000. – 205 с.
18. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Диаграммы состояния двойных и тройных систем с участием бария и стронция. – Душанбе: Дониш, 1992. – 296 с.

В.М. Павловец

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

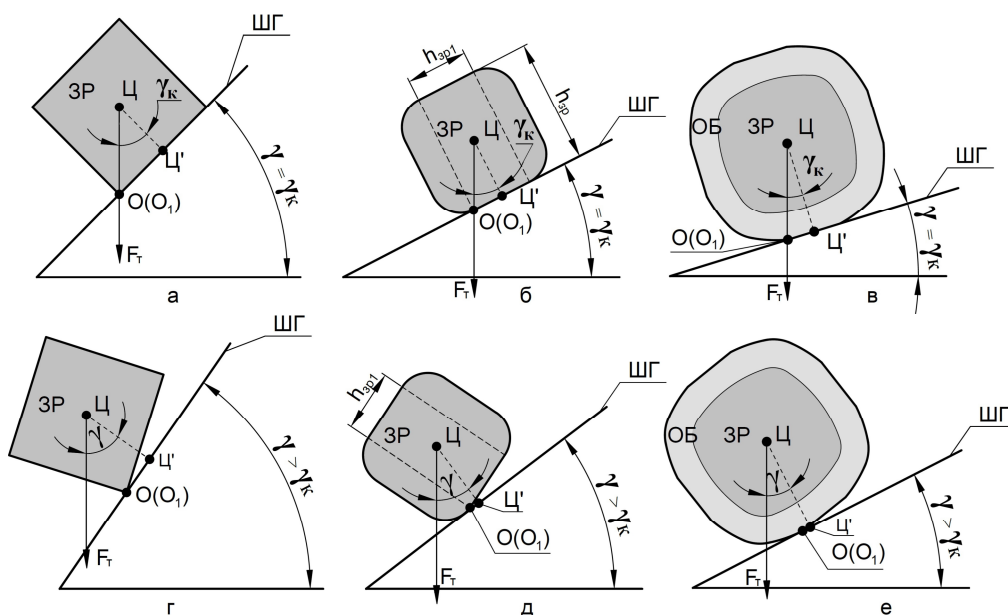
АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА УПРАВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ЗАРОДЫШЕЙ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ, ОСНОВАННОЙ НА ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ

В работе проанализированы технические решения, направленные на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

The paper analyzes technical solutions aimed at controlling the plastic deformation of embryos in the technology of pellet production based on compulsory nucleation.

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей по форме, близкой форме куба в холостой зоне тарели методом напыления и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [1, 2]. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по его сечению и организовать процесс формообразования с более высокой удельной производительностью. Для организации режима переката зародышей сложной формы и формирования окатышей на промышленном окомкователе необходимо знать соответствующий угол наклона тарели к горизонту и её частоту вращения [1, 2]. Для этого требуется теоретическая проработка силового воздействия на зародыш сложной формы в режиме переката со стороны окомкователя и экспериментальная проработка условий пластической деформации зародышей в режиме принудительного зародышеобразования.

На рисунке 1 показано условие устойчивости зародыша на наклонной плоскости шихтового гарнисажа (ШГ) в отсутствии центробежной силы. Устойчивость зародыша на шихтовом гарнисаже определяется горизонтальным положением его центра масс (Ц) относительно линии опоры – ребра OO_2 (рисунок 1). Это условие соблюдается в стационарном режиме работы окомкователя, когда зародыш правильной формы, образующийся в холостой зоне тарели (рисунок 1, а), поступает в рабочую зону окомкователя и в процессе переката деформируется и наращивает свою массу (рисунок 1, б, в).



зародыши: а, г – правильной кубической формы: б, д – с частично смятыми углами и ребрами: в, е – с полностью смятыми углами и ребрами
а - в – устойчивое положение зародышей, г - е – режим переката

Рисунок 1 – Схемы, иллюстрирующие устойчивость зародыша и режим переката на ШГ

Если линия действующей силы (в данном случае силы тяжести) переместится за опорное ребро OO_1 , то сформируется момент силы, который выведет зародыш из состояния устойчивости и сформирует перекат зародыша (рисунок 1, г). Это также справедливо в отношении зародыша со смятыми (деформированными) углами и ребрами (рисунок 1, д) и в отношении зародыша, на котором при перекае частично сформирована оболочка окатыша (рисунок 1, е). Положение устойчивости характеризуется углом переката γ_k , составленным из перпендикуляра на опорную плоскость ШГ и линии действующей силы. Графически этот угол можно зафиксировать при $\gamma = \gamma_k$. Выход из состояния устойчивости и формирование переката происходят при $\gamma > \gamma_k$. Для этих условий у зародыша правильной кубической формы угол переката превышает 45° (рисунок 1, а). Угол переката зависит от частоты вращения тарели окомкователя, угла наклона днища тарели к горизонту и степени деформации зародыша. В свою очередь более высокая степень деформации позволяет назначить более узкие интервалы изменения угла наклона днища тарели к горизонту [3]. Поэтому в процессе зародышеобразования желательно иметь максимальную степень деформации зародыша.

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

$$\gamma_k = \arctg(h_{зр1} / h_{зр}) = \arctg(K_{см}), \quad (1)$$

где $K_{см} = h_{зр1} / h_{зр}$ – коэффициент смятия зародыша. Может принимать значения в диапазоне 0 – 1; $h_{зр}$ – размер ребра несмятого зародыша, м; $h_{зр1}$ – размер ребра зародыша с учётом смятия, м.

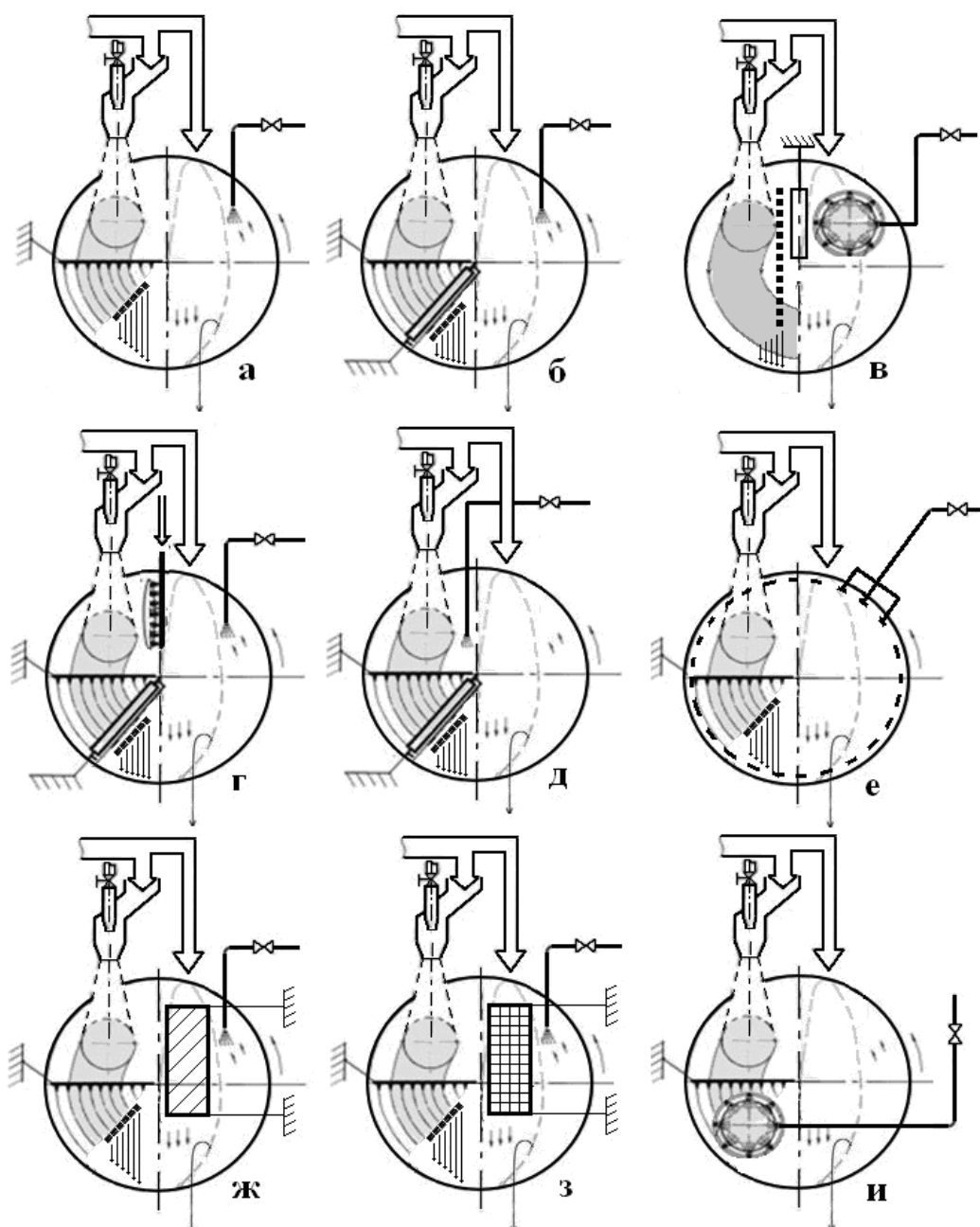
В работе [3] установлено, что назначение технологических параметров тарельчатого окомкователя (частоты вращения, угла наклона тарели к горизонту) в технологии принудительного зародышеобразования зависит от формы зародыша и коэффициента смятия зародыша. Формула 1, по которой определяется γ_k с учетом коэффициента смятия зародыша, справедлива для симметрично-сминаемого зародыша. В практических условиях зародышеобразования смятие зародышей происходит несимметрично. Причем в первую очередь смятию подвергаются углы зародыша, поэтому указанное соотношение справедливо только для одного из двенадцати, произвольно выбранного ребра. С учетом смятия всех углов и уменьшения размеров граней зародыша формула 1 примет:

$$K_{\text{нi}} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^{12} (h_{\text{сдi}} / h_{\text{сд}}) / 12 \right\} / n, \quad (2)$$

где i – число граней зародыша; $i=12$; n – количество зародышей, полученных в процессе принудительного зародышеобразования после пластической деформации в холостой зоне окомкователя и взятых для анализа, $n=10$.

Целью работы явился анализ технических решений, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

Экспериментальные схемы, показанные на рисунке 2, были оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности. На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр $D=0,62$ м, работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял 45° . Расход шихты на зародышеобразование составлял 0,05 кг/с. Зародыши для расчета $K_{см}$ и анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали в нижней части холостой зоны тарели на ее вертикальном диаметре. В ходе эксперимента от места деления напыленного слоя (НС) шихты на зародыши и до нижней части холостой зоны они проходили относительное расстояние L/D , где происходило предварительное смятие углов и граней зародышей за счет переката и ударного взаимодействия друг с другом. Показатель L/D является конструктивной характеристикой экспериментальной схемы.



Схемы зародышеобразования: а – плужковым делителем (патент РФ №2327750), б – вращающимся барабаном (патент РФ №2356951), в – тоже в верхней части холостой зоны (патент РФ №2451015), г – тоже с увлажнением НС (патент РФ №2464328), д – тоже с увлажнением НС (патент РФ №2430167), е – плужковым делителем с профилированием и увлажнением бортового гарнисажа, №2165987), ж – плужковым делителем и ленточным пригрузом, установленным над нисходящим слоем зародышей (патент РФ №2190668), з – тоже с ленточным пригрузом, снабженным ячейковой решеткой (патент РФ №2343214), и – вращающимся барабаном и увлажнением массива зародышей (патент РФ №2377323)

Рисунок 2 – Экспериментальные схемы, позволяющие управлять пластической деформацией зародышей в холостой зоне окомкователя

Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, наличию вращающихся узлов, налипанию шихты на детали схемы, по появлению отказов и затруднений в работе. Численное значение выхода годного (ВГ) вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи фракции ≤ 5 мм в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 минут).

Для расчета $K_{см}$ измеряли размеры граней зародышей с помощью измерительного шаблона и штангенциркуля с точностью 0,1 мм. Все технологические схемы были настроены на получение первоначального размера зародышей $h_{зр}$ на уровне 10-11 мм. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1– Результаты экспериментов

Номер технологической схемы (рисунок 1)	Показатели работы экспериментальной схемы			
	L/D	Сложность схемы	Выход годного, %	$K_{см}$
а	0,25-0,30	простая	85	0,92
б	0,25-0,30	сложная	92	0,87
в	0,80-1,00	сложная	88	0,74
г	0,25-0,30	сложная	94	0,79
д	0,25-0,30	сложная	93	0,91
е	0,25-0,30	простая	86	0,90
ж	0,25-0,30	сложная	78	0,78
з	0,25-0,30	сложная	73	0,77
и	0,25-0,30	сложная	94	0,78

Процесс зародышеобразования и деления НС по схеме (а) осуществляется плужковым делителем достаточно простой формы, в котором отсутствуют вращающиеся элементы конструкции, что является достоинством схемы [4, 5]. Плужковый делитель сочетает в одном устройстве функции продольного и поперечного деления напыленного слоя. Недостатком является большой разброс зародышей по размерам, которые преимущественно имеют форму параллелепипеда. В этой связи перекал зародышей происходит вдоль большей (продольной) оси зародыша и изменение формы происходит только на 4-х гранях. В этой связи пластическая деформация зародышей развивается в минимальной степени, а $K_{см}$ самый высокий из всех представленных ниже технических решений.

По схеме (б) зародышеобразование и деление НС осуществляется вращающимся барабаном, снабженным ребрами, получающим движение от ШГ [2]. Эта схема аппаратно более сложная по сравнению со схемой

(а), но обладает основным преимуществом – дает возможность получить зародыши с узким фракционным составом ($h_{зр}=10-11$ мм). Относительное расстояние (длина пути) L/D имеет такое же значение, как и в схеме (а). Образующиеся зародыши имеют форму, близкую к форме куба, и перекачиваются по всем своим граням, что усиливает процесс пластической деформации и снижает коэффициент смятия до 0,87.

По технологической схеме (в) деление НС на зародыши осуществляется вращающимся барабаном с ребрами, аналогичным схеме (б). Отличие заключается в том, что деление НС осуществляется на выходе из нисходящего слоя материалов на более удаленном расстоянии от нижней части холстой зоны тарели [2]. Поэтому длина пути зародышей по этой схеме существенно возрастает до $L/D=0,8-1,0$. Перекат зародышей и ударное взаимодействие на этом расстоянии способствует более интенсивному смятию углов и граней зародышей и снижает $K_{см}$ до 0,74. Это единственная экспериментальная схема, имеющая максимальное значение L/D и минимальную величину $K_{см}$.

По схеме (г) деление НС на зародыши осуществляется аналогично схеме (б), но НС перед делением целенаправленно переувлажняется до $(1,05-1,10)W_{ш}$ (где $W_{ш}$ – влажность загружаемой шихты, %). Поэтому образующиеся зародыши более пластичные и в большей степени сминаемы до $K_{см}=0,79$. Повышенная влажность зародышей также способствует эффективному доокомкованию шихтовой мелочи и формирует более высокое значение ВГ. Можно прогнозировать, что комбинация позиций (в) и (г) может дать максимальный эффект по $K_{см}$ и снизить $K_{см}$ ориентировочно до 0,6-0,7. Выход годного может превысить 95 %.

Увлажнение ШГ до влажности $W_{шг}=(0,9-1,1)W_{ш}$ (схема д) способствует более эффективному сцеплению НС с ШГ и повышению степени напыления шихты. Поэтому в процессе принудительного зародышеобразования эта технологическая операция направлена преимущественно на повышение эффективности напыления шихты на движущийся шихтовый гарнисаж [2]. На процесс деления НС на зародыши она практически не влияет. Поэтому все параметры ($ВГ=93$ %, $K_{см}=0,91$) близки к параметрам, полученным при реализации схемы (б).

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

Установка массивного пригруза (лента, нагруженная влажной шихтой) на поверхности перекачивающихся зародышей в рабочей зоне оком-

окомкователя по схемам (ж) и (з) является достаточно простым и эффективным мероприятием [2]. По схеме (ж) на слое зародышей установлена гладкая эластичная лента, изготовленная из резины или ткани. По схеме (з) на поверхности ленты дополнительно установлена ячейковая решетка, увеличивающая массу пригруза и усиливающая пластическую деформацию зародышей и позволяющая снизить $K_{см}$ до 0,77. Выход годного снижается до 73 % за счет частичного захвата шихты ячейками пригруза. К недостатку этой схемы можно отнести некоторое ограничение визуализации процесса окомкования и снижение контроля над технологическим процессом.

Переувлажнение образующихся зародышей в зоне зародышеобразования до $W_{зр} = (1,05-1,15)W_{ш}$ увеличивает их пластичность аналогично схеме (г), что позволяет достичь относительно низкого $K_{см} = 0,78$. Эта схема также близка по сложности схеме (г), длине пути и относится к наиболее эффективной и по параметру ВГ.

Можно отметить, что технически простые схемы (а, е), направленные на регулирование пластической деформации зародышей, менее эффективны, чем более сложные. Применение технологически более сложных схем на практике позволяет сформировать величину коэффициента смятия до 0,74-0,91, а выход годного обеспечить на уровне 73-94 %. Комбинация схем в, г и в, и позволяет прогнозировать снижение $K_{см}$ до 0,6-0,7. Но в этом случае теряются преимущества по получению окатышей с пониженным содержанием влаги в зародышевом центре.

Общим недостатком проанализированных технических схем является трудность согласования режимов зародышеобразования, осуществляемого в холостой зоне тарели окомкователя, и технологического режима переката, реализуемого в рабочей области тарели окомкователя, на одном технологическом агрегате. Эта трудность заключается в том, что после зародышеобразования зародыш представляет собой недеформированный брикет правильной кубической формы. Если условно предположить, что после переката зародышей в холостой зоне он не деформируется, то для обеспечения переката зародышей такой формы в рабочей зоне окомкователя нижней границей угла наклона днища тарели к горизонту является угол в 45 градусов. В реальном процессе переката зародышей в холостой зоне тарели в нижнюю часть днища тарели происходит деформация углов и граней зародышей. В результате этого меняется степень деформации зародыша и он становится более округлым. Вследствие чего изменяются условия доокомкования зародышей до окатышей в режиме переката в рабочей зоне тарели, поскольку нижняя граница угла наклона днища тарели к горизонту уменьшается. При этом коэффициент смятия зародышей в холостой зоне тарели меняется относительно незначительно, уменьшаясь от единицы до некоторого определенного значения (см. таблицу), не превышающего значений 0,74- 0,92. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,87-0,96. В рабочей зоне окомкователя, напротив, происходит резкое падение $K_{см}$ от 0,74-

0,92 до нуля. Среднее значение $K_{см}$ составляет 0,37-0,46. Это значит, что, назначая угол $\gamma = \gamma_k$ по условиям $K_{см}$, сформированного в рабочей зоне окомкователя, мы заведомо усложняем режим транспортировки и деформирования зародышей в холостой зоне окомкователя. Самым простым решением является выравнивание условий деформирования и формообразования в этих зонах, добиваясь техническими мероприятиями выравнивания коэффициентов $K_{см}$ в этих зонах. Наиболее действенным решением является искусственная деформация зародышей в холостой зоне, желательная совмещенная с приростом массы. Известно большое число решений, направленных на привлечение сопутствующих технологических операций (напыление, деление, очистка) к формообразованию шихты [2]. Следует признать, что они зачастую технически сложны. Другим решением может быть комбинированное решение задачи, в которой задаются благоприятные условия зародышеобразования по углу γ , используя полученный коэффициент $K_{см}$ в холостой зоне окомкователя, ограничивая при этом режим переката в зоне, занятой шихтовыми материалами. Для выравнивания условий формообразования в этом случае целесообразно использовать дополнительные управляющие воздействия в рабочей зоне окомкователя: частоту вращения тарели, влажность шихты и гарнисажа, механические активаторы шихты и другие способы. Используя принцип выравнивания условий деформирования в разных зонах окомкователя можно применять частичную деформацию зародышей их механическим ускорением при перекате в холостой зоне окомкователя и другие инженерные решения.

Выводы. Проанализированы технические схемы, позволяющие управлять пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Павловец В.М. Особенности движения зародыша сложной формы на тарели окомкователя в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании / В.М. Павловец, А.В. Герасимук // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: Сб. науч. трудов. Вып. 37, 237 с. СибГИУ. – Новокузнецк, 2017. – с. 15 – 24.
4. Павловец В.М. Исследование теплосиловых режимов напыления влажной шихты, предназначенных для принудительного зародышеобразо-

вания / В. М. Павловец // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 6. – С. 9 – 13.

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

УДК 669. 162. 12:622

В.М. Павловец

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

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЛАГОУДАЛЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ОКОМКОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

В работе проанализированы технические решения, направленные на организацию предварительного влагоудаления на участке окомкования в производстве железорудных окатышей.

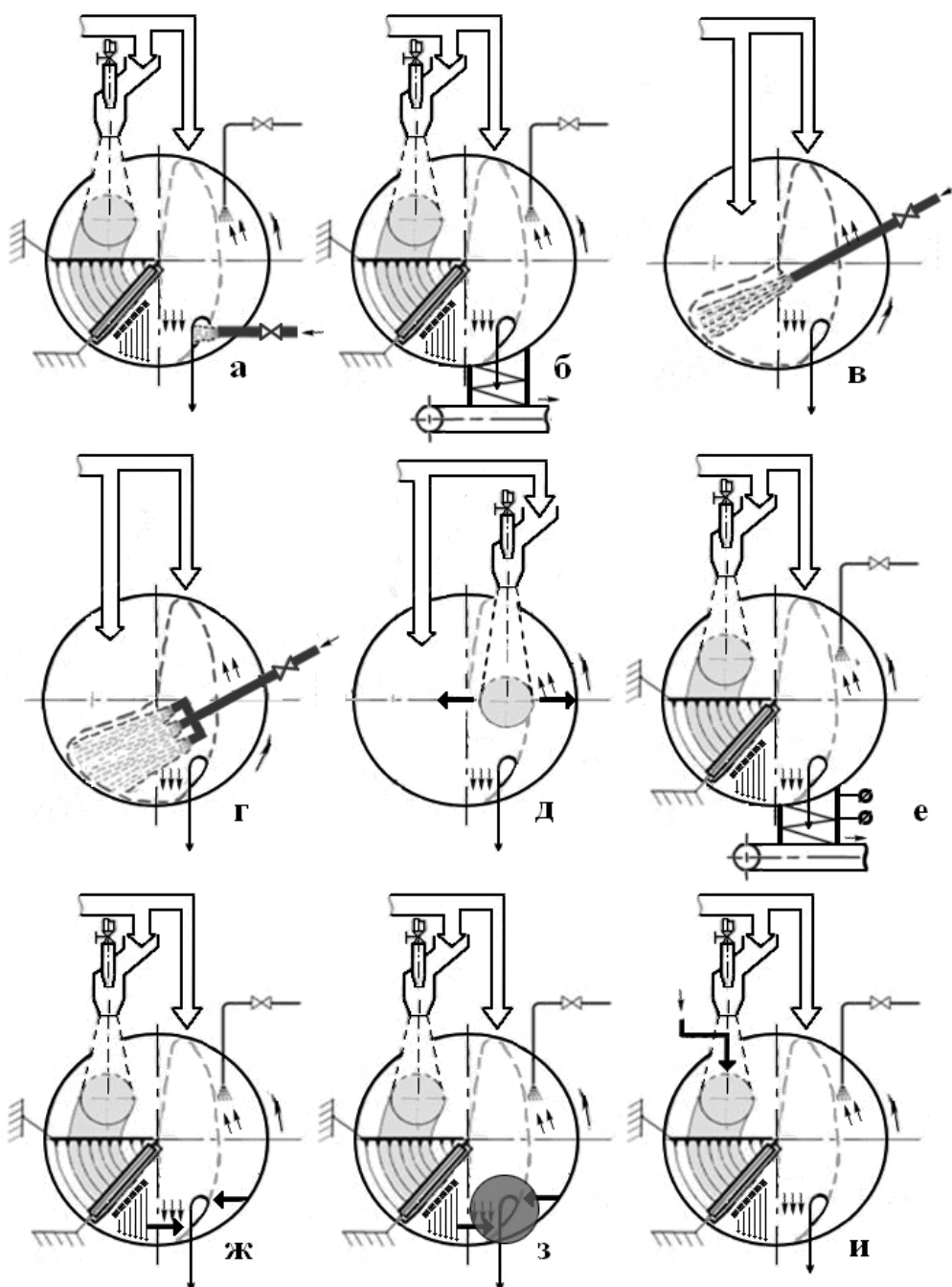
Technical solutions aimed at the organization of preliminary moisture removal at the pelletizing site in the production of jelly-ore pellets are analyzed.

Получение сырых окатышей на тарельчатом окомкователе по технологии принудительного зародышеобразования включает формирование зародышей по форме, близкой форме куба в холостой зоне тарели методом напыления и создание оболочки окатышей их доокомкованием в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [1, 2]. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях и позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по его сечению с более высокой удельной производительностью. Благоприятным сопутствующим процессом этой технологии является влагоудаление из зародышей, которые в процессе их доокомкования, располагаясь в центре гранулы, формируют окатыши с пониженным содержанием влаги уже на стадии окомкования. Практика этой технологии позволяет одновременно с окомкованием организовать предварительное влагоудаление (ПВУ) в циркуляционной зоне комкуемого слоя на тарели окомкователя или на стадии выгрузки окатышей из окомкователя. Подход к тарельчатому окомкователю

как к низкотемпературному тепловому агрегату заключается в использовании струйной тепловой обработки (СТО) для напыления шихты в технологии принудительного зародышеобразования и для обработки слоя влажных окатышей на заключительной стадии окомкования, либо при транспортировке окатышей к обжиговому агрегату [1, 2].

Целью работы является анализ технических решений, позволяющих организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования в производстве железорудных окатышей, опирающихся как на принудительное зародышеобразование (ЗНД) и напыление шихты на зародыши (ЗОН), так и на действующую технологию капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката (ЗО).

Экспериментальные схемы, реализующие процесс предварительного влагоудаления (ПВУ), показаны на рисунке 2. Они были оформлены автором в виде объектов интеллектуальной собственности. На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр $D=0,62$ м, работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял 45° . Расход шихты на зародышеобразование составлял 0,05 кг/с. Расход сжатого воздуха давлением 0,2 МПа и температурой 100-150 °С составлял 0,2 м³/мин. Окомкователь работал в нескольких режимах: по технологии принудительного зародышеобразования ЗНД (рисунок 1, схемы а, б, е, ж, з, и), в режиме капельного зародышеобразования и формирования оболочки окатышей в режиме напыления шихты ЗОН (рисунок 1, схема д) и по схеме получения окатышей в режиме капельного зародышеобразования и окомкования шихты в режиме переката ЗО (рисунок 1, схема в, г). Окатыши для анализа эффективности экспериментальной схемы отбирали после СТО в количестве 0,5 кг, для которых определяли влажность $W_{ок}$ стандартным методом ($t=105$ °С, $\tau=30$ минут), и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты ($W_{ш}$), определяя коэффициент безразмерной влажности θ_w ($\theta_w = W_{ок}/W_{ш}$). Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали схемы, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) являлся сопутствующим показателем. Численное значение выхода годного вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи фракции ≤ 5 мм в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 минут). При определении ВГ учитывали, что годные окатыши имели размер 12-16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Важной характеристикой технологических схем, приведенных на рисунке 1, является режим работы устройства. Если процесс ПВУ протекает одновременно с зародышеобразованием и окомкованием, то режим работы окомкователя совмещенный. Если в процессе работы окомкователя развивается сначала зародышеобразование и окомкование, а затем ПВУ, то режим работы условно назван прямым



Схемы ПВУ : а – струей нагретого воздуха в зоне циркуляции (патент РФ №2236472), б – тоже на участке разгрузки окатышей (патент РФ №2241048), в – тоже в холостой зоне (а.с. СССР №1747517), г – тоже многосопловой струей (патент РФ №2155239), д – одной ВШС в челночном режиме работы (патент РФ №2270875), е – ультразвуковым излучателем на участке разгрузки (а. с СССР №1678866), ж – барботированием слоя окатышей двухсопловой струей воздуха в зоне циркуляции (а.с. СССР №1705374), з – тоже с экранированием зоны барботирования и циркуляции (а.с. СССР №1719049), и – пористым поглотителем влаги (патент РФ №2280085)

Рисунок 1 – Технологические схемы, позволяющие организовать предварительное влагоудаление на участке окомкования

последовательным. Для выбора наиболее эффективной технологической схемы необходимо учитывать весь комплекс показателей, к которым можно отнести характер распределения пористости, размеры и форму пор, возможности влиять на коэффициент смятия зародышей, эффективность напыления влажной шихты на ШГ и другие показатели, которые трудно учесть в рамках предлагаемой работы. В настоящей статье ограничились основными параметрами (режим работы, сложность схемы, выход годного, относительное влагоудаление), которые непосредственно связаны с режимом ПВУ на участке окомкования. Характеристика технологических схем и результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика технологических схем и результаты экспериментов

№ технологической схемы (рис.1)	Показатели работы устройства			
	Режим работы	Сложность схемы	Выход годного, %	θ_w
а	Прямой последовательный	Простая	91,5	0,85
б	Прямой последовательный	Сложная	96,2	0,81
в	Совмещенный	Простая	94,4	0,97
г	Совмещенный	Простая	94,1	0,97
д	Совмещенный	Сложная	92,8	0,88
е	Прямой последовательный	Сложная	96,3	0,81
ж	Прямой последовательный	Простая	92,1	0,84
з	Прямой последовательный	Простая	92,5	0,84
и	Совмещенный	сложная	96,6	0,80

Процесс предварительного влагоудаления по схеме (а) организован с помощью СТО циркуляционной нагрузки окомкователя. Эта схема отличается универсальностью, поскольку применима для всех перспективных технологий получения окатышей: технологии принудительного зародышеобразования (ЗНД), технологий напыления влажной шихты на комкующиеся материалы (ЗОН, ЗОНД) так и для действующей технологии (ЗО) [1, 2]. Для тарельчатого окомкователя циркуляционная нагрузка – это кондиционные окатыши диаметром 14-16 мм, движущиеся по спиралеобразной траектории на поверхности слоя перед разгрузкой на транспортную ленту [1,3]. Это наиболее простая в аппаратном исполнении схема пред-

варительного влагоудаления, которая одновременно осуществляет наклеп поверхности (упрочнение) окатышей и срыв с её поверхности слабосвязанных частиц. Суть технологии заключается в термической обработке влажных окатышей струей воздуха, нагретого до 100 °С. При этом кондиционные окатыши динамическим давлением струи искусственно задерживаются на поверхности циркуляционного слоя в течение 5-15 с и обеспечивают частичное влагоудаление с поверхности окатышей. В этой технологии возможно применение большого числа управляющих воздействий на процесс ПВУ: скорость воздуха и его температура, угол атаки в двух плоскостях, количество струй (позиция ж), установка отражающего экрана (позиция з) и другие. Если окомкователь при этом работает в режиме ЗНД, то кондиционные окатыши имеют пониженное влагосодержание в центральной части гранулы, а СТО обеспечивает влагоудаление на поверхности окатышей, что позволяет получить окатыши с равномерным распределением влаги по сечению. Меньший результат дает применение СТО для окатышей, полученных по технологии ЗОН, у которых влажность поверхностного слоя ниже влажности центральных слоев.

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

Для схем (в) и (г) процесс влагоудаления является сопутствующим, поскольку основное назначение этих схем заключается в увеличении пути переката за счет ориентации комкуемых материалов в холостую зону окомкователя. Это позволяет увеличить производительность окомкователя по ВГ до 94,4 %. Ударное взаимодействие сырых окатышей с бортами тарели формирует упрочняющий наклеп и повышение прочности. Положительный эффект по влагоудалению достигается для окатышей, у которых размеры близки к кондиционным (диам. 14-16 мм), аналогично схеме (а). Это обусловлено тем, что для окатышей более низких размеров (диам. ме-

нее 14-16 мм), при доокомковании требуется более интенсивное увлажнение поверхности гранул. По конструктивному оформлению обе технологические схемы относятся к сравнительно простым решениям.

Схема (д) предполагает циклическое (челночное) напыление влажной шихты на поверхность материалов, комкуемых в рабочей зоне окомкователя по технологиям ЗОН или ЗОНД, необходимое для интенсификации роста массы оболочки окатыша. Процесс влагоудаления также является сопутствующим, но более эффективен по сравнению со схемами (в) и (г), поскольку процесс роста массы не нарушается, а, напротив, реализуется с более высокой скоростью. Сушится не тонкий поверхностный слой размером 0,5-1,0 мм, как в схемах (а) и (ж), а более массивный размером 2-3 мм.

Схема (е) отличается от схемы (б) установкой ультразвуковых излучателей на тракте подсушки окатышей, что безусловно усложняет аппаратное оформление способа. Эксперименты показали относительно невысокую эффективность ультразвука на слоевых процессах. Положительный эффект можно достичь повышением мощности и частоты излучателя, что требует относительно высоких энергетических и материальных затрат. Степень влагоудаления $\theta_w = 0,81$ можно повысить только путем удлинения тракта сушки, что также достаточно затруднительно.

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

Динамические параметры теплоносителя можно увеличить на 10-15 % в схеме (з), в которой зона барботажа и циркуляции окатышей снабжена экраном, препятствующим выбросу окатышей из рабочего пространства окомкователя. Экран целесообразно выполнять из эластичных материалов, в наименьшей степени деформирующих влажные окатыши.

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

Можно отметить, что в рассмотренных схемах влагоудаление является как основным, так и сопутствующим процессом. При реализации ос-

нового процесса (схема а, в, г) возможно нарушение процесса окомкования, что несколько ограничивает его возможности использования. Вынос этого процесса за рабочее пространство окомкователя (схемы б и е), несомненно, оправдывает задачу, но усложняет аппаратное оформление технологии. Поэтому более предпочтительным является комбинированный процесс получения окатышей, в котором основной процесс реализован по технологии ЗНД (схема и), а сопутствующий процесс влагоудаления организован по схемам (з) или (д). Последнее сочетание технологических схем предполагает совмещение основных технологических операций технологий ЗНД и ЗОН.

Выводы. Проанализированы технические схемы, реализующие методы предварительного влагоудаления железорудных окатышей в рабочем пространстве окомкователя и на участке окомкования, организованные с помощью струйной тепловой обработки. Проанализирован подход к тарельчатому окомкователю как к низкотемпературному теплотехническому агрегату, предназначенному для тепловой обработки слоя влажных окатышей на заключительной стадии окомкования и транспортировки окатышей к обжиговому агрегату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.

УДК 669. 162. 12:622

В.М. Павловец

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

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ, ОСНОВАННОМ НА ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИИ

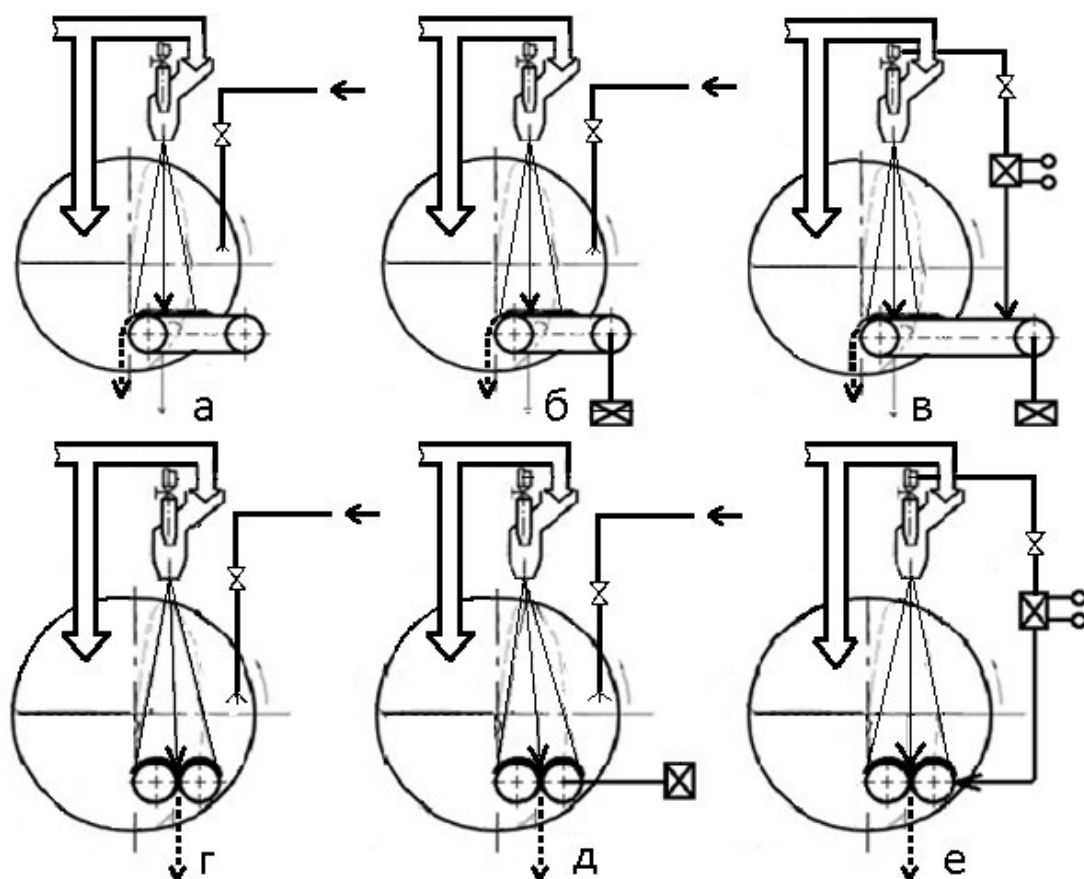
В работе проанализированы технические решения, направленные на управление процессом окомкования и зародышеобразования в технологии производства окатышей, основанной на принудительном зародышеобразовании.

The paper analyzes technical solutions aimed at controlling the process of pelletization and nucleation in pellet production technology based on forced nucleation.

Технология получения сырых окатышей на окомкователе по технологии ЗНД (зародышеобразование напылением и доокомкование) включает две основные стадии: формирование зародышей теплосиловым напылением влажной шихты на основу для напыления и формирование оболочки окатышей методом доокомкования. Для формирования зародышей необходимо последовательно загрузить влажную шихту в струйный аппарат, в корпусе которого она ускоряется сжатым воздухом с давлением P_v и температурой t_v . Напыление шихты для формирования напыленного слоя шихты (НС) может быть организовано на шихтовый гарнисаж (ШГ) в холстой зоне окомкователя или на движущуюся бесконечную транспортную ленту (ЭТЛ), расположенную в корпусе окомкователя, либо на вращающиеся металлические барабаны, конструктивно напоминающие вальцовый пресс в технологии брикетирования [1, 2]. После деления НС на зародыши формируется зародышевая масса определённой влажности, плотности, прочности, величина которых непосредственно зависит от давления ВШС. 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.

Целью работы явился анализ технических решений, направленных на управление процессом зародышеобразования путем установки в рабочем пространстве окомкователя основы для зародышеобразования в виде транспортной ленты или вращающихся барабанов.

Экспериментальные схемы, показанные на рисунке 1, были оформлены в виде объектов интеллектуальной собственности.



Схемы формирования НС и зародышей : а – напылением одной ВШС на движущуюся эластичную транспортную ленту (патент РФ №2297461), б – тоже с учетом взаимосвязи между скоростью ленты и скоростью напыления шихты (патент РФ №2347826), в – тоже с подогревом транспортной ленты нагретым сжатым воздухом (патент РФ №2387720), г – напылением одной ВШС на цилиндрические барабаны, вращающиеся во встречном направлении (патент РФ №2278172), д – тоже с увлажнением поверхности барабанов перед напылением и механической очисткой их поверхности (патент РФ №2385351), е – тоже с одновременным подогревом поверхности барабанов и сдуванием с поверхности барабанов остатков шихты нагретыми струями сжатого воздуха (патент РФ №2625857)

Рисунок 1 – Технические схемы, позволяющие формировать НС и зародыши на поверхности эластичной транспортной ленты и вращающихся металлических барабанов

На их основе были построены физические модели в масштабе 1:10, в которых окомкователь имел диаметр $D=0,62$ м, работал с частотой вращения 12 об/мин, а угол наклона тарели составлял 45° . Расход шихты на зародышеобразование не превышал 0,05 кг/с, что составляло 40 % от общей массы загружаемого материала. Остальная масса шихты поступала в окомкователь для формирования оболочки окатышей в режиме переката. В качестве основы для напыления шихты в первой серии экспериментов использовали бесконечную эластичную транспортерную ленту шириной 250 мм и длиной 450 мм, намотанную на цилиндрические барабаны диам. 100 мм. Один из барабанов был снабжен электроприводом с частотным регулированием мощности (схема б). Конструктивно устройство для формирования зародышей представляло собой конвейерный транспортер. Для удобства проведения экспериментов процессы зародышеобразования и доокомкования были организованы последовательно. Для этого сначала формировали зародыши, после чего накатывали шихтовую оболочку. Поэтому после формирования зародышей на ЭТЛ их загружали в рабочее пространство окомкователя и доокомковывали в режиме переката в течение 5 минут. Во второй серии экспериментов в качестве основы для напыления шихты и зародышеобразования использовали встречно вращающиеся металлические барабаны, установленные с зазором друг к другу в рабочем пространстве окомкователя. Эти схемы реализованы на принципе работы вальцевого пресса [3]. Для анализа эффективности экспериментальной схемы окатыши в количестве 0,5 кг отбирали после завершения процесса окомкования. Для них определяли влажность $W_{ок}$ стандартным методом ($t=105^\circ\text{C}$, $\tau=30$ минут), и которую сравнивали с влажностью загружаемой шихты ($W_{ш}$), определяя коэффициент безразмерной влажности θ_w ($\theta_w = W_{ок}/W_{ш}$), часто используемый для характеристики технологии принудительного зародышеобразования [1, 2]. Сложность экспериментальной схемы определяли по количеству конструктивных элементов схемы, налипанию шихты на детали схемы, по уровню стабильности работы, по появлению отказов и затруднений в работе при визуальном наблюдении за процессом. Выход годного (ВГ) являлся сопутствующим показателем. Численное значение выхода годного вычисляли по разности между массой загружаемой шихты и массой образовавшейся мелочи фракции ≤ 5 мм в течение определенного цикла зародышеобразования и доокомкования (5 минут). При определении ВГ учитывали, что годные окатыши имели размер 12-16 мм, а их прочность составляла более 0,5 кг/окатыш. Поэтому в настоящей статье ограничились основными параметрами (сложность схемы, выход годного, прочность зародышей, относительное влагоудаление), которые непосредственно связаны с режимом зародышеобразования на участке окомкования. Характеристика технических схем и результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика технических схем и результаты экспериментов

Номер технической схемы (рис.1)	Показатели работы устройства ЭТЛ-окомкователь			
	Сложность схемы	Выход годного, %	Прочность зародышей, кПа	θ_w
а	Простая	90,4	90-105	0,85
б	Сложная	92,6	90-105	0,85
в	Простая	86,3	95-110	0,83
г	Простая	81,1	82-95	0,84
д	Сложная	82,2	83-96	0,86
е	Сложная	79,8	84-96	0,83

Сущность первой технической схемы (а) заключается в напылении влажной шихты на поверхность эластичной ленты и деление напыленного слоя (НС) механическим путем на мерные зародышевые фрагменты. После чего полученные зародыши непрерывно загружаются в рабочее пространство окомкователя и в смеси с влажной шихтой комкуются в режиме перека с получением кондиционных окатышей. Подобная схема относится к технически сложным, но обладает существенным преимуществом – автономность и независимость от работы основного окомковательного агрегата. Это позволяет назначить технологические параметры окомкователя (угол наклона днища тарели, частоту вращения, условия увлажнения) по условиям деформации и формообразования зародышей рабочей зоны окомкователя. При этом существует техническое пространство между ЭТР и окомкователем для организованного воздействия на степень смятия зародышей. Достоинством этой схемы является возможность оребрения и модифицирования поверхности ЭТЛ, повышающих эффективность напыления шихты на эластичную основу. Схема, показанная на рисунке 1, а, позволяет увеличить коэффициент напыления шихты до 95-96 % при интенсивном увлажнении зоны напыления и поверхности НС. Подобные технические мероприятия реализовать на ШГ практически невозможно. На ЭТЛ возможна установка отражающих экранов для ориентации влажной шихты в окомкователь. Транспортная лента имеет некоторую степень свободы, позволяя ориентировать и загружать зародыши в любую зону окомкователя. Наличие дополнительной поверхности ЭТЛ позволяет прогнозировать повышение производительности всего комплекса агрегатов транспортная лента-окомкователь. Схема (а) позволяет менять расход, размеры и прочность зародышей в широких пределах. Она также позволяет организовать процесс влагоудаления в ходе напыления шихты. Устройство можно при необходимости снабдить экранами, а неокомкованная шихтовая мелочь способна организованно поступать в рабочее простран-

ство окомкователя. В качестве недостатка указанной схемы можно отнести отсутствие рабочего процесса формообразования шихты в холостой зоне окомкователя.

В схеме (б) реализован принцип согласованности между скоростью ленты и скоростью напыления, согласно которому скорость ленты необходимо увеличивать на 0,08-0,24 м/с при повышении расхода напыляемой шихты на 1,0 – 2,0 кг/с. Это необходимо для того, чтобы средняя высота НС не превышала величины 5-10 мм и позволяла в процессе доокомкования получить окатыши кондиционных размеров 12-16 мм. Для дополнительного регулирования процесса напыления возможно использовать параметры напыления струйного аппарата: диаметр, расстояние между соплом и напыляемой основой, коэффициент инжекции, подачу более эффективного увлажнителя или связки и др. Свойствами шихты (влажностью, грансоставом, наличием добавок) также можно влиять на эффективность напыления. Эта схема требует установки частотного регулятора мощности и является более сложной по сравнению с техническим решением (а).

В схеме (в) эластичную ленту подогревают до 250 °С перед напылением, позволяя за счет теплоотдачи к влажному слою шихты повысить степень влагоудаления у НС до $\theta_w = 0,83$. Здесь же предложено обеспечивать повышение равномерности фракционного состава зародышей вращающимся барабаном с ребрами (на схеме не показан), установленным на хвостовой части ЭТЛ. При напылении на водонепроницаемую ЭТЛ не происходит влагопереноса на нижней границе НС, в отличие от напыления на шихтовый гарнисаж. Меньшая величина θ_w позволяет в большей степени увеличить уплотнение шихты на жесткой поверхности ЭТЛ и повысить прочность зародышей на 3-5 %. Эта схема также относится к технически сложным решениям и имеет ограничения по температуре и выходу годного. Нагрев поверхности ЭТЛ позволяет усилить влагоудаление на границе НС-ЭТЛ, но одновременно ухудшает условия адгезии на этой границе и снижает выход годного. Чтобы исключить этот негативный процесс следует предпринять дополнительные технические меры: провести модификацию поверхности ТР, применять ПАВ в шихте, нанести клейкое покрытие на ТР, использовать отражающие экраны и применить другие известные инженерные решения.

Второе направление зародышеобразования связано с установкой в рабочем пространстве окомкователя встречно вращающихся металлических барабанов, установленных с зазором друг к другу и моделирующих работу вальцового пресса. Степень влагоудаления у зародышей ($\theta_w = 0,84-0,85$), полученным по этим схемам, близка к параметрам θ_w для схем (а-в). Однако условия напыления влажной шихты на криволинейную поверхность барабанов существенно хуже. Процесс сопровождается отскоком шихты и требует снижения мощности струйного аппарата (расхода и ско-

рости напыляемой шихты, давления воздуха) и сооружения отражающих экранов. В этой схеме трудно обеспечить равномерность напыления влажной шихты. Поэтому здесь самый низкий выход годного, более низкая прочность зародышей и большой разброс зародышей по размерам.

Основным достоинством проанализированных технических схем является использование техники напыления, позволяющей в напыленном зародышевом материале формировать открытую пористость и пониженное содержание влаги. Схемы (г), (д), (е) вполне работоспособны, но требуют очистки барабанов от остатков напыляемой шихты, что несколько усложняет аппаратное оформление этих способов. Для устранения этого недостатка предложено устанавливать механические скребки (схема г), предусматривать увлажнение поверхности барабанов перед напылением (схема д), а также организовывать одновременный подогрев поверхности барабанов и сдувание остатков шихты нагретыми струями сжатого воздуха (схема е). Эксперименты выявили основной недостаток в работе указанных схем в системе струйный аппарат – вращающиеся валки: большой разброс размеров получаемых зародышей и трудность регулирования этого процесса. Это объясняется сложностью напыления влажной шихты на криволинейную поверхность валков, наличием отскока и неконтролируемого налипания шихты. Несмотря на широкое распространение процесса брикетирования дисперсных материалов вальцовыми прессами, эксперименты показали необходимость дополнительной проработки технологии зародышеобразования на вращающихся валках с целью повышения стабильности процесса.

Выводы. Проанализированы технические схемы, реализующие методы принудительного зародышеобразования влажной шихты с помощью установки дополнительных механических устройств в рабочем пространстве окомкователя, в качестве которых предложено использовать поверхности эластичной транспортерной ленты и вращающихся металлических барабанов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке / В. М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / В.В. Ожогин. – Мариуполь : ПГТУ, 2010. – 442 с.

В.Б. Деев¹, Е.С. Прусов², С.В. Сметанюк¹, О.Г. Приходько³,
К.В. Пономарева³

¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

²ФГБОУ ВО «ВлГУ», г. Владимир

³ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗА НА ХАРАКТЕР КРИСТАЛЛИЗАЦИИ, ЛИТЕЙНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА

В статье приведены экспериментальные данные по влиянию различного содержания железа (0,3; 1,15; 2,0 масс. %) на свойства и характеристики заэвтектического силумина Al-15 % Si, полученного из вторичного сырья. Показано, что присутствие примеси железа в концентрациях, близких к критическим (~1,08 %), может оказывать положительное влияние на жидкотекучесть опытных сплавов. Дальнейшее повышение содержания железа существенно снижает механические и литейные свойства.

The paper presents experimental data on the influence of different iron content (0,3; 1,15; 2,0 wt. %) on properties and characteristics of hypereutectic silumin Al-15 % Si produced from secondary raw materials. It is shown that the presence of iron impurity at concentrations close to critical (~1,08 %) can have positive effects on the fluidity of experimental alloys. Further increasing of iron content significantly reduces mechanical and casting properties.

При изготовлении отливок из вторичных алюминиевых сплавов проблема загрязненности исходных шихтовых материалов вредными примесями, в первую очередь железом, привлекает неослабевающее внимание исследователей и практикующих специалистов [1 – 6]. Примесь железа в алюминиевых сплавах способствует образованию различных интерметаллических фаз с грубокристаллическим строением, существенно снижающих качество отливок [7]. Многие вопросы, связанные с влиянием разной концентрации железа на механические и литейные свойства силуминов, до настоящего времени изучены недостаточно. Особенно это касается силуминов заэвтектического состава. Заэвтектические алюминиево-кремниевые сплавы могут рассматриваться как естественные композиты, в которых роль эндогенной армирующей фазы играют частицы первичного кремния [8]. В этой связи характер влияния примесных элементов на изменение структурно-морфологических характеристик, технологических и эксплуатационных

свойств заэвтектических силуминов целесообразно анализировать с учетом особенностей поведения литейных композиционных сплавов [9].

В настоящей работе исследовали влияние различного количества железа (0,3; 1,15; 2,0 % (по массе)) на процесс кристаллизации, литейные и механические свойства силумина с содержанием 15 % Si (по массе). Экспериментальные плавки проводили в печи ИСТ-0,06 с использованием флюса, содержащего: 13 % KCl, 62 % NaCl, 25 % NaF. Шихта состояла из возврата и лома сплава Al-15 % Si (по массе), возврата отливок из сплава АК12, лигатуры Al-Fe (45 %). После загрузки расчетного количества шихтовых материалов в печь расплав перегревали до температуры 800-850 °С. Температура заливки проб и образцов составляла 730-740 °С. Для определения жидкотекучести использовали кокильную прутковую пробу (с диам. прутка 5 мм). Заливали образцы для изучения механических свойств. При исследовании свойств и характеристик опытных сплавов в ходе прямых измерений для каждой серии экспериментов рассчитывали среднее арифметическое полученных значений измеряемой величины.

Для исследования кристаллизационных и усадочных процессов использовали специальное устройство [10], в работу которого заложены методы термического анализа, дифференциального термического анализа, а также метод термо ЭДС. В состав устройства входят первичные датчики (хромель-алюмелевые термодпары), аналого-цифровой преобразователь ИРС CON 7018 и персональный компьютер. Исследования проводили на образцах опытных сплавов длиной 300 мм и диаметром 26 мм.

В таблице 1 приведены результаты исследований процесса кристаллизации и свойств заэвтектического силумина Al-15 % Si с различным содержанием железа.

Таблица 1 – Свойства сплава Al-15 % Si (по массе) с различным содержанием железа

Свойства сплава	Содержание железа в сплаве, %		
	0,3	1,15	2,0
Температура ликвидус, °С	651	619	630
Температура солидус, °С	575	572	584
Время эвтектической кристаллизации, мин.	6,2	7,6	7,2
Жидкотекучесть, мм	94	137	115
Линейная усадка, %	1,55	2,32	2,20
σ_B , МПа	183	152	132
δ , %	1,36	1,11	0,51

Из таблицы 1 видно, что повышение количества железа до 1,15 % снижает температуру ликвидус сплава. Однако с увеличением железа до 2,0 % температура ликвидус становится выше, чем при 1,15 % Fe, но остается значительно ниже, чем у сплава с 0,3 % Fe. Температура солидус при содержании 1,15 % Fe несколько ниже, чем у исходного сплава, а при 2 % Fe выше. Железо увеличивает и время эвтектической кристаллизации. При этом это увеличение не пропорционально росту содержания железа – при 1,15 % Fe оно больше, чем у исходного сплава, а при 2 % Fe снова уменьшается, но незначительно.

При содержании 1,15 % Fe в заэвтектическом силумине жидкотекучесть последнего существенно увеличивается (более чем на 45 %). Однако увеличение концентрации железа до 2 % Fe вновь ее снижает, хотя и не до значений исходного сплава. Это явление можно объяснить с позиций физико-химических и гидродинамических процессов. Известно, что алюминий является очень активным металлом и образует при взаимодействии с кислородом плотную и прочную пленку Al_2O_3 , которая тормозит течение расплава. Наличие в сплаве железа разрыхляет эту оксидную пленку и тем самым увеличивает жидкотекучесть.

Наряду с этим, повышению жидкотекучести сплава может способствовать изменение дисперсности и морфологии кристаллов первичного кремния. Сделано предположение [11], что тройные железосодержащие интерметаллидные соединения $\delta-Al_4FeSi_2$ и $\beta-Al_5FeSi$ могут выступать как подложки для кристаллизации первичного кремния в заэвтектических силуминах. Зависимость критической для литейных и механических свойств концентрации железа от содержания кремния в алюминиево-кремниевых сплавах предложена Дж. Тэйлором [12]:

$$Fe_{кр} \approx 0,075 \cdot [Si, \text{масс.}\%] - 0,05$$

Превышение критической концентрации железа приводит к резкому ухудшению литейных и механических свойств отливок вследствие формирования крупных интерметаллидных включений неблагоприятной формы. Согласно приведенному уравнению, для рассматриваемого силумина критическое содержание железа составит $\sim 1,08$ %, что близко к его содержанию в сплаве, показавшем наилучший результат по жидкотекучести в проведенной серии экспериментов. Повышение содержания железа до 2 % приводит к образованию двойных интерметаллидов $FeAl$, $FeAl_3$ и др., что увеличивает вязкость сплава и уменьшает жидкотекучесть. Физическая природа жидкотекучести композиционных сплавов, содержащих взвешенные частицы, более сложна по сравнению со стандартными литейными сплавами и в основном определяется объемной долей присутствующих частиц. В наиболее простом случае характер такого изменения описывается уравнением Эйнштейна для эффективной вязкости суспензий:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + k \cdot V_p),$$

где η и η_0 – значения динамической вязкости композиционного и неармированного расплавов, соответственно; V_p – объемная доля частиц; k – коэффициент формы частиц. Уравнение справедливо только в области низких концентраций дисперсных частиц (до 1 % (по объему)). Анализируемые сплавы содержат более высокие концентрации частиц, в роли которых выступают кристаллы первичного кремния и интерметаллидные соединения различной стехиометрии, поэтому зависимость изменения их вязкости будет иметь более сложный характер [13]:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = A + B \cdot V_p + C \cdot V_p^2 + \dots,$$

где $A = 1$; $B = 2,5$; $C = 6,2..7,35$ по различным оценкам.

Результаты выполненных экспериментальных исследований влияния железа на критические точки и литейные свойства заэвтектического силумина свидетельствуют о неоднозначном характере изменения свойств и характеристик опытных сплавов при увеличении концентрации железа. Свойства, связанные с кристаллизацией сплава – время кристаллизации эвтектики, жидкотекучесть, усадка – при содержании 1,15 % Fe имеют более высокие значения, чем при 0,3 % Fe, однако дальнейший рост содержания железа до 2 % вновь уменьшает эти свойства. Таким образом, различное количество железа в заэвтектическом силумине оказывает существенное влияние на его процесс кристаллизации. При 1,1 % Fe в силуминах образуется эвтектика, а при 2 % Fe – перитектика [14]. Наряду с описанными выше закономерностями, эти различные реакции в сплаве также будут оказывать влияние на литейные свойства.

Однако с увеличением содержания железа выше критического значения механические свойства сплава значительно снижаются (таблица 1). При содержании 2 % Fe прочность на растяжение σ_B уменьшается в 1,4 раза, а пластичность δ – в 2,6 раза по сравнению со сплавом с 0,3 % Fe. В то же время, наличие примеси железа в количестве 1,15 % приводит к сравнительно небольшому снижению прочности и пластичности опытных сплавов. Детальное объяснение наблюдаемых закономерностей изменения литейных и механических свойств заэвтектических силуминов в зависимости от содержания примеси железа требует проведения дальнейших экспериментальных исследований в этом направлении.

Выводы: Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что присутствие примеси железа в концентрациях, близких к критическим (~1,08 %), может оказывать положительное влияние на жидкотекучесть заэвтектического силумина Al-15 % Si. Дальнейшее повышение содержания железа до 2 % существенно снижает механические и литейные свойства вследствие формирования крупных интерметаллидных включений неблагоприятной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каленик О.Н. Снижение концентрации железа во вторичных алюминиевых сплавах / О.Н. Каленик, Б.М. Немененок, Г.В. Довнар, В.Л. Трибушевский // *Металлургия машиностроения*. – 2004. – № 3. – С. 23–25.
2. Батышев К.А. Алюминиевый лом в литейном производстве / К.А. Батышев // *Рынок вторичных металлов*. – 2005. – № 4(30). – С. 50–52.
3. 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.
4. 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. 19–21.
5. Деев В.Б. Развитие научных основ тепловых и электромагнитных воздействий на расплавы и разработка ресурсосберегающих технологий получения высококачественных отливок из алюминиевых сплавов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических 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 и др. // *Литейщик России*. – 2007. – № 8. – С. 18–23.
7. Mbuya T.O. Influence of Iron on Castability and Properties of Aluminum Alloys: Literature Review // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2003. – Vol. 16. – No. 5. – P. 451-465.
8. Wang H. In-Situ Si/Al Composite Produced by Semisolid Metal Processing // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2007. – Vol. 22. – Iss. 6. – P. 696-699.
9. Кечин В.А., Прусов Е.С. Элементы в первичном алюминии: генезис и классификация // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – № 1. – С. 18-21.
10. Патент РФ на полезную модель № 88353. Устройство комплексного контроля качества сплавов / В.Б. Деев, О.Г. Приходько, И.Ф. Селянин и др. // Заявка № 2009124954/22. Приоритет 29 июня 2009 г. Опубл. 10.11.2009 г. Бюл. № 31.
11. Suarez M.A., Figueroa I., Cruz A., Hernandez A., Chavez J.F. Study of the Al-Si-X System by Different Cooling Rates and Heat Treatment // *Materials Research*. – 2012. – Vol. 15. – No. 5. – P. 763-769.
12. Taylor J.A. Iron-containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys // *Procedia Materials Science*. – 2012. – Vol. 1. – P. 19-33.
13. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г.С. Ходаков // *Российский химический журнал*. – 2003. – Т. XLVII, № 2. – С. 33–44.
14. Металловедение алюминия и его сплавов / Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.И. и др. // М.: *Металлургия*, 1983. – 230 с.

УДК 669.046.564:621.785

М.В. Темлянцев, К.С. Коноз, О.В. Кузнецова, Э.Я. Живаго,
В.Я. Целлермаер

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ МАРКИ 40С2 И ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ЕЕ ОКАЛИНЫ

В статье представлены результаты исследования кинетики высокотемпературного окисления стали марки 40С2. Для осуществления прогнозных расчетов получено уравнение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева. Исследованы особенности строения, химического и фазового состава окарины, образующейся при высокотемпературном нагреве стали марки 40С2.

The article presents the results of a study of the kinetics of high-temperature oxidation grade steel 40S2. For the implementation of calculations of the derived equation to determine the heat depending on the temperature and time of heating. Investigated features of the structure, chemical and phase composition of the scale formed at high temperature by heating the steel grade 40S2.

Кремнистые стали получили широкое распространение для производства пружин, рессор различного назначения и упругих элементов железнодорожных креплений соединения рельсов со шпальной решеткой [1 – 3]. Круглый прокат для изготовления пружин получают посредством горячей прокатки непрерывнолитых заготовок, которые нагревают в методических печах. Высокотемпературный нагрев сопровождается окаринообразованием, приводящим к потерям металла и формированием на поверхности заготовок слоя окарины, который может приводить к снижению качества поверхности круглого проката [4, 5]. Существенную роль при этом играют строение и свойства образующейся окарины [5, 6]. При разработки технологии нагрева и назначении температурных режимов, обеспечивающих металлосберегающий нагрев [7 – 9] необходимы сведения о кинетике окисления стали. Поскольку точные аналитические решения для нахождения зависимости интенсивности окисления сталей различного химического состава отсутствуют единственным путем получения таких зависимостей является эмпирический. В связи с этим получение новой информации о кинетике высокотемпературного окисления пружинных сталей и особен-

ностей строения их окарины актуально и имеет большое практическое значение.

В данной работе проведено исследование кинетики высокотемпературного окисления стали марки 40С2 (химический состав, %: 0,377 С; 1,604 Si; 0,65 Mn; 0,204 Cr) и особенностей строения, фазового и химического состава ее окарины. Кинетику окисления исследовали с помощью гравиметрического метода на цилиндрических образцах диам. 11 мм, длиной 20 – 30 мм. Образцы вырезали из отрезков круглого проката. Перед вырезкой образцов стержни отжигали и обтачивали на токарном станке с целью полного удаления обезуглероженного слоя.

При проведении лабораторных экспериментов нагрев образцов до температур 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150 и 1200 °С и выдержку при постоянной температуре поверхности в течении 5, 15 и 25 мин проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха.

Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Термопару устанавливали в высверленное отверстие в центре образца диаметром 3 мм и глубиной 12 мм. Температуры образца фиксировали с помощью прибора «Термодат19Е2».

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

При обработке экспериментальных данных считали, что зависимость угара (или толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня, который отражает диффузионный механизм окаринообразования, температура поверхности металла постоянна во времени и зависимость угара от температурно-временного фактора подчиняется следующему уравнению [4]:

$$Y = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где k – константа скорости окисления, г/(см² · мин^{0,5}); τ – время выдержки металла при постоянной температуре, мин.

Для соотношения (1) принимают, что константа скорости окисления подчиняется уравнению Аррениуса, которое можно представить в виде

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

где A – эмпирический коэффициент, зависящий от химического состава стали, состава атмосферы и других факторов, г/(см² · мин^{0,5}); Q – энергия активации или разрыхления решетки оксида, Дж/кмоль; $R = 8,3143$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К); T – температура, К.

Принимая $B = Q/R$, соотношение (2) записывают в виде

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (3)$$

где коэффициент B имеет размерность К.

На рисунке 1 представлена зависимость угара Y стали марки 40С2 от температуры t и времени τ выдержки при постоянной температуре, построенная по результатам экспериментальных данных.

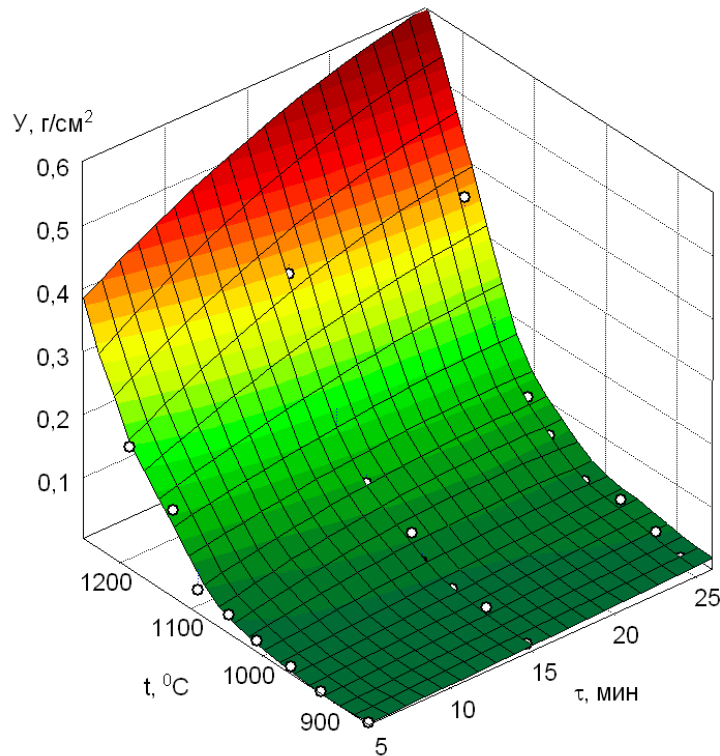


Рисунок 1 – Зависимость угара стали марки 40С2 от температуры и времени выдержки

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

$$Y = 22371,9 \cdot \exp(-18435/T) \cdot \sqrt{\tau} \quad (4)$$

Анализ полученных результатов показывает, что температурно-временная зависимость угара стали марки 40С2 аналогична зависимостям, близким по химическому составу сталям марок 60С2 и 60С2ХА [4, 10, 11]. В области температур 1050 – 1100 °С наблюдается резкая интенсификация угара. Для стали марки 40С2 температура оказывает более сильное влияние на угар по сравнению со сталью марки 60С2ХА. В частности при времени выдержки 25 мин повышение температуры с 850 до 1175 °С для стали марки 40С2 сопровождается ростом угара с 0,016 до 0,367 г/см², т.е. почти в 23 раза, а для стали марки 60С2ХА с 0,019 до 0,270 г/см², т.е. в 14 раз. Для стали марки 40С2 в области температур 850 – 950 °С характер-

но менее интенсивное окалинообразование по сравнению со сталью марки 60С2ХА, а для температур более 1150 °С наоборот.

Исследование структуры, химического и фазового состава окалины проведено в НИТУ «МИСиС» на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA 3 с энергодисперсионной приставкой OXFORD AZtec для микрорентгеноспектрального анализа. Образцы для анализа были отобраны от пластинок окалины толщиной 1 – 1,5 мм с образцов, нагретых до 1175 °С, время выдержки составило 25 мин. После нагрева образцы с окалиной охлаждали на атмосферном воздухе в условиях естественной конвекции.

На рисунке 2 представлен общий вид микроструктуры окалины. Слой гематита, граничащий с атмосферой печи имеет минимальную толщину – порядка 40 – 60 мкм, слой магнетита имеет толщину порядка 250 – 280 мкм, наибольшую толщину 800 – 900 мкм имеет слой вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом, граничащий с поверхностью стали.

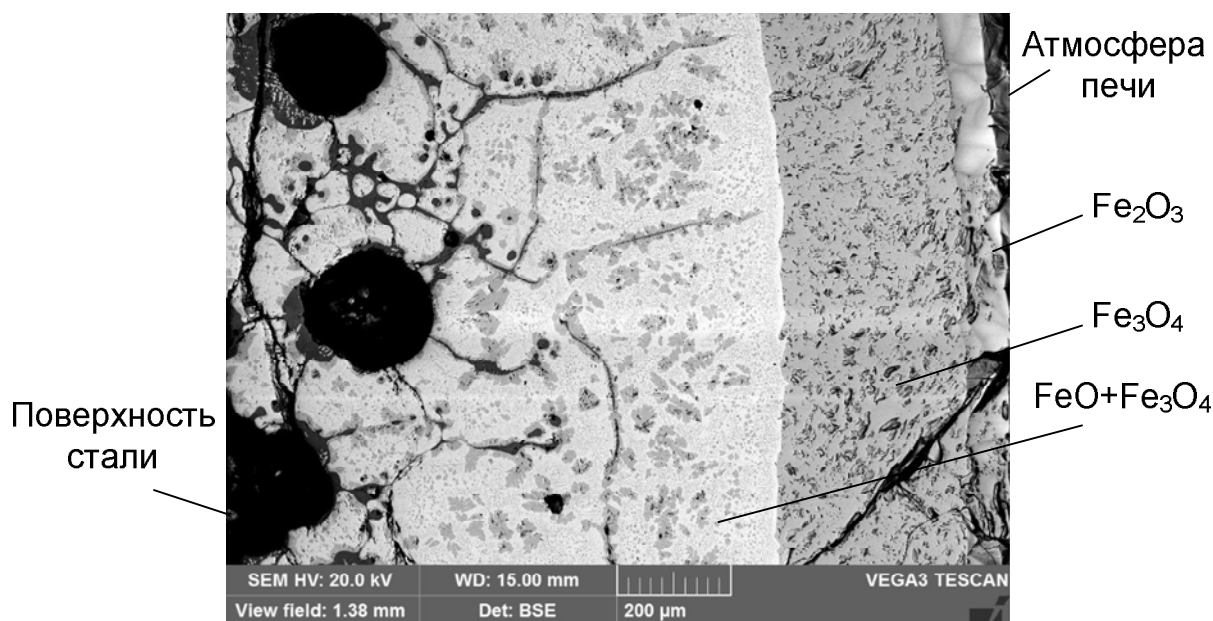


Рисунок 2 – Микроструктура окалины

Химический и фазовый составы слоев гематита и магнетита относительно равномерны по толщине и периметру (рисунок 3). В таблице 1 представлены их составы в различных точках слоев.

Слой окалины, прилегающий к поверхности стали (рисунок 4) характеризуется гораздо большей макроструктурной, химической и фазовой неоднородностью (таблица 2). Помимо вюститито-магнетитовой смеси присутствуют силикаты железа, характеризующиеся повышенным (до 13 % масс.) содержанием кремния.

По мере приближения к поверхности стали количество участков, обогащенных кремнием увеличивается

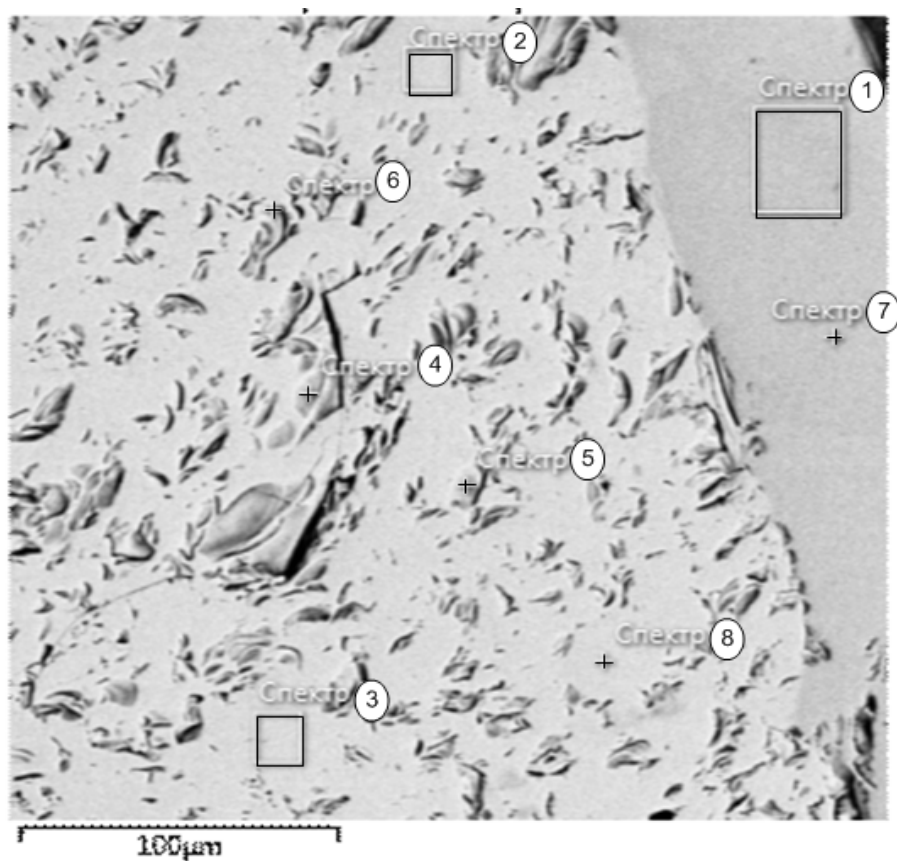


Рисунок 3 – Микроструктура слоев гематита и магнетита

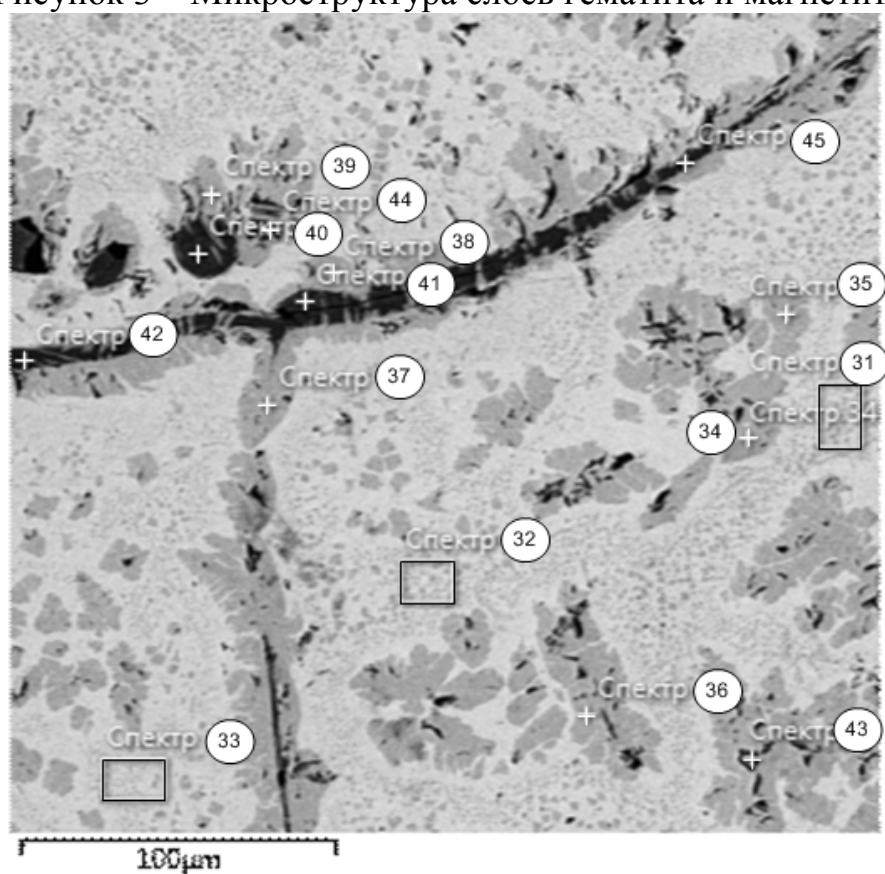


Рисунок 4 – Микроструктура слоя вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом

Таблица 1 – Химический состав (масс. %) слоев гематита и магнетита

№ спектра	O	Si	P	S	Mn	Fe	Сумма
1 гематит	33,52	0,09	0	0	0,08	66,31	100
7 гематит	34,11	0,06	0,03	0	0,1	65,7	100
2 магнетит	31,37	0	0,02	0,03	0,44	68,14	100
3 магнетит	31,17	0,06	0	0,02	0,52	68,23	100
4 магнетит	31,52	0	0	0,03	0,42	68,02	100
5 магнетит	31,21	0,02	0	0,01	0,45	68,3	100
6 магнетит	31,86	0,02	0	0,01	0,37	67,74	100
8 магнетит	30,19	0,12	0,03	0,03	0,48	69,16	100

Таблица 2 – Химический состав (масс. %) слоя вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом

№ спектра	O	Si	P	S	Mn	Fe	Cu	Mo	Сумма
31 вюстит+магнетит	27,58	0,4	0	0,03	0,55	71,44	–	–	100
32 вюстит+магнетит	27,97	0,06	0,02	0,05	0,42	71,49	–	–	100
33 вюстит+магнетит	27,37	0,04	0,01	0,03	0,43	72,12	–	–	100
34 вюстит+магнетит	31,02	0,02	0	0,05	0,42	68,5	–	–	100
35 вюстит+магнетит	31,77	0,44	0,02	0	0,35	67,43	–	–	100
36 вюстит+магнетит	31,44	0,01	0,01	0,02	0,4	68,12	–	–	100
37 вюстит+магнетит	31,24	0,3	0,02	0	0,31	68,12	–	–	100
38 вюстит+магнетит	31,1	0,33	0	0,04	0,35	68,17	–	–	100
39 вюстит+магнетит	31,67	0,22	0	0	0,36	67,75	–	–	100
40 силикаты железа	36,74	13,58	0,08	0,03	1,61	47,96	–	–	100
41 силикаты железа	36,26	13,48	0,14	0	1,65	48,47	–	–	100
42 силикаты железа	36,04	13,34	0,14	0	1,35	49,14	–	–	100
45 силикаты железа	31,87	7,39	0,01	0,02	1,09	59,62	–	–	100
43 силикаты железа	26,72	2,12	0	0,05	0,3	70,24	0,22	0,35	100
44 силикаты железа	31,77	1,61	0,04	0,04	0,45	66,09	–	–	100

Выводы: Исследовано влияние температурно-временного фактора на кинетику окисления кремнистой рессорно-пружинной стали марки 40С2. Для осуществления прогнозных расчетов получено уравнение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева. Установлено, что в области температур 1050 – 1100 °С наблюдается резкая интенсификация угара, для стали марки 40С2 в области температур 850 – 950 °С характерно менее интенсивное окалинообразование по сравнению со сталью марки 60С2ХА, а для температур более 1150 °С наоборот. С применением электронной сканирующей микроскопии исследовано строение окарины. Установлено, что слой гематита, граничащий с атмосферой печи имеет минимальную толщину – порядка 40 – 60 мкм, слой магнетита имеет толщину порядка 250 – 280 мкм, наибольшую толщину 800 – 900 мкм имеет слой вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом, граничащий с поверхностью стали. Химический и фазовый

составы слоев гематита и магнетита относительно равномерны по толщине и периметру. Слой окалины, прилегающий к поверхности стали характеризуется гораздо большей макроструктурной, химической и фазовой неоднородностью. Помимо вюститно-магнетитовой смеси присутствуют силикаты железа, характеризующиеся повышенным содержанием кремния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – М. : Металлургия, 1984. – 359 с.
2. Технология производства прутковых пружинных клемм / С.А. Семихатский, Ю.А. Панфилов, А.И. Кузнецова, Д.А. Шушарин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 10. – С. 43 – 48.
3. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. – М.: Интекст, 2002. – 2008.
4. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М. : Теплотехник, 2006. – 200 с.
5. Нагрев стальных слябов / Перетяtko В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
6. Перетяtko В.Н., Темлянцев Н.В. Исследование влияния строения поверхностных слоев стали на удаление окалины после высокотемпературного нагрева слябов под прокатку // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – Вып. 16. – С. 63 – 70.
7. Нагрев под прокатку непрерывнолитых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянцев, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин, Н.В. Темлянцев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 69, 70.
8. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянцев, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, Л.Т. Кожеурова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 12. – С. 47 – 49.
9. Филиппова М.В., Перетяtko В.Н., Темлянцев М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2016. – 269 с.
10. Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – №3. – С. 50–52.
11. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА / М.В. Темлянцев, К.С. Слажнева, А.Ю. Дзюба, А.А. Уманский, Н.В. Темлянцев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – Вып.33. – С. 55–63.

А.А. Уманский¹, В.В. Дорофеев², А.В. Головатенко², В.Н. Кадыков¹,
А.В. Добрянский²

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

² АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк

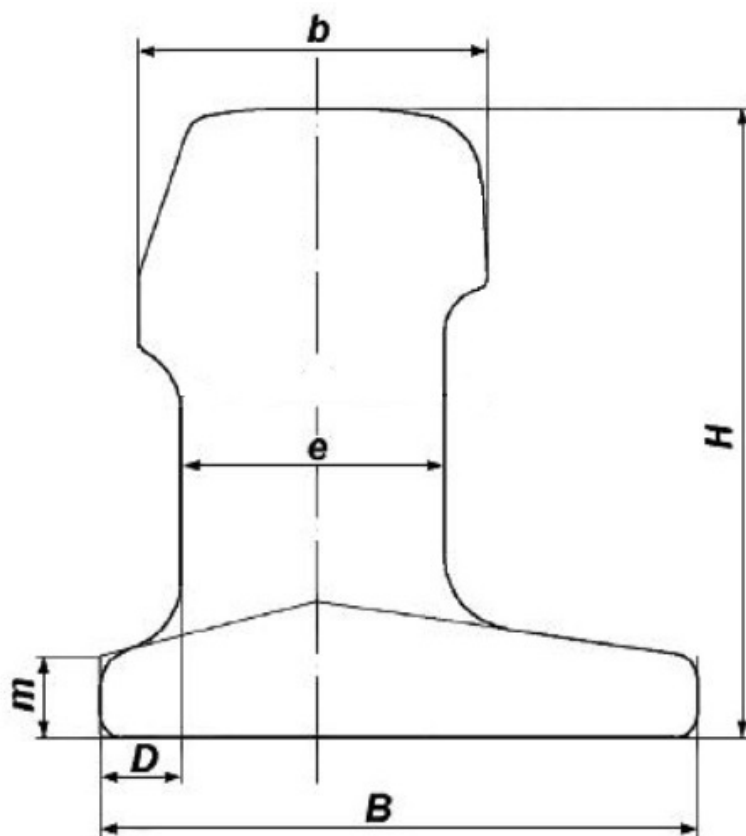
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ ОСТРЯКОВЫХ РЕЛЬСОВ НА УНИВЕРСАЛЬНОМ РЕЛЬСОБАЛОЧНОМ СТАНЕ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ прокатки остряковых рельсов ОР65, внедрение которого на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило повысить производительность стана на 39,8 т/час и уменьшить отбраковку готовых рельсов по пленам прокатного происхождения на 0,5 %. Экономическая эффективность от внедрения нового режима прокатки составила 29,7 млн. руб/год.

Based on the results of theoretical and experimental studies, a new method for rolling the switchgear rails OR65 has been developed. Its introduction on the universal rail mill of «EVRAZ ZSMK» allowed to increase the mill's productivity by 39.8 t/h and to reduce the rejection of finished rails by 0.5 %. Economic efficiency from the introduction of the new rolling regime amounted to 29.7 million rubles per year.

В последние годы наблюдается четко выраженная тенденция к повышению требований к качеству железнодорожных переводов, что обусловлено увеличением скорости движения железнодорожных поездов [1-3]. Имеющиеся данные позволяют говорить о том, что основными причинами брака при изготовлении остряковых переводов являются неудовлетворительная геометрия и разброс величин остаточных напряжений в исходных заготовках – остряковых рельсах [4]. Поэтому улучшение качества остряковых рельсов на сегодняшний день является актуальной задачей.

Профиль рельса острякового имеет ярко выраженную асимметричную форму (рисунок 1), что обуславливает значительные трудности при освоении производства таких профилей на современных универсальных рельсобалочных станах. Приведенный тезис подтверждается практическим опытом освоения производства остряковых рельсов на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), имеющем в своем составе две последовательно расположенные двухвалковые реверсивные обжимные клетки (BD1 и BD2) и смещенный относительно линии прокатки универсальный тандем-стан, состоящий из двух универсальных и одной вспомогательной двухвалковой клетки, а также отдельно расположенной чистовой универсальной клетки (рисунок 2).



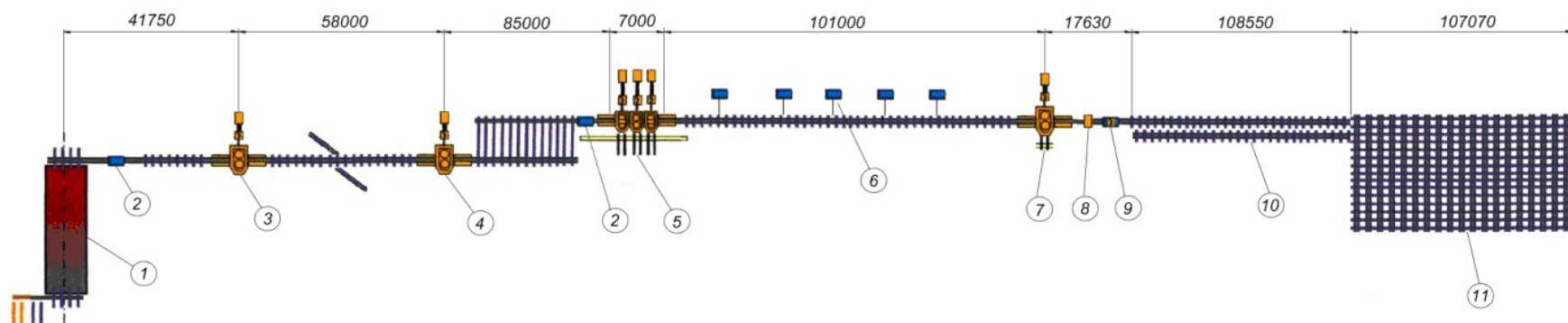
H – высота рельса; b – ширина головки; e – толщина шейки;
 B – ширина подошвы; D – ширина короткого плеча подошвы;
 m – высота пера подошвы

Рисунок 1 – Профиль поперечного сечения остряковых рельсов

В соответствии с контрактной калибровкой поставщика оборудования рельсобалочного стана (компании «SMS Meer») схема прокатки остряковых рельсов типа ОР65 включала в себя следующие основные этапы:

- семь проходов в ящичных калибрах клетки BD1 с получением прямоугольного подката;
- пять проходов в клетки BD2, в том числе первый проход – в калибре «лежачая трапеция», второй и третий проходы – в калибре «стоячая трапеция», четвертый проход – в разрезном рельсовом калибре закрытого типа, пятый проход – в подготовительном рельсовом калибре открытого типа;
- прокатку в клетях тандем-стана за три прохода, в том числе – первый проход в универсальной клетке UR и вспомогательной (эджерной) клетке E, второй проход – в клетке UR; третий проход – последовательно во всех трех клетках тандем-стана (UR, E, UF).

Практический опыт производства остряковых рельсов по вышеописанной схеме позволил выявить ряд ее значительных недостатков:



- 1 – нагревательная печь; 2 – устройство гидросбива окалины;
 3, 4 – обжимные клетки BD1 и BD2; 5 – тандем-группа клеток;
 6 – пилы горячей резки; 7 – чистовая клеть; 8 – лазерный профилемер;
 9 – клеймитель; 10 – участок дифференцированной закалки;
 11 – участок холодильника

Рисунок 2 – Схема расположения оборудования универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

1. При прокатке в клети BD2 имело место скручивание раскатов на выходе из калибров, что значительно затрудняло или, в ряде случаев, делало невозможной задачу раската в последующий калибр. Попытки решения указанной проблемы за счет внедрения прокатки с принудительной задачей раската в калибры (прокатка с «затравкой») приводили к значительному повышению отбраковки рельсов по дефекту «плена», а также – к увеличению цикла прокатки в клети BD2.

2. В закрытом ручье разрезного рельсового калибра происходило интенсивное налипание металла по периметру стенок, что являлось следствием значительной разности в диаметрах валков, а именно разности окружных скоростей по элементам калибра. При этом указанная разница в диаметрах валков создавалась искусственно с целью уменьшения изгиба переднего конца раската в сторону закрытого ручья калибра, происходящего вследствие значительного защемления раската в закрытых фланцах. Такой режим прокатки приводил к повышению частоты аварийных ситуаций. Имевшее место налипание металла на прокатные валки обуславливало дополнительные текущие простои прокатного стана, а также увеличение количества дефектов типа «плена» и «отпечаток» на готовых рельсах.

С целью устранения указанных недостатков на первом этапе провели корректировку схемы прокатки остряковых рельсов путем ввода двух дополнительных проходов – в разрезном рельсовом калибре закрытого типа и в открытом рельсовом калибре (рисунок 3 а). Разрезка раската за два прохода и два прохода в открытом рельсовом калибре обеспечили прямолинейный выход раскатов из этих калибров без операции «затравки», что позволило значительно снизить количество дефектов в виде плен прокатного происхождения.

Однако, несмотря на то, что усовершенствование технологии прокатки рельсов остряковых привело к ощутимым преимуществам при их производстве по сравнению с контрактной схемой прокатки, увеличение количества проходов в клети BD2 приводило к снижению производительности стана.

Для устранения указанных недостатков был разработан новый способ прокатки рельсов остряковых с интенсифицированным режимом обжатий в клети BD1, уменьшенным количеством проходов в клети BD2 и применением разрезного рельсового наклонного калибра с разъемами по диагонали взамен разрезного рельсового калибра закрытого типа (рисунок 3 б). Возможность интенсификации режима деформации в клети BD1 была обоснована предварительными расчетами усилия прокатки в ящичных калибрах этой клети (рисунок 4). При проведении расчетов использовали ранее разработанную методику определения сопротивления рельсовой стали пластическому деформированию [5-9].

В результате внедрения нового режима прокатки рельсов ОР65 за счет снижения количества проходов в клети BD2 достигнуто уменьшение

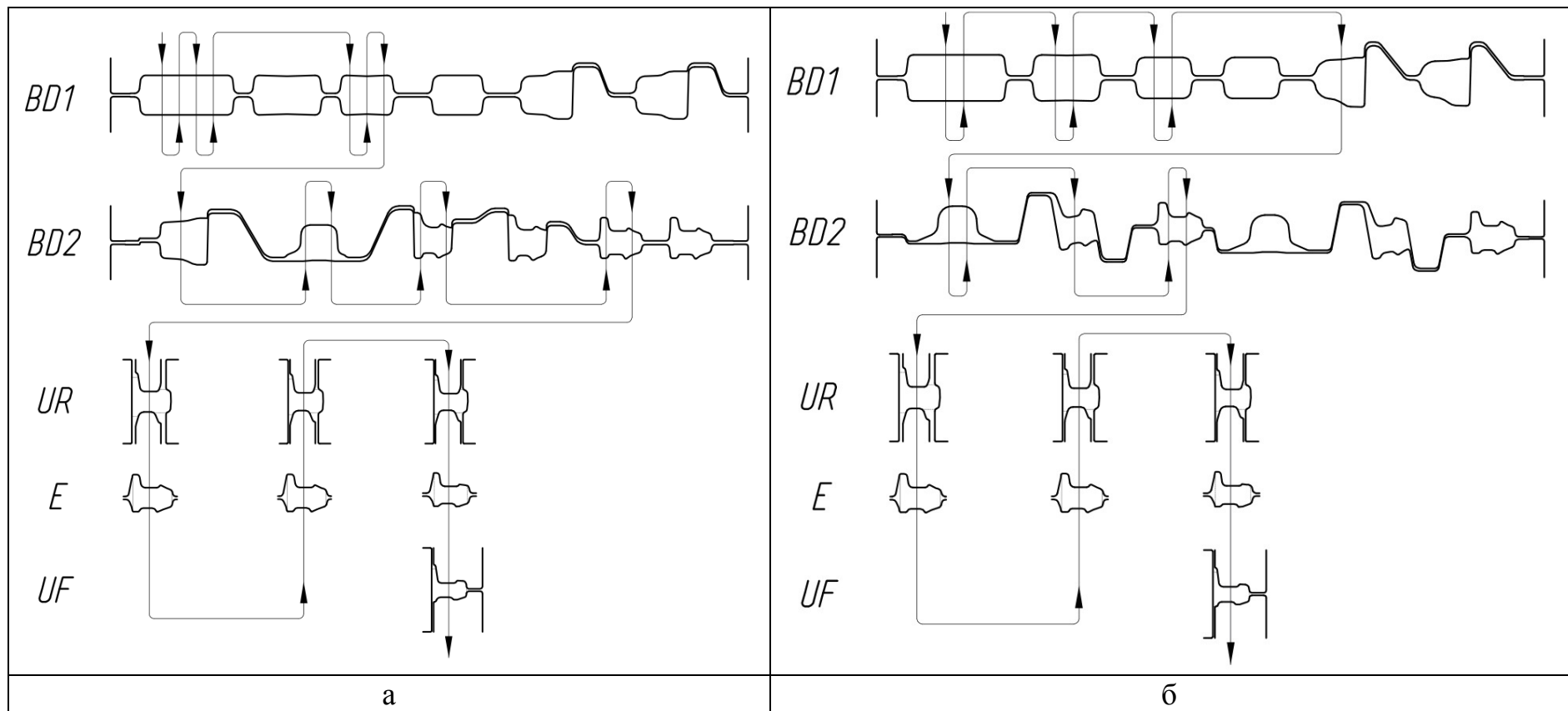


Рисунок 3 – Контрактная (а) и усовершенствованная (б) схема прокатки острьяковых рельсов типа ОР65 на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

цикла прокатки на 22,5 с, что обусловило повышение производительности стана при производстве данного вида продукции на 39,8 т/час. Экономический эффект от повышения производительности стана составил 29,7 млн. руб./год.

Кроме того, использование наклонного расположения рельсового калибра позволило:

- обеспечить возможность переточки валков без изменения ширины калибров;
- повысить интенсивность обжатия;
- устранить опасность окова валков раскатом вследствие диагонального расположения закрытых и открытых фланцев;
- облегчить за счет большого выпуска задачу раската в валки;
- сконструировать калибры в валках по нейтральной линии калибра, (с одинаковым диаметром нижнего и верхнего валков).

По фактическим данным облегчение условий задачи раската в валки при использовании нового режима прокатки позволило снизить отбраковку готовых рельсов ОР65 по дефекту «плена» на 0,5 %.

Согласно разработанной схеме прокатки контроль ширины фланцев подошвы и головки профиля раската после первого и третьего четырехвалкового калибров производится во вспомогательных открытых двухвалковых калибрах эджерной клетки. Окончательное же оформление профиля

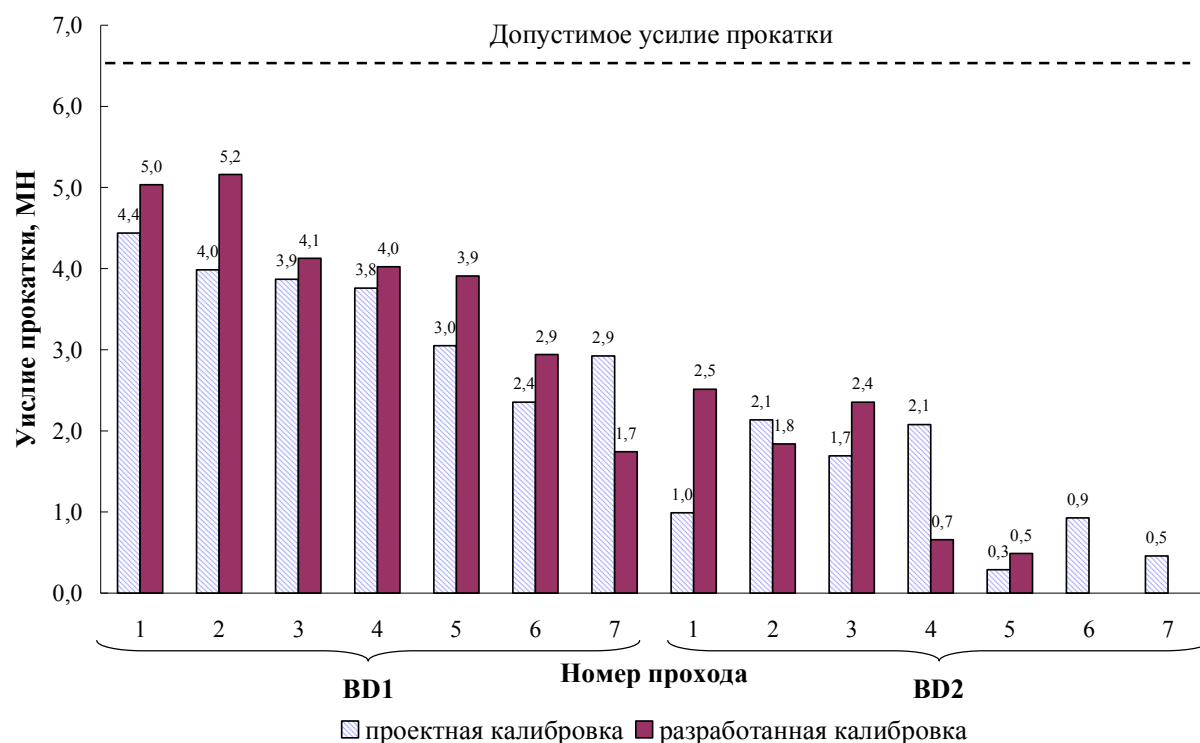


Рисунок 4 – Расчетные усилия прокатки при деформации в обжимных клетях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

острякового рельса осуществляется в трехвалковом чистовом универсальном калибре. Ручьи данного калибра, формирующие головку рельса, конструируются по тем же правилам, что и для двухвалковых чистовых калибров с разъемом валков посередине поверхности катания головки профиля, а подошва – формируется в трехвалковом участке калибра, где размер ширины подошвы выполняется за счет свободного уширения металла в разъемах валков (рисунок 5 а). Соответственно уширение короткого и длинного плеча подошвы профиля (ΔB_ϕ) складывается из естественного уширения (ΔB_e), вследствие основного обжатия этих элементов в калибре, и вынужденного уширения, которое появляется в результате дополнительного обжатия местных наплывов металла у вершин короткого и длинного плеча подошвы (ΔB_b), получающихся при деформации этих элементов во вспомогательных калибрах горизонтальной эджерной клетки:

$$\Delta B_\phi = \Delta B_e + \Delta B_b \quad (1)$$

$$\Delta B_e = \frac{2,54 \cdot \Delta t \cdot (\varepsilon_\phi - \varepsilon_{ш})}{\varepsilon_\phi} \quad (2)$$

$$\Delta B_b = \frac{k \cdot \Delta H \cdot t'}{\lambda \cdot t} \quad (3)$$

где $\Delta t = t' - t$ – среднее обжатие фланца по толщине; ε_ϕ и $\varepsilon_{ш}$ – относительное обжатие фланцев и шейки соответственно; $\varepsilon_\phi = \Delta t$; $\varepsilon_{ш} = d' - d$; $\Delta H_\phi = H'_\phi - H_\phi$ – обжатие фланцев по высоте во вспомогательной клетке; λ – коэффициент вытяжки в универсальном калибре; k – коэффициент, учитывающий долю металла, идущего на уширение фланца (принимается 0,5 для черновых клетей и 0,7 – для чистовых клетей).

Формирование подошвы острякового рельса в трехвалковом участке калибра позволяет ликвидировать присущий прокатке в двухвалковом калибре (рисунок 5 б) момент, вызываемый защемлением металла в закрытом верхнем фланце калибра, формирующем длинное плечо подошвы рельса (M_3), совпадающий с направлением скручивающего момента (M_c), вызываемого различием скоростей по периметру чистового калибра рельса острякового (рисунок 5 а) и уменьшить скрученность при выходе из валков.

Вместе с тем следует отметить ограничения, присущие разработанному режиму прокатки остряковых рельсов в условиях универсального рельсобалочного стана. Как показано выше окончательное формирование профиля рельсов в чистовом универсальном калибре вертикальным роликом и боковыми поверхностями ручьев горизонтальных валков предусматривает оформление ширины подошвы профиля за счет свободного уширения металла при деформации этого элемента (рисунок 5 а). В результате выполнение размера ширины подошвы профиля в чистовом калибре осу-

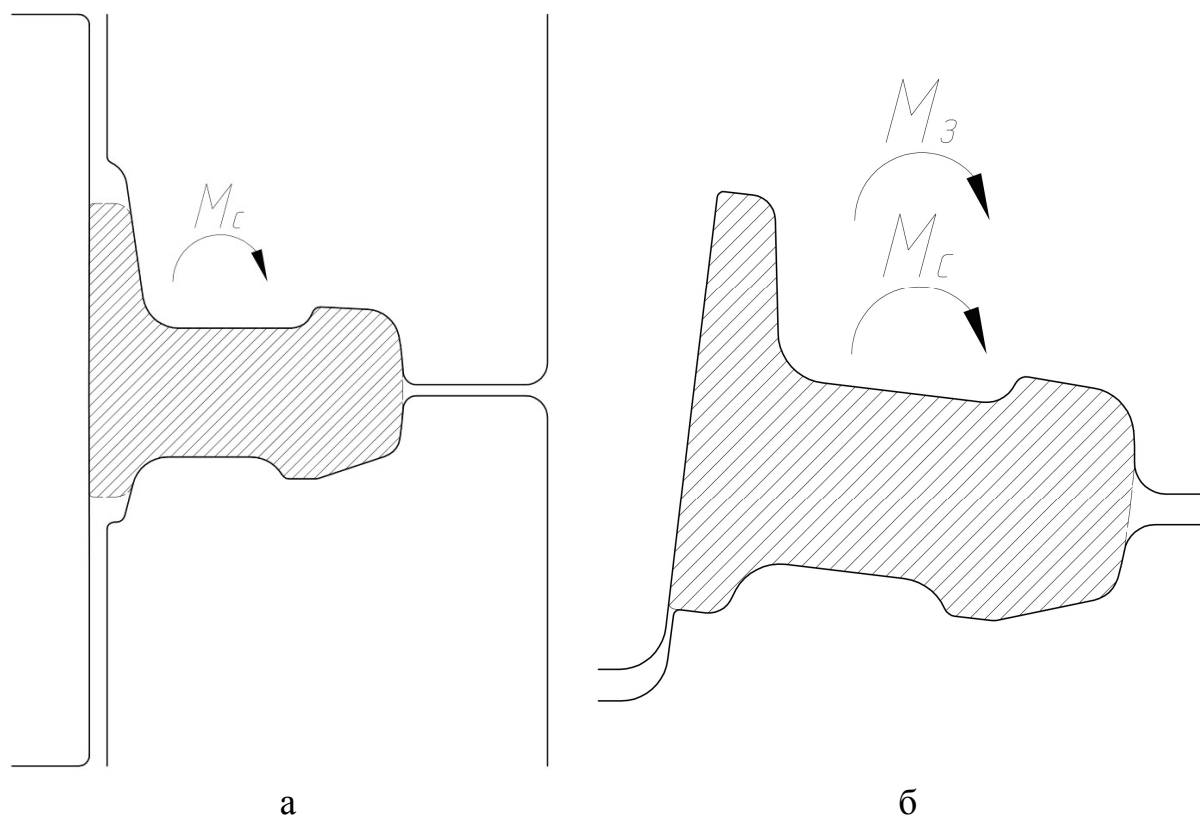


Рисунок 5 – Общий вид универсального трехвалкового (а) и чистового двухвалкового (б) калибров для прокатки рельсов остряковых

ществляется не инструментом, а свободным уширением металла, которое зависит от многих технологических параметров и не может быть предварительно спрогнозировано с высокой степенью точности. В связи с этим закономерно возникают затруднения при выполнении требований нормативной документации по точности выполнения размеров элементов профиля. Имеющиеся производственные данные отечественных и зарубежных металлургических предприятий позволяют говорить о достижимой точности размеров элементов прокатных профилей, получаемых горячей прокаткой при наличии в схеме прокатки свободного уширения металла, величиной $\pm 1,0$ мм. Данный факт подтверждается также требованиями, установленными зарубежной нормативной документацией. При этом согласно действующего отечественного ГОСТ Р 55820–2013 предельные допуски на ширину короткого плеча подошвы для классов точности изготовления профиля «высший сорт» (X) и «первый сорт» (Y) установлены в пределах $\pm 0,3$ мм и $\pm 0,5$ мм соответственно. В соответствии с вышеизложенным, выполнение данного требования представляется невозможным, что требует внесения корректив в действующую нормативно-техническую документацию на производство рельсов остряковых.

Выводы: На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан новый способ прокатки остряковых рельсов ОР65, внедрение которого на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволило повысить производительность стана и улучшить качество поверхности рельсовых профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свейковски У. Производство рельсов высокого качества с использованием компактных универсальных клетей и технологий Rail Cool. Металлургическое производство и технология (МРТ) / У. Свейковски, Т. Нерзак // Черные металлы. – 2006. – № 2. – С. 50-56.
2. Никитина Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом. Ч. IV / Л.А. Никитина // Производство проката. – 2000. – № 11. – С. 2-10.
3. Смирнов В.К. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях / В.К. Смирнов, А.Р. Бондин, А.М. Михайленко // Производство проката. – 2002. – № 12. – С. 24-30.
4. Коган А.Г. Перспективы повышения качества остряковых рельсов / А.Г. Коган, Е.А. Шур // Сборник трудов юбилейной рельсовой комиссии ОАО «КМК» – Новокузнецк, 2002. – С. 42-48.
5. Уманский А.А. Разработка методики прогнозирования сопротивления деформации рельсовой стали при изменяющихся условиях прокатки / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УпФУ, 2015. – С. 199-202.
6. Головатенко А.В. Исследование сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных условиях прокатки / А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков, А.А. Уманский // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк, 2014. – Вып. 33. – С. 64-71.
7. Головатенко А.В. Разработка модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при различных температурно-скоростных параметрах деформации / А.В. Головатенко, А.А. Уманский, В.Н. Кадыков // Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2014. – С. 160-165.
8. Уманский А.А. Анализ и разработка универсальной математической модели расчета сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ при прокатке / А.А. Уманский, А.В. Головатенко, В.Н. Кадыков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. Сборник научных

трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2014. – Ч. I. – С. 182-187.

9. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 150 (2016). 012029.

УДК 621.74

Е.С. Прусов¹, В.Б. Деев²

¹ФГБОУ ВО «ВлГУ», г. Владимир

²ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ВВОДЕ НАНОЧАСТИЦ В АЛЮМИНИЕВЫЕ РАСПЛАВЫ

В статье изложены особенности использования метода ультразвуковой обработки расплавов при получении алюмоматричных нанокомпозитов жидкофазными методами. Описан механизм влияния ультразвуковых колебаний на распределение наночастиц в объеме расплава и приведены практические примеры синтеза нанокомпозитов с применением ультразвука.

The paper describes the features of application of ultrasonic melt treatment at producing of aluminum matrix nanocomposites by liquid-phase methods. The mechanism of influence of ultrasonic waves on distribution of nanoparticles in the melt volume and practical examples of nanocomposites synthesis using ultrasound are given.

Алюмоматричные композиты, армированные наночастицами, имеют значительный потенциал для использования при изготовлении различных объектов современной техники, обладая такими ценными свойствами, как высокая удельная прочность, малая плотность, высокая демпфирующая способность, хорошие технологические свойства, низкий коэффициент термического расширения и высокая теплопроводность, высокая несущая способность, износостойкость, жаростойкость и др. [1]. Реализация принципа армированной гетерофазной структуры, положенного в основу создания композиционных материалов с нано- и микроразмерными армирующими наполнителями в виде высокомодульных тугоплавких частиц кера-

мики и интерметаллидов [2], открывает значительные резервы в повышении свойств и функциональных характеристик изделий в сравнении с традиционно применяемыми материалами [3].

Ввод наночастиц в металлические расплавы представляет значительные технологические трудности вследствие их сильной склонности к образованию агломератов за счет действия сил Ван-дер-Ваальса, а также быстрого окисления даже при сравнительно низких температурах и плохой смачиваемости жидкими металлами [4-6]. В этой связи известные жидкофазные методы получения экзогенно-армированных алюмоматричных композитов с микроразмерными частицами (механическое замешивание частиц в расплав при помощи импеллера, ввод в струе инертного газа и др. [7]) являются низкоэффективными при получении наноструктурированных композиционных материалов. Практика показывает, что получение качественных литейных металломатричных нанокомпозитов требует применения внешних физических воздействий на расплав, одним из которых может являться ультразвуковая обработка [8].

В настоящее время уже стало традиционным применение ультразвука в металлургии для дегазации расплавов и модифицирующей обработки [9]. Возможность принципиального изменения структуры сплавов с помощью ультразвуковой обработки в режиме акустической кавитации подтверждена многолетними исследованиями проф. Эскина Г.И. [10]. Ультразвуковая обработка жидкого и кристаллизующегося расплава разрушает ветви растущих дендритов, фрагменты которых выступают как дополнительные центры кристаллизации. Возникающий при этом избыток зародышей кристаллизации обеспечивает формирование предельно измельченной недендритной структуры с размером зерна, приблизительно равным размеру дендритного параметра.

Методы синтеза наноматериалов, основанные на применении ультразвука, в настоящее время рассматриваются исследователями как одни из наиболее перспективных [11]. При получении металломатричных нанокомпозитов жидкофазными методами обработка расплава ультразвуковыми колебаниями осуществляется, как правило, в диапазоне частот 18-25 кГц непосредственно во время ввода армирующей фазы или сразу после него. Схема типовой установки для ультразвуковой обработки расплава при получении нанокомпозитов приведена на рисунке 1 (а) и включает излучающий волновод 1, магнитострикционный преобразователь 2 и генератор ультразвуковых колебаний 3. В ряде случаев подачу наночастиц (4) осуществляют в защитной атмосфере инертного газа (5 – баллон с газом). Волновод обычно изготавливают из титанового сплава, нержавеющей стали или сплавов на основе ниобия из-за их эффективной передачи ультразвука и размерной стабильности при повышенных температурах [12]. Ниобиевые волноводы обладают более высокой химической стойкостью в контакте с матричным расплавом, выдерживают высокие температуры обра-

ботки при минимальной кавитационной эрозии, однако являются наиболее дорогостоящими.

Разрушение агломератов наночастиц при обработке расплава связано с явлением акустической кавитации (рисунок 1, б), представляющим собой процесс образования и роста (стадия I), пульсации и схлопывания (стадия II) мельчайших пузырьков при циклическом воздействии ультразвуковых волн высокой интенсивности. Очаги кавитации, появляющиеся и исчезающие вблизи агломератов наночастиц, создают избыточное давление, что позволяет расплаву пройти в капиллярные пространства и поры между частицами даже при плохой их смачиваемости жидким металлом [13]. Насыщение агломератов расплавом приводит к их распаду на отдельные частицы (стадия III) за счет силы вязкого трения на переднем фронте ультразвуковой волны.

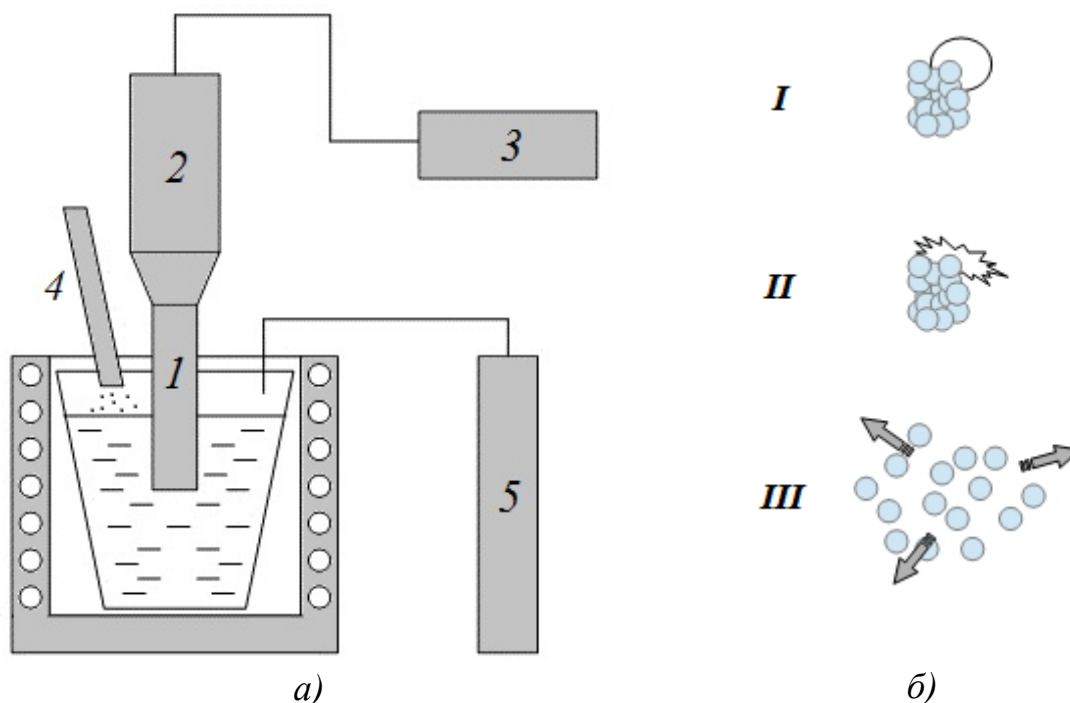


Рисунок 1 – Схема типовой установки для ультразвуковой обработки расплавов (а) и механизм разрушения агломератов наночастиц (б)

Для создания акустической кавитации в расплавах легких сплавов интенсивность ультразвука должна быть не менее 80 Вт/см^2 [9]. Предполагая, что поверхность волновода-излучателя полностью смачивается расплавом, интенсивность I может быть выражена следующим образом [9, 14]:

$$I = \frac{1}{2} \rho_L c_L (2\pi f A_0)^2,$$

где f – частота колебаний, ρ_L – плотность металлического расплава, c_L – скорость распространения звуковых волн в расплаве, A_0 – начальная амплитуда. Расчеты, выполненные по приведенному выражению, позволяют

установить теоретический характер изменения интенсивности ультразвуковой обработки в зависимости от частоты колебаний и начальной амплитуды с учетом вида обрабатываемого сплава.

Конкретных примеров реализации ультразвуковых технологий при получении литых металломатричных композитов с экзогенными наночастицами в научной литературе пока представлено сравнительно немного, однако эти методы постепенно начинают привлекать все большее внимание исследователей и специалистов. В частности, в работе [15] ультразвуковую обработку расплава применяли для получения нанокомпозитов на основе Al-7Si-0,3Mg с добавлением 0,5 масс. % Cu и 1 масс. % наночастиц Al_2O_3 . Использован ниобиевый зонд, работающий на частоте 20 кГц с максимальной мощностью 600 Вт. Наночастицы перед подачей в расплав заворачивали в двухслойную алюминиевую фольгу. Волновод погружали в матричный расплав на глубину 12 мм при температуре 700 °С и накладывали ультразвуковые колебания с частотой 20 кГц и амплитудой 60 мкм при одновременной подаче подогретых капсул с наночастицами. Время обработки составляло 15 мин для каждой вводимой капсулы. Отмечено совместное модифицирующее действие наночастиц и ультразвуковой обработки на все фазовые составляющие, включая первичные α -дендриты, эвтектический кремний и включения Al_2Cu .

В работе [16] исследовали влияние ультразвуковых колебаний на дисперсность и распределение частиц графита при получении композитов Al – 2 об. % графита методом механического замешивания. Порошок графита со средним размером частиц 21 мкм вводили в алюминиевый расплав с помощью импеллера с последующей ультразвуковой обработкой в течение 1,3 и 5 мин. Использован излучатель из сплава Ti-6Al-4V при частоте 20 кГц и мощности 2,5 кВт. Показано, что ультразвуковая обработка в течение 1 мин резко сокращает пористость материалов и разрушает скопления графитовых частиц. Дальнейшее увеличение времени обработки не оказывает существенного влияния на изменение пористости, однако влияет на размер и морфологию графитных включений, которые при обработке в течение 5 мин уменьшаются до 100-130 нм.

Влияние различной температуры ультразвуковой обработки изучено в работе [17] при получении алюмоматричных композитов с 1 % масс. наночастиц Al_2O_3 . Порошки Al (80-100 мкм) и Al_2O_3 (65 нм) смешивали в шаровой мельнице в стеариновой кислоте для получения композитного порошка и спекали при 400 °С в течение 2,5 ч. Матричный расплав перегревали до 750 °С, затем в течение 10 мин замешивали полученный порошок с помощью импеллера. После этого накладывали ультразвуковые колебания с частотой 20 кГц в течение 60 с при мощности 300 Вт и температурах расплава 650, 670, 680 и 700 °С. Обработка при 670°С приводит к наилучшим параметрам микроструктуры при среднем размере α -зерна 25 мкм и повышении прочности на растяжение на 37 %.

Приведенные примеры убедительно свидетельствуют о технологической целесообразности применения ультразвуковой обработки при вводе наноразмерных армирующих частиц в алюминиевые расплавы. Имеющиеся экспериментальные данные подтверждают улучшение смачиваемости и равномерности распределения наночастиц по объему расплава за счет разрушения агломератов. Активация поверхности наночастиц при обработке повышает термодинамическую устойчивость системы в целом. Дополнительным результатом является сокращение пористости композиционных отливок за счет дегазирующего эффекта ультразвуковой обработки, а также модифицирующее влияние на структуру сплава. Однако промышленная реализация ультразвуковых технологий при синтезе литых нанокomпози- тов пока сдерживается отсутствием рекомендаций по подбору оптимальных режимов обработки в зависимости от состава композиционных наноматериалов с учетом физико-химической природы компонентов легирующего и армирующего комплексов.

Выводы: Приведены преимущества использования ультразвуковой обработки расплавов при получении алюмоматричных композиционных материалов с наноразмерными армирующими частицами в жидкофазных технологических процессах. Изложены основные закономерности разрушения агломератов наночастиц под воздействием ультразвуковых колебаний. Представленные практические примеры подтверждают улучшение смачиваемости и равномерности распределения наночастиц по объему матричного расплава, сокращение пористости композиционных отливок и совместное модифицирующее влияние наночастиц и ультразвуковой обработки на структуру сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Casati R., Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles – A Review // Metals. – 2014. – Vol. 4. – P. 65-83.
2. Прусов Е.С., Панфилов А.В., Панфилов А.А. Термодинамический анализ и модель взаимодействия компонентов при синтезе композиционных материалов на основе систем Al-TiO₂-B-SiC и Al-TiO₂-C-SiC // Литейщик России. – 2009. – № 9. – С. 30-33.
3. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. – 2008. – № 8. – С. 1-9.
4. Min Y., Akbulut M., Kristiansen K. et al. The Role of Interparticle and External Forces in Nanoparticle Assembly // Nature Materials. – 2008. Vol. – 7. Iss. 7. – P. 527-538.
5. Sajjadi S.A., Ezatpour H.R., Beygi H. Microstructure and Mechanical Properties of Al-Al₂O₃ Micro and Nano Composites Fabricated by Stir Casting //

Materials Science and Engineering A. – 2011. Vol. 528. – Iss. 29-30. – P. 8765-8771.

6. Andrievskii R.A., Shul'ga Yu.M., Volkova L.S. et al. Oxidation Behavior of TiB_2 Micro- and Nanoparticles // Inorganic Materials. – 2016. – Vol. 52. – Iss. 7. – P. 686-693.

7. Прусов Е.С. Современные методы получения литых композиционных сплавов / Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. // Литейщик России. – 2011. – № 12. – С. 35-40.

8. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J. et al. The Application of External Fields to the Manufacturing of Novel Dense Composite Master Alloys and Aluminum-Based Nanocomposites // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, Iss. 7. – P. 2870-2875.

9. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic Melt Treatment of Light Alloy Melts, 2nd ed., Boca Raton, FL, CRC Press, 2014.

10. Эскин Г.И. Влияние кавитационной обработки расплава на структуру и свойства литых и деформированных легких сплавов // Вестник Российской академии естественных наук. – 2010. – № 3. – С. 82-89.

11. Bang J.H., Suslick K.S. Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials // Advanced Materials. – 2010. – Vol. 22, Iss. 10. – P. 1039-1059.

12. Li X., Yang Y., Cheng X. Ultrasonic-assisted fabrication of metal matrix nanocomposites // Journal of Materials Science. – 2004. – Vol. 39. – P. 3211-3212.

13. Kudryashova O., Vorozhtsov S. On the Mechanism of Ultrasound-Driven Deagglomeration of Nanoparticle Agglomerates in Aluminum Melt // JOM. – 2016. – Vol. 68. – No. 5. – P. 1307-1311.

14. Chen D., Zhao Y., Li G. et al. Mechanism and Kinetic Model of In-situ $TiB_2/7055Al$ Nanocomposites Synthesized under High Intensity Ultrasonic Field // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. – 2011. – Vol. 26, Iss. 5. – P. 920-925.

15. Choi H., Jones M., Konishi H., Li X. Effect of Combined Addition of Cu and Aluminum Oxide Nanoparticles on Mechanical Properties and Microstructure of Al-7Si-0.3 Mg Alloy // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 43. – P. 738-746.

16. Christy Roshini P., Nagasivamuni B., Raj B., Ravi K.R. Ultrasonic-Assisted Synthesis of Graphite-Reinforced Al Matrix Nanocomposites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – Vol. 24. – P. 2234-2239.

17. Su H., Gao W., Feng Z., Lu Z. Processing, Microstructure and Tensile Properties of Nano-sized Al_2O_3 Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites // Materials & Design. – 2012. – Vol. 36. – P. 590-596.

УДК 625.143.48

Р.А. Шевченко¹, Н.А. Козырев¹, А.О. Патрушев¹, С.Н. Кратько²,
Р.Е. Крюков¹

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

²ООО «РСП-М» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
РЕЛЬСОСВАРОЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ № 29 (РСП-29)

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ РЕЛЬСОСВАРОЧНОЙ МАШИНЫ К1000

На основе данных производственного контроля была проведена их статистическая обработка средствами множественного регрессионного анализа. На основе полученных моделей определены оптимальные параметры режима сварки. Была проведена апробация данных режимов на рельсосварочном предприятии. Испытания рельсов показали, что качество сварных соединений превышает требования стандартов. При этом значения, предсказанные моделью, были еще выше, чем полученные в ходе испытания.

Based on the production control data, their statistical processing was carried out by means of multiple regression analysis. On the basis of the models obtained, the optimal parameters of the welding regime are determined. Approbation of these regimes at the rail welding plant was carried out. The tests of the rails showed that the quality of the welded joints exceeds the requirements of the standards. The values predicted by the model were even higher than those obtained during the test.

При создании и ремонте бесстыкового железнодорожного пути существуют различные технологии для сварки рельсов. Одними из наиболее применяемых технологий являются: электроконтактная (ЭС) и алюминио-термитная сварка рельсов. В России большое распространение приобрел ЭС. Основную часть рельсов сваривают на стационарных рельсосварочных предприятиях и небольшую часть стыков путевыми рельсосварочными самоходными машинами [1]. В стационарных условиях на предприятии ООО «РСП-М» (РСП-29) сварку производят с помощью машин МСР 63.01, К1000, К1100.

Процесс сварки рельсов электроконтактным способом на машине К1000 разделен на несколько этапов, при этом каждый этап разделен на участки: I этап оплавления (2 участка), II этап оплавления (4 участка), форсировка (2 участка), осадка, гратосъем. Этапы характеризуется режимами

сварки: силой тока I , А; напряжением U , В; величиной перемещения подвижной станины S , мм; давлением в системе P , атм; скоростью перемещения подвижной станины V , мм/с; длительностью этапа T , с. [2].

Во время работы сварочной машины процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировался с записью основных параметров в память компьютера. Данные параметры во время процесса сварки фиксировались и сохранялись в базе данных в табличном виде, и при необходимости их можно представить в графическом виде (рисунок 1).

Технология сварки рельсов на РСП включает в себя обязательную сварку контрольных образцов в начале рабочей смены. Свариваются по два образца на каждую сварочную машину, после чего проводят испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002-2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводили на прессе типа ПМС-320. Контрольные образцы испытываются после сварки и удаления грата в сварочной машине без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец должен иметь длину не менее 1200 мм со сварным стыком по середине. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м. Испытание одного контрольного образца производят, с приложением нагрузки на головку, второй контрольный образец нагружают на подошву. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, кН и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний [3, 4].

Для создания математической модели процесса контактной сварки рельсов использовалась имеющаяся база данных параметров сварочных режимов и результатов испытаний сварных соединений. В качестве входных переменных были выбраны: среднее значение тока на каждом участке $I_{ср}$, А; среднее значение напряжения на каждом участке $U_{ср}$, В; длительность осадки под током O_t , с; величина осадки O , мм; длительность проковки P_r , с; сопротивление стыка R , Ом. В качестве выходных параметров были выбраны результаты испытаний на статический поперечный изгиб: усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, кН и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм.

Для каждого участка установлен соответствующий путь S (мм), при прохождении которого сварочная машина устанавливает значения U , I_1 , I_2 , I_3 , V_v , V_n . Из массива данных (пример представлен в графическом виде на рисунке 1) выбирались значения параметров для каждого участка (U_{ji} , I_{ji}) и определялось среднее значения этих параметров ($U_{jср}$, $I_{jср}$):

$$U_{jср} = \Sigma U_{ji}/p \quad (1)$$

где p – количество значений U_{ji} зафиксированных датчиком на данном участке; U_{ji} – значение напряжения, зафиксированное датчиком в момент оплавления на j -ом участке; U_{jcp} – среднее значение тока на j -ом участке.

$$I_{jcp} = \Sigma I_{ji}/p \quad (2)$$

где p – количество значений I_{ji} зафиксированных датчиком на данном участке; I_{ji} – значение напряжения, зафиксированное датчиком в момент оплавления на j -ом участке; I_{jcp} – среднее значение тока на j -ом участке.

После обработки данных производственного контроля и параметров сварочных режимов были получены данные, которые отражают основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки K1000 и результатов испытаний сварных соединений, состоящие из 60 наблюдений. На основе полученных производственных данных была проведена их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA 10.0. Оценка влияния параметров сварочных режимов на величину усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$ (кН) и значение стрелы прогиба $f_{пр}$ (мм) проводилась средствами множественного регрессионного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов [5]. Полученная модель описывающая процесс сварки рельсов Р65 ДТ350 на машине K1000 № 01 в условиях ООО «РСП – М» (РСП – 29) имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{изг} = & 18441,49 - 2,69 I_{1cp} - 73,72 U_{1cp} - 1,06 I_{2cp} + 9,98 U_{2cp} + \\ & + 3,98 I_{3cp} - 11,51 U_{3cp} + 1,64 I_{4cp} + 29,45 U_{4cp} + 1,49 I_{5cp} - \\ & - 27,48 U_{5cp} + 19,8 U_{6cp} - 0,54 I_{7cp} + 5,19 U_{7cp} + 593,77 O_I + 8,03 R; \end{aligned} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,72.$$

Для вышеописанных этапов при сварке на данной машине обычно используют значения U_{jcp} и I_{jcp} , приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы значений основных параметров

Параметр	Знак коэф. регрессии (b_i)	Минимум	Максимум	Оптимальные параметры
I_{1cp} , А	–	423,56	520,24	423,56
U_{1cp} , В	–	358,34	362,17	358,34
I_{2cp} , А	–	659,36	790,65	659,36
U_{2cp} , В	+	335,50	346,32	346,32
I_{3cp} , А	+	428,46	499,81	499,81
U_{3cp} , В	–	258,10	269,12	258,10
I_{4cp} , А	+	420,30	487,92	487,92
U_{4cp} , В	+	261,79	267,86	267,86
I_{5cp} , А	+	427,07	489,05	489,05
U_{5cp} , В	–	260,87	273,58	260,87
U_{6cp} , В	+	264,86	276,40	276,40
I_{7cp} , А	–	301,45	438,12	301,45
U_{7cp} , В	+	363,27	391,89	391,89
O_I , с	+	1,10	1,20	1,20
R , Ом	+	75,00	84,00	84,00

Так как $P_{изг}$ и $f_{пр}$ коррелируют между собой, оптимизацию проводили только по $P_{изг}$ ($R = 0,65 > r_{кр} = 0,273$) [6]. Прогнозируемая величина стрелы прогиба $P_{изг}$ полученная по оптимальным значениям равна 3641,029 кН, когда максимальное фактическое значение 2622 кН.

На каждом участке фактическое среднее напряжение U_{jcp} имеет значение отличающееся заданному U_j . Для определения фактического напряжения по заданному, был проведен регрессионный анализ. В качестве входной переменной было выбрано фактическое среднее значение U_{jcp} , в качестве выходной задаваемое напряжение U_j сварочной машине. Полученное уравнение позволяет определять фактическое среднее значение напряжение:

$$U_j = 0,9425 U_{jcp} + 37,321; R^2 = 0,95 \quad (4)$$

Для определения фактического значения силы тока на каждом этапе I_{jcp} была определена зависимость данного параметра от задаваемых параметров I_1, I_2, I_3, V_b, V_n с помощью регрессионного анализа. В качестве входных переменных были выбраны: I_1, I_2, I_3, V_b, V_n . В качестве выходной переменной I_{jcp} . Для определения значения I_{jcp} на первом и втором этапе оплавления была построена модель, включающая значения только 6-ти участков:

$$I_{jcp} = 91,66 + 3,44 V_b + 1,56 V_n + 1,65 I_1 - 0,72 I_2 - 0,56 I_3; R^2 = 0,95 \quad (5)$$

Для определения значения I_{jcp} на этапе форсировки была построена модель, включающая значения 8-ми участков:

$$I_{jcp} = -281,61 + 5,84 V_b + 7,32 V_n + 3,74 I_1 - 7,13 I_2 + 2,76 I_3; R^2 = 0,88 \quad (6)$$

Используя данные уравнения (4, 5, 6) и оптимальные параметры, приведенные в таблице 1 были определены параметры режима сварки на машине K1000 № 01 (таблица 2).

Задав оптимальные параметры режима сварки на сварочной машине K1000 № 01 в условиях РСП–29 провели сварку контрольного образца рельса Р65 ДТ350. Осциллограмма процесса приведена на рисунке 1.

Таблица 2 – Оптимальные параметры режима сварки на машине K1000

Параметр	№ участка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
U, В	375	365	277	290	285	300	405	410
S, мм	20	20	20	20	15	10	35	40
I ₁ , А	150	200	50	80	100	120	150	250
I ₂ , А	250	350	150	180	220	250	340	400
I ₃ , А	350	400	200	250	300	320	440	450
V _b , В·10	110	180	135	130	135	130	125	200
V _n , В·10	70	60	50	60	60	50	50	20
Осадка под током, с	1,2							
Осадка, мм·10	175							
Проковка, с·10	2							

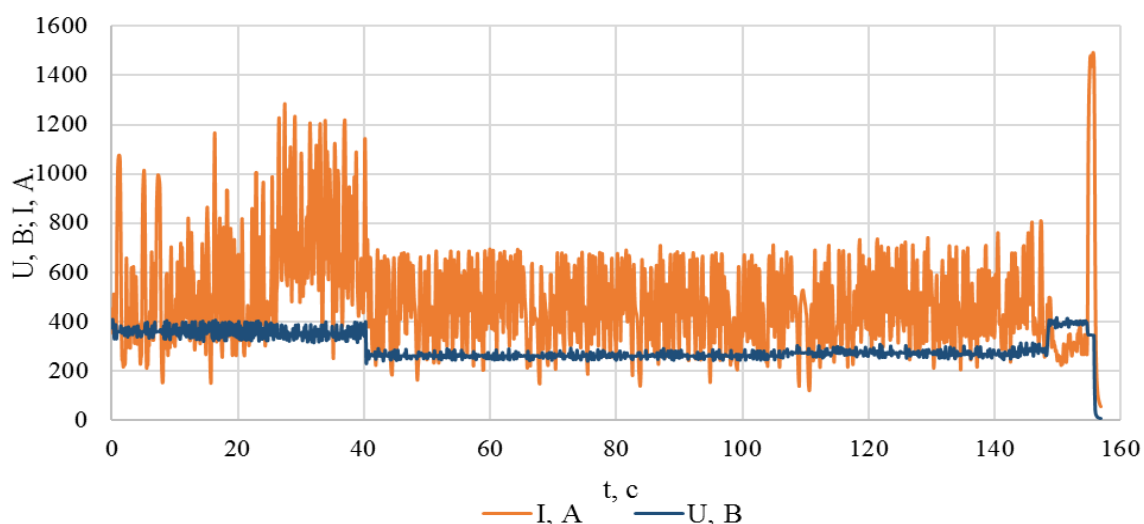


Рисунок 1 – Осциллограммы процесса сварки по заданным режимам

После сварки провели испытание сварного стыка на статический трёхточечный изгиб: усилие изгиба составило $P_{изг} = 2388$ кН и $f_{пр} = 36,6$ мм, что выше нормативных значений (согласно СТО РЖД 1.08.002–2009 $P_{изг} = 2000$ кН и $f_{пр} = 27$ мм), но ниже моделируемого значения $P_{изг} = 3641,03$ кН.

Что бы проверить выдержала ли сварочная машина заданные параметры определили значения U_{jcp} и I_{jcp} для процесса сварки контрольного образца (таблица 3).

Таблица 3 – Интервалы значений основных параметров

Параметр	Оптимальные параметры	Фактические значения параметров
I_{1cp}, A	423,56	500,91
U_{1cp}, B	358,34	361,02
I_{2cp}, A	659,36	756,30
U_{2cp}, B	346,32	350,53
I_{3cp}, A	499,81	461,82
U_{3cp}, B	258,10	260,34
I_{4cp}, A	487,92	456,01
U_{4cp}, B	267,86	272,64
I_{5cp}, A	489,05	451,17
U_{5cp}, B	260,87	267,96
U_{6cp}, B	276,40	285,13
I_{7cp}, A	301,45	307,68
U_{7cp}, B	391,89	391,13
O_I, c	1,20	1,20
$R, Ом$	84,00	80,00
Моделируемое значение $P_{изг}, кН$	3641,03	2972,60
Фактическое значение $P_{изг}, кН$		2388,00

Таким образом фактические значения параметров по напряжению U_{jcp} соответствуют оптимальным, а по силе тока I_{jcp} не соответствуют, что является одной из причин снижения $R_{изг}$.

Выводы: На основании экспериментальных данных разработана математическая модель процесса контактной сварки рельсов на машине К1000, которая позволяет оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва.

На основании полученной математической модели предложены оптимальные параметры сварки на машине К1000.

Проведена апробация полученных оптимальных параметров в заводских условиях. По результатам испытаний образца, сваренного по предложенным оптимальным параметрам были получены результаты превышающие нормативные требования СТО РЖД 1.08.002–2009, но ниже значений, полученных по математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев Н. А. Современные методы получения бесстыковых рельсов / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. Е. Крюков, Р. А. Шевченко, П. Е. Шишкин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции 18-21 апреля 2017 года / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 123 - 127.

2. Шевченко Р.А. Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1(19). – С. 4 – 8.

3. Шевченко Р.А Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 12 – 15.

4. Шевченко Р.А. Применение методов математического моделирования для оптимизации технологических параметров процесса контактной сварки рельсов / Р.А. Шевченко, П. Е. Шишкин, А. О. Патрушев // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: сборник трудов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Вып.21–ч.II – Новокузнецк: СибГИУ, 2017. – С. 229-232.

5. Анализ данных в материаловедении. Ч.2. Регрессионный анализ: учеб. пособие / А.С. Мельниченко. – М.: Изд-во Дом МИСиС, 2014. – 87 с.

6. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий /Ю.П. Адлер [и др.] / Академия наук СССР. – Москва: Изд. «Наука», 1976. – 280 с.

УДК 625.143.48

Р.А. Шевченко¹, С.Н. Кратько², П.Е. Шишкин¹, Н.А. Козырев¹,
В.И. Базайкин¹

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

²ООО «РСП-М» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
РЕЛЬСОСВАРОЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ № 29 (РСП-29)

Применение методов математического моделирования для
оптимизации технологических параметров процесса контактной
сварки рельсов на машине К1000

В статье приведена технология сварки железнодорожных рельсов электроконтактным методом с применением пульсирующего оплавления на машинах К1000 и производственные испытания образцов на статический поперечный изгиб. Проведён многофакторный корреляционный анализ технологических параметров процесса электроконтактной сварки рельсов. На основании имеющихся данных, создана математическая модель процесса контактной сварки рельсов. Разработанная математическая модель позволяет оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварки. Предлагается с помощью регрессионных моделей управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов и прогнозировать качество сварного шва.

The article shows the technology of welding railroad rails by an electrocontact method with the use of pulsating reflow on K1000 machines and production tests of samples for static transverse bending. The multifactorial correlation analysis of technological parameters of process of electrocontact welding of rails is carried out. Based on the available data, a mathematical model of the process of contact welding of rails was created. The developed mathematical model allows estimating completeness of influence of parameters of technological process of contact welding of rails on quality of welding. It is proposed with the help of regression models to control the technological parameters of the process of contact welding of rails and to predict the quality of the welded seam.

В России для сварки рельсов самым распространенным методом является электроконтактный способ (ЭС). Основную часть рельсов сварива-

ют на стационарных рельсосварочных предприятиях и небольшую часть стыков путевыми рельсосварочными самоходными машинами [1]. В стационарных условиях сварку производят с помощью машин МСР 63.01, К1000, К1100. Сварку в пути производят с помощью самоходных машин, оборудованных подвесными рельсосварочными головками МСР 80.01, К900, К922.

При электроконтактном способе торцы свариваемых рельсов нагреваются теплом, выделенном в контакте между рельсами при пропускании через них тока. К свариваемым рельсам от сварочных трансформаторов рельсосварочной машины подается напряжение, при этом рельсы перемещаются на встречу друг другу. При соприкосновении торцов происходит процесс оплавления, в момент достижения равномерно оплавленного слоя на торцах производят осадку. Во время осадки образовавшиеся оксиды на поверхности жидкого металла выдавливаются в грат.

Ранее в работах [2, 3] была проведена оптимизация параметров сварки рельсов на машине К1100. В данной работе проводили исследование по оптимизации процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1000 в условиях РСП-29.

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: I этап оплавления, II этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем. Каждый этап характеризуется режимами сварки: силой тока I , А; напряжением U , В; величиной перемещения подвижной станины S , мм; давлением в системе P , атм; скоростью перемещения подвижной станины V , мм/с; длительностью этапа T , с. Для вышеописанных этапов при сварке на машине К1000 обычно используют значения основных параметров, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы значений основных параметров сварки на машине К1000

№	Название этапа	Интервалы значений параметров сварки					
		T , сек	I , А	U , В	P , атм	V , мм/с	S , мм
1	I этап оплавления	22-45	36 - 1131	46-427	12-47	0,00-3,00	2,5-3,9
2	II этап оплавления	75-130	30-716	266-389	21-33	0,00-3,00	5,9-6,6
3	Форсировка	4,1-6,8	95-899	283-422	20-29	0,00-3,00	5,8-7,0
4	Осадка	1,4-1,5	213-1187	361-411	16-132	5,00-8,20	16,9-17,4
5	Гратосъем	1	13-290	17-306	71-108	0,00-1,00	0,1-1,0

Весь процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировался с записью основных параметров в память компьютера. Отслеживание параметров велось по трем значениям: минимум, максимум и среднее. Данные

параметры во время процесса сварки фиксировались и сохранялись базе данных в табличном виде, и при необходимости в графическом виде. Каждый технологический этап имеет свою продолжительность, внутри которого контролируемые параметры изменяются в широком диапазоне.

Для описания процесса контактной сварки рельсов на машине K1000 в данной работе применяли метод статистического моделирования. Независимые (входные) переменные, такие как I , U , S , P , V которые являются параметрами сварочного режима, влияющими на качество сварного шва рельсов. Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$, кН и значения стрелы прогиба $f_{пр}$, мм при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения данных показателей, если образец не разрушился во время испытаний. В качестве зависимых (выходных) параметров выбраны величина усилия, возникающая при изгибе $P_{изг}$ (кН) и значение стрелы прогиба $f_{пр}$ (мм), при которых происходит разрушение контрольного образца.

После обработки данных производственного контроля и параметров сварочных режимов были получены таблицы для каждого этапа, в которых приведены основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки K1000 и результатов испытаний сварных соединений, состоящие из 100 наблюдений.

На основе полученных производственных данных была проведена их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA 6.0. Оценка влияния параметров сварочных режимов на величину усилия, возникающего при изгибе $P_{изг}$ (кН) и значение стрелы прогиба $f_{пр}$ (мм) проводилась средствами многофакторного корреляционного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов, описанного в работе [4].

Вычисление коэффициентов регрессионных уравнений производили матричным методом с использованием пакета STATISTICA 6.0. Уравнение регрессии представлено в следующем виде:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n, \quad (1)$$

где Y – зависимый (выходной) параметр; $X_1, X_2, \dots, X_n$ – независимые (входные) переменные; $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ – коэффициенты регрессии.

На каждом этапе (I этап оплавления, II этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем) были построены регрессионные модели с выходными параметрами $P_{изг}$ и $f_{пр}$ и рассчитаны коэффициенты детерминации:

– модели на I этапе оплавления

$$P_{изг} = 8926,75 - 176,78 \cdot V_{ср} + 57,99 \cdot V_{мин} - 80,01 \cdot V_{макс} + 19,73 \cdot S_{прип} - \\ - 1,52 \cdot S_{поз} - 118,99 \cdot P_{ср} - 38,04 \cdot P_{мин} + 12,92 \cdot P_{макс} - 8,08 \cdot U_{ср} - 0,06 \cdot U_{мин} + \\ + 2,72 \cdot U_{макс} - 1,28 \cdot I_{ср} - 2,02 \cdot I_{мин} - 0,04 \cdot I_{макс} - 0,72 \cdot T_{длит}; R^2 = 0,26; \quad (1.1)$$

$$f_{пр} = 2318,77 - 36,54 \cdot V_{ср} - 25,96 \cdot V_{мин} - 3,40 \cdot V_{макс} + 5,97 \cdot S_{прип} + 0,31 \cdot S_{поз} -$$

$$-14,71 \cdot P_{\text{ср}} - 9,62 \cdot P_{\text{мин}} + 5,35 \cdot P_{\text{макс}} - 3,45 \cdot U_{\text{ср}} - 0,03 \cdot U_{\text{мин}} + 0,22 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,32 \cdot I_{\text{ср}} - 1,39 \cdot I_{\text{мин}} - 0,11 \cdot I_{\text{макс}} - 0,33 \cdot T_{\text{длит}}; R^2 = 0,16; \\ (1.2)$$

– модели на II этапе оплавления

$$P_{\text{изг}} = 1306,59 + 26,10 \cdot V_{\text{ср}} - 221,94 \cdot V_{\text{мин}} + 77,83 \cdot V_{\text{макс}} - 1,10 \cdot S_{\text{прип}} - 2,14 \cdot S_{\text{поз}} - \\ - 41,04 \cdot P_{\text{ср}} + 28,79 \cdot P_{\text{мин}} + 118,61 \cdot P_{\text{макс}} + 25,56 \cdot U_{\text{ср}} - 31,03 \cdot U_{\text{мин}} + 2,05 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 3,47 \cdot I_{\text{ср}} + 1,54 \cdot I_{\text{мин}} + 0,64 \cdot I_{\text{макс}} - 0,55 \cdot T_{\text{длит}} - 0,25 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,25; \quad (2.1) \\ f_{\text{пр}} = -2397,14 - 37,61 \cdot V_{\text{ср}} - 50,36 \cdot V_{\text{мин}} + 57,72 \cdot V_{\text{макс}} + 5,94 \cdot S_{\text{прип}} + 0,51 \cdot S_{\text{поз}} - \\ - 22,82 \cdot P_{\text{ср}} + 21,44 \cdot P_{\text{мин}} + 53,68 \cdot P_{\text{макс}} - 13,89 \cdot U_{\text{ср}} + 16,47 \cdot U_{\text{мин}} + 0,95 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 2,03 \cdot I_{\text{ср}} + 0,45 \cdot I_{\text{мин}} + 0,92 \cdot I_{\text{макс}} - 0,13 \cdot T_{\text{длит}} + 0,06 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,26; \\ (2.2)$$

– модели на этапе форсировки

$$P_{\text{изг}} = 7709,30 - 80,40 \cdot V_{\text{ср}} + 80,08 \cdot V_{\text{мин}} - 3,34 \cdot V_{\text{макс}} + 8,78 \cdot S_{\text{прип}} + 5,73 \cdot S_{\text{поз}} + \\ + 6,45 \cdot P_{\text{ср}} + 3,73 \cdot P_{\text{мин}} - 3,73 \cdot P_{\text{макс}} - 30,15 \cdot U_{\text{ср}} + 2,09 \cdot U_{\text{мин}} + 15,48 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,63 \cdot I_{\text{ср}} + 0,72 \cdot I_{\text{мин}} - 0,04 \cdot I_{\text{макс}} - 5,36 \cdot T_{\text{длит}} - 0,56 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,22; \quad (3.1) \\ f_{\text{пр}} = 4081,96 - 34,12 \cdot V_{\text{ср}} + 19,25 \cdot V_{\text{мин}} - 5,49 \cdot V_{\text{макс}} - 0,67 \cdot S_{\text{прип}} + 2,09 \cdot S_{\text{поз}} + \\ + 3,07 \cdot P_{\text{ср}} + 10,95 \cdot P_{\text{мин}} - 3,59 \cdot P_{\text{макс}} - 16,26 \cdot U_{\text{ср}} + 0,88 \cdot U_{\text{мин}} + 5,80 \cdot U_{\text{макс}} - \\ - 0,29 \cdot I_{\text{ср}} + 0,52 \cdot I_{\text{мин}} - 0,02 \cdot I_{\text{макс}} - 1,28 \cdot T_{\text{длит}} - 0,09 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,12; \quad (3.2)$$

– модели на этапе осадки

$$P_{\text{изг}} = 7928,54 - 70,16 \cdot V_{\text{ср}} + 0,03 \cdot V_{\text{макс}} - 28,50 \cdot S_{\text{прип}} + 4,99 \cdot S_{\text{поз}} + 2,88 \cdot P_{\text{ср}} + \\ + 1,21 \cdot P_{\text{мин}} + 14,62 \cdot P_{\text{макс}} - 8,51 \cdot U_{\text{ср}} - 0,21 \cdot U_{\text{мин}} + 3,06 \cdot U_{\text{макс}} - 10,63 \cdot I_{\text{ср}} + \\ + 0,67 \cdot I_{\text{мин}} + 10,22 \cdot I_{\text{макс}} - 45,47 \cdot T_{\text{длит}} - 0,48 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,16; \quad (4.1) \\ f_{\text{пр}} = 3518,95 - 73,49 \cdot V_{\text{ср}} - 0,49 \cdot V_{\text{макс}} - 22,23 \cdot S_{\text{прип}} + 2,20 \cdot S_{\text{поз}} + 5,56 \cdot P_{\text{ср}} + \\ + 1,62 \cdot P_{\text{мин}} + 11,96 \cdot P_{\text{макс}} + 10,93 \cdot U_{\text{ср}} - 8,80 \cdot U_{\text{мин}} - 2,83 \cdot U_{\text{макс}} + 0,58 \cdot I_{\text{ср}} - \\ - 0,15 \cdot I_{\text{мин}} - 0,76 \cdot I_{\text{макс}} - 52,15 \cdot T_{\text{длит}} - 0,11 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,13; \quad (4.2)$$

– модели на этапе гратосъема

$$P_{\text{изг}} = 2515,56 - 562,14 \cdot V_{\text{ср}} + 75,23 \cdot S_{\text{прип}} + 7,42 \cdot S_{\text{поз}} + 96,69 \cdot P_{\text{ср}} - 46,47 \cdot P_{\text{мин}} - \\ - 52,16 \cdot P_{\text{макс}} + 15,03 \cdot U_{\text{ср}} + 10,54 \cdot U_{\text{мин}} - 11,55 \cdot U_{\text{макс}} + 14,06 \cdot I_{\text{ср}} - 23,37 \cdot I_{\text{мин}} + \\ + 2,22 \cdot I_{\text{макс}} - 0,58 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,21; \quad (5.1) \\ f_{\text{пр}} = -549,68 - 388,49 \cdot V_{\text{ср}} + 71,85 \cdot V_{\text{макс}} + 3,20 \cdot S_{\text{поз}} + 37,58 \cdot P_{\text{ср}} - 17,04 \cdot P_{\text{мин}} - \\ - 22,16 \cdot P_{\text{макс}} + 14,93 \cdot U_{\text{ср}} - 14,36 \cdot U_{\text{мин}} - 1,74 \cdot U_{\text{макс}} + 6,48 \cdot I_{\text{ср}} - 7,79 \cdot I_{\text{мин}} - \\ - 1,30 \cdot I_{\text{макс}} - 0,14 \cdot T_{\text{нач}}; R^2 = 0,12; \quad (5.2)$$

Коэффициенты детерминации для каждой модели имеют низкое значение, это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают полноту своего влияния на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывают влияние на выходные параметры, но полное влияние входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Исключив неудовлетворяющие параметры по t-критерию Стьюдента и собрав эти параметры каждого этапа в одном уравнении получили следующие модели, описывающие весь процесс в целом:

$$P_{\text{изг}} = 1773,18 - 0,79 \cdot T_{\text{нач5}} - 1,34 \cdot I_{\text{ср4}} + 138,35 \cdot V_{\text{мин3}} + 7,43 \cdot U_{\text{макс3}} + \\ + 91,65 \cdot V_{\text{макс2}} + 1,47 \cdot U_{\text{макс2}} + 6,95 \cdot P_{\text{макс1}} + 16,41 \cdot S_{\text{прип1}} - 36,77 \cdot P_{\text{мин1}};$$

$$R^2 = 0,71; \quad (6.1)$$

$$f_{\text{пр}} = -3199,48 + 13,4 \cdot U_{\text{ср5}} - 3,57 \cdot I_{\text{мин5}} - 0,05 \cdot T_{\text{мин5}} - 62,64 \cdot V_{\text{ср4}} + 14,11 \cdot P_{\text{ср4}} - 0,01 \cdot I_{\text{мин4}} - 1,31 \cdot I_{\text{макс4}} + 3,32 \cdot S_{\text{мин3}} + 34,71 \cdot V_{\text{макс2}} + 10,78 \cdot S_{\text{прип2}} + 31,06 \cdot P_{\text{мин2}} + 1,11 \cdot U_{\text{макс2}} + 1,17 \cdot I_{\text{макс2}} + 3,65 \cdot P_{\text{макс1}}; R^2 = 0,66; \quad (6.2)$$

Полученные уравнения регрессии учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной сварки рельсов на выходные свойства. Данные модели имеют достаточно высокие коэффициенты детерминации, по t-критерию Стьюдента коэффициенты регрессии всех входных переменных значимы, а также модель является адекватной по F-критерию Фишера (для $P_{\text{из}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{\text{факт}} = 18,9 > F_{\text{кр}} = 0,49$; для $f_{\text{пр}}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{\text{факт}} = 8,76 > F_{\text{кр}} = 0,54$).

Адекватность данных уравнений регрессии (6.1), (6.2) проверялась по показателю средней ошибки аппроксимации [5]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \quad (2)$$

где m – количество наблюдений; $\tilde{Y}_i$ – вычисленное значение результирующего показателя; Y_i – фактическое значение результирующего показателя.

Для $P_{\text{из}}$ средняя ошибка аппроксимации равна: $\bar{\varepsilon} = 2,5 \%$.

Для $f_{\text{пр}}$ средняя ошибка аппроксимации равна: $\bar{\varepsilon} = 8 \%$.

Анализ распределения остатков показал, что явного отклонения от нормального закона распределения не наблюдается, т. е. остатки распределены случайно и в модели отсутствуют неучтенные параметры, влияющие на выходной параметр. Модель пригодна для принятия решений и для прогнозирования.

Выводы: Разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1000, позволяющие оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва:

$$P_{\text{изг}} = 1773,18 - 0,79 \cdot T_{\text{нач5}} - 1,34 \cdot I_{\text{ср4}} + 138,35 \cdot V_{\text{мин3}} + 7,43 \cdot U_{\text{макс3}} + 91,65 \cdot V_{\text{макс2}} + 1,47 \cdot U_{\text{макс2}} + 6,95 \cdot P_{\text{макс1}} + 16,41 \cdot S_{\text{прип1}} - 36,77 \cdot P_{\text{мин1}}, R^2 = 0,71;$$

$$f_{\text{пр}} = -3199,48 + 13,4 \cdot U_{\text{ср5}} - 3,57 \cdot I_{\text{мин5}} - 0,05 \cdot T_{\text{мин5}} - 62,64 \cdot V_{\text{ср4}} + 14,11 \cdot P_{\text{ср4}} - 0,01 \cdot I_{\text{мин4}} - 1,31 \cdot I_{\text{макс4}} + 3,32 \cdot S_{\text{мин3}} + 34,71 \cdot V_{\text{макс2}} + 10,78 \cdot S_{\text{прип2}} + 31,06 \cdot P_{\text{мин2}} + 1,11 \cdot U_{\text{макс2}} + 1,17 \cdot I_{\text{макс2}} + 3,65 \cdot P_{\text{макс1}}, R^2 = 0,66.$$

С помощью регрессионных моделей предлагается прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев Н.А. Современные методы получения бесстыковых рельсов / Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков, Р.А. Шевченко, П.Е. Шишкин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении: сборник трудов Международной научно-практической конференции 18-21 апреля 2017 года / под ред. А. Н. Смирнова. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – С. 123 - 127.
2. Шевченко Р.А. Статистическая модель управления процессами контактной сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 4 – 8.
3. Шевченко Р.А. Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Бащенко, С.В. Князев // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 12 – 15.
4. Анализ данных в материаловедении. Ч. 2. Регрессионный анализ: учеб. пособие / А. С. Мельниченко. – М.: Изд-во Дом МИСиС, 2014. – 87 с.
5. Практикум по теории статистики: Учеб. пособие / Р. А. Шмойлова и [др]; под ред. Р. А. Шмойловой. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.; Финансы и статистические, 2006. – 416 с.

УДК 625.143.48

Р.А. Шевченко¹, В.И. Базайкин¹, С. Н. Кратько², Н.А. Козырев¹,
А.О. Патрушев¹

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

²ООО «РСП-М» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ
РЕЛЬСОСВАРОЧНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ № 29 (РСП-29)

АНАЛИЗ ТОКОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ СВАРОЧНОЙ
МАШИНЫ К1000 ПРИ СВАРКЕ РЕЛЬСОВ НА ЭТАПЕ
ОПЛАВЛЕНИЯ

Представлены результаты анализа токового режима работы рельсосварочной машины К1100. Используются записи тока в первичной цепи трансформатора К1100 в зависимости от времени в форме дис-

кретных сигналов. Дискретные сигналы зависели от скорости V сближения станин на этапах оплавления рельсового стыка. Сигналы сгруппированы по значениям V , в каждой группе определено среднее значение $\bar{I}$ тока и его характеристики. Построены аппроксимации зависимости $\bar{I}$ от скорости V полиномами второй и третьей степени. Отмечено явное наличие минимума зависимости $\bar{I}(V)$ при любой нелинейной аппроксимации и значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,75$ для кубической модели. Проведён спектральный анализ предварительно отфильтрованных сигналов. Спектр отфильтрованных сигналов получен применением быстрого преобразования Фурье. Для каждого из значений V получены амплитудно-частотные характеристики спектров.

The results of the current mode analysis of the K1100 rail welding machine are presented. The current records in the primary circuit of the K1100 transformer are used as a function of time in the form of discrete signals. The discrete signals depended on the speed V of the approach of the stands at the stages of reflow of the rail joint. The signals are grouped by the values of V , in each group the mean current value $\bar{I}$ and its characteristics are determined. Approximations of the dependence of $\bar{I}$ on the velocity V by polynomials of the second and third degree are constructed. It is noted that there is a minimum of the dependence of $\bar{I}(V)$ for any nonlinear approximation and the value of the determination coefficient $R^2 = 0.75$ for the cubic model. Spectral analysis of pre-filtered signals is carried out. The spectrum of the filtered signals is obtained by applying a fast Fourier transform. For each of the values of V , the amplitude-frequency characteristics of the spectra.

Одним из наиболее распространенных методов сварки рельсов в РФ является электроконтактный способ (ЭС). Данный способ позволяет получить наиболее качественное сварное соединение при строительстве и ремонте бесстыковых путей. Технология и оборудование для ЭС постоянно совершенствуется, при этом создаются новые принципы управления процессами на различных этапах.

Существующие методы управления оплавлением при контактной стыковой сварке осуществляются корректировкой задаваемой скорости оплавления в зависимости от текущего значения тока. Это осуществляется изменением установок начала коррекций скорости (ток коррекции $I_{кор}$), тока $I_{ост}$, останавливающего подачу, и тока $I_{рев}$, дающего команду на реверс. Для этого программируемые значения скорости и тока оплавления, реализующие обратную связь $I_{кор}$, $I_{ост}$, $I_{рев}$, подбирают таким образом, чтобы

фактическое среднее значение тока на осциллограмме было в 2 раза меньше тока короткого замыкания. Это соответствует максимуму электрической мощности, развиваемой в контакте между оплавленными торцами заготовок. Недопустимые отклонения тока форме скачкообразных изменений его величины исключаются благодаря быстродействующей обратной связи. Эта же обратная связь стабилизирует текущее значение сварочного тока.

Корректор скорости оплавления с обратной связью по сварочному току, работает по принципу, показанному на рисунке 1. В точке пересечения кривых мощность, развиваемая машиной (кривая 2), и мощность, необходимая для оплавления деталей (кривая 1), одинаковы, что обеспечивает устойчивое протекание оплавления. При случайном увеличении тока от установившегося значения $I_{уст}$ мощность, развиваемая машиной, оказывается больше мощности, необходимой для оплавления. Избыточная мощность способствует ускорению нагрева и разрушению элементарных контактов и как следствие, увеличению сопротивления искрового промежутка, что сопровождается уменьшением тока до значения $I_{уст}$. При токе, меньшем $I_{уст}$, мощность, развиваемая машиной, оказывается меньше мощности, необходимой для оплавления. Сопротивление искрового промежутка уменьшается, что приводит к восстановлению установившегося значения тока. Если зависимость, отраженную кривой 1 на рисунке 1, использовать, чтобы задавать изменение скорости подачи деталей в функции тока, то такой корректор скорости обеспечит устойчивое оплавление по току [1].

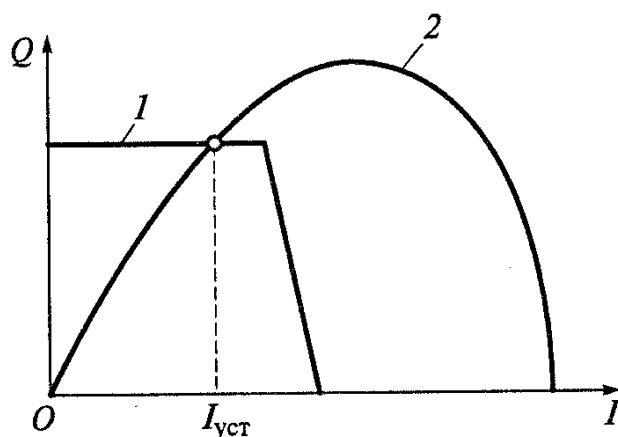
В работе [1] приведено уравнение корректора, в котором зависимой величиной от текущего значения тока является напряжение на якоре электродвигателя привода перемещения подвижной плиты машины. После замены его на скорость перемещения подвижной плиты получим следующее уравнение корректора:

$$\Delta V = k (I_1(t) - I_0 + \delta) \text{ при } I_1(t) - I_0 > \delta; \quad (1)$$

где ΔV – изменение скорости перемещения подвижной плиты; k – коэффициент пропорциональности; $I_1(t)$ – текущее значение тока; I_0 – заданное (установка) значение тока; δ – зона нечувствительности схемы сравнения.

Из выражения (1) следует, что для нормальной работы корректора скорости необходимо постоянство среднего значения тока в течении всего времени сварки. При форсировке режим предусматривает нарастание тока перед осадкой, то подаются ложные команды на снижение скорости подачи деталей.

Данный подход является наиболее простым, регулирование оплавлением осуществляется линейно. Что не может в полной мере воспринимать и учитывать сложные процессы искрового промежутка. Ранее в работе [2] была проведена оптимизация режимов сварки, регулирование которых осуществлялось вышеописанным методом.



1 – мощность, необходимая для оплавления; 2 – мощность, развиваемая машиной;
 $I_{уст}$ – установившееся значение тока

Рисунок 1 – Зависимость мощности, необходимой для оплавления деталей, и мощности развиваемой машиной, от тока

В настоящей работе рассмотрены некоторые результаты анализа работы рельсосварочной машины К1100 производства Каховского завода электросварочного оборудования (Украина), предназначенной для контактной сварки, работающей в режиме пульсирующего оплавления.

Использованы записи тока в первичной цепи трансформатора сварочной машины в зависимости от времени в форме дискретных сигналов, время дискретизации $T = 0,1$ с, длительность N сигналов как конечных последовательностей равна 32. Рассматривались токовые дискретные сигналы при варьировании скорости V сближения станин при оплавлении: 0,02; 0,03; 0,05; 0,06; 0,08 мм / с. Для каждого значения V были проведены от 4 до 10 выборок с записями дискретных сигналов. На рисунке 2 представлена типовая запись сигнала.

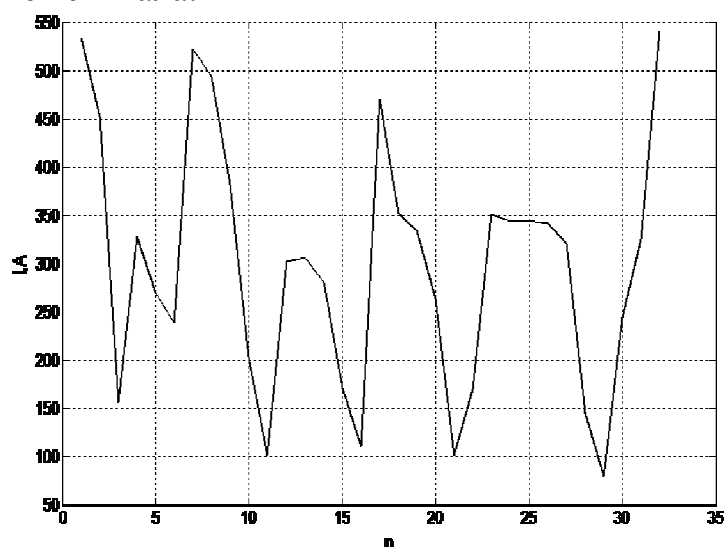


Рисунок 2 – Типовая запись значений тока при сварке

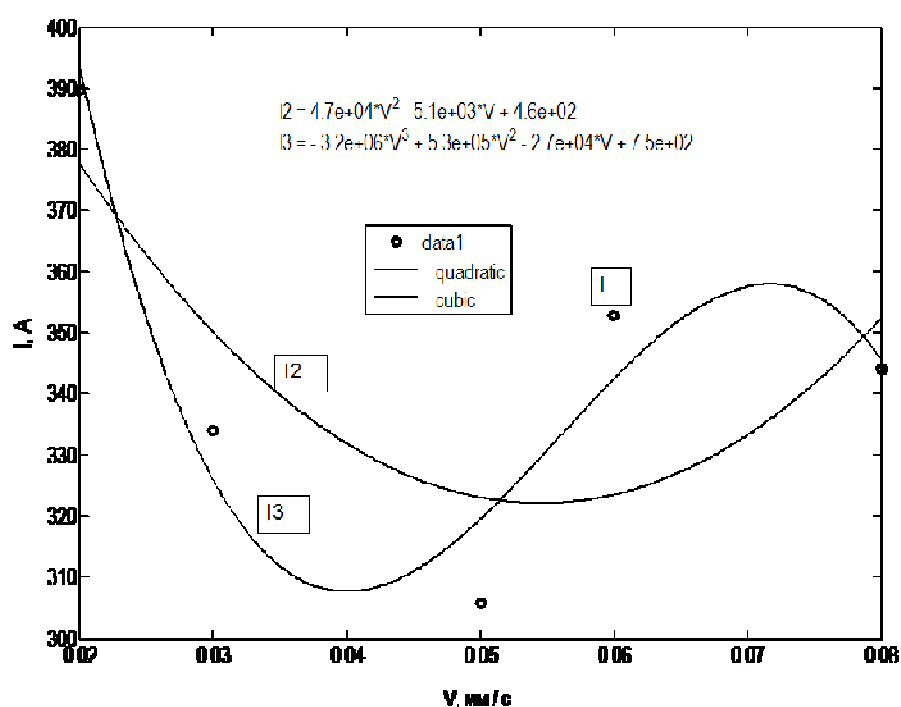
Построение графиков сигналов в матричной системе MATLAB [3] сопровождается первичной статистической обработкой сигналов как динамических рядов. На этом этапе из совокупности обработанных сигналов были удалены некоторые из них с заметно эксцессивными признаками (выбросы). Остальные сгруппированы по значениям скорости V , в каждой группе определено среднее значение $\bar{I}$ тока и среднеквадратичное отклонение значений от $\bar{I}$. Результаты показаны в следующей таблице:

Таблица 1 – Результаты статистической обработки данных в MATLAB

V , мм / с	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08
$\bar{I}$, А	389,7	334,1	305,8	352,9	344,2
СКО ($\bar{I}$), А	14,4	11,8	12,0	13,3	11,44

По данным таблицы были построены аппроксимации зависимости $\bar{I}$ от V полиномами второй и третьей степени (рисунок 3):

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 = p_1 V^2 + p_2 V + p_3, \quad p_1 = 4,666 \cdot 10^4, \quad \bar{I}_3 = p_1 V^3 + p_2 V^2 + p_3 V + p_4, \quad p_1 = -3,173 \cdot 10^6, \\ p_2 = -5,084 \cdot 10^3, \quad p_3 = 460,58; \quad p_2 = 5,312 \cdot 10^5, \\ p_3 = -2,727 \cdot 10^4, \quad p_4 = 751,33. \end{aligned}$$



$\bar{I}_2$ – полином второй степени, $\bar{I}_3$ – полином третьей степени

Рисунок 3 – Зависимость $\bar{I}$ от V .

Надо отметить явное наличие минимума зависимости $\bar{I}(V)$ при любой нелинейной аппроксимации и приемлемое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,75$ для кубической модели.

Был также проведён спектральный анализ записанных сигналов. Для устранения случайных помех («белого шума») был применён фильтр. Так как частота тока в трансформаторе равна 50 Гц, выбран низкочастотный эллиптический фильтр $[b,a] = \text{ellip}(n,R_p,R_s,W_p)$, обсуждённый в [4]; n – длина фильтруемого сигнала, R_p – максимально допустимое ослабление сигнала в полосе пропускания в dB, R_s – минимально допустимое снижение сигнала в полосе задерживания в dB, W_p – нормированная полоса пропускания фильтра, $0 < W_p < 1$. На рисунке 4 показана характеристика эллиптического фильтра.

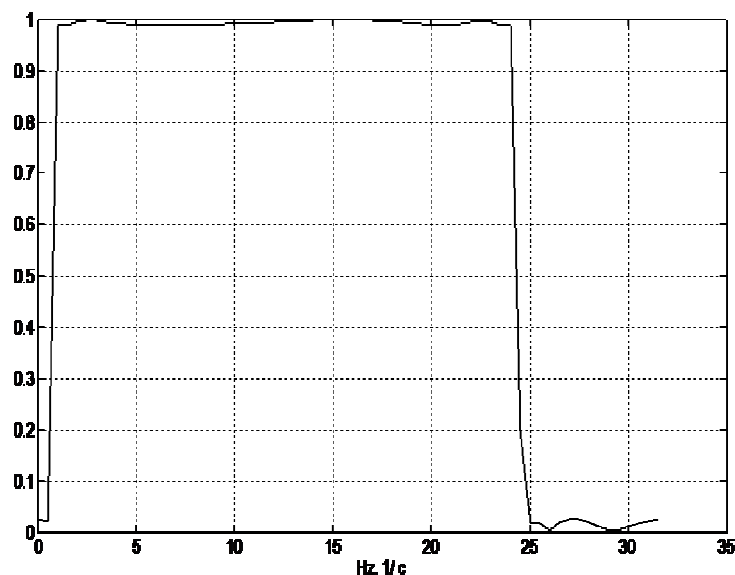


Рисунок 4 – Характеристика эллиптического фильтра

Спектр дискретных отфильтрованных сигналов получен применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) [5], использована команда `>> [H,w] = freqz(b,a,Fs)` системы MATLAB, $H(w)$ – спектр сигнала, $|H(w)|$ – амплитудно-частотная характеристика сигнала.

Для каждого из значений скорости V сближения станин получены спектры отфильтрованных сигналов, на рисунках 4 – 6 показаны амплитудно-частотные характеристики для трёх из значений: 0,03; 0,05; 0,08 мм/с. Фильтр убрал случайные всплески с частотами больше 3 и меньше 20 Гц. Выявились три пика амплитуд тока с частотами (4 – 7) Гц, (8 – 9) Гц, (11 – 12) Гц.

Обсуждение и выводы. В настоящее время существуют несколько вариантов технологий и соответствующего оборудования сварки рельсов [6-8]. Сварочные машины имеют определенные методы управления процессом оплавления, учитывающие не все особенности данного процесса.

Как следует из прилагаемых инструкций по эксплуатации подобных машин, рекомендации по выбору токового режима выработаны опытным путем и не учитывают особенности функционирования машины как самостоятельной электрической системы со своими собственными частотами, своим влиянием на процессы, протекающие в искровом промежутке. В нашем исследовании регистрировались токи, задаваемые обслуживающим персоналом как оптимальные и назначаемые в соответствии с линейной зависимостью от скорости сближения. Обнаруженная выраженная нелинейность этой зависимости позволяет уточнить рекомендации для управления процессом, что в свою очередь позволит уменьшить потребление мощности, а также повысить качество сварного соединения. Далее, спектр тока имеет низкочастотные составляющие, причины существования которых неясны. Возможно, дальнейшие исследования смогут объяснить их и устранить из токового наполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. Заведений / Э.А. Гладков. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
2. Шевченко Р.А Оптимизация технологических параметров процесса контактной стыковой сварки рельсов / Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Л.П. Башенко, С.В. Князев // Вестник СибГИУ. – 2017. – № 1 (19). – С. 12 – 15.
3. Васильев А.Н. MATLAB. Практический подход: монография / А.Н. Васильев // СПб.: Наука и техника, 2012. – 448 с.
4. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель: монография / D/G/ Дьяконов // М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
5. Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов: учебное пособие / А.И. Солонина, Д.А. Улахович и [др.] // СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 768 с.
6. Гуляев А.И. Технология и оборудование контактной сварки: монография / А.И. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
7. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка оплавлением: сборник / Отв. ред. В.К. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
8. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И. Технология и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов / С.И. Кучук-Яценко, А.В. Дидковский, В.И. Швец // Автомат. сварка. – 2008. – № 11. – С. 129 – 138.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева

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

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМОСИНТЕЗА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ

Проведен термодинамический анализ равновесных и квазиравновесных составов многокомпонентных систем для различных технологических вариантов пиролиза углеводородов и синтеза карбида циркония. Объектами термодинамического моделирования являлись системы C-H-N, Zr-C-H-N, Zr-O-C-H-N. Образование ZrC возможно при взаимодействии паров циркония и циана при температуре ниже 4000K. В системах Zr-C-H-N и Zr-O-C-H-N 100 %-ный выход ZrC возможен при стехиометрических соотношениях $Zr:C = 0,25:0,25$; $O:C = 0,50:0,50$ и 2-кратном избытке водорода.

Thermodynamic analysis of equilibrium and quasi-equilibrium compositions of multicomponent systems for various technological variants of pyrolysis of hydrocarbons and synthesis of zirconium carbide is carried out. The objects of thermodynamic modeling were the systems C-H-N, Zr-C-H-N, Zr-O-C-H-N. The formation of ZrC is possible by the interaction of vapors of zirconium and cyanide at a temperature below 4000K. In Zr-C-H-N and Zr-O-C-H-N systems, a 100 % ZrC yield is possible with stoichiometric $Zr:C = 0.25: 0.25$; $O:C = 0.50: 0.50$ and a 2-fold excess of hydrogen.

Цели, задачи, методика моделирования

К настоящему времени при производстве тугоплавких материалов сформировались два основных варианта технологического применения высокотемпературного нагрева: длительная термическая обработка компактированной твердой шихты заданного химического и гранулометрического состава направленной плазменной струей и быстротечный синтез в условиях турбулентного химически активного плазменного потока (т.н. плазмосинтез) [1-3]. Второй вариант наряду с интенсификацией и возможностью реализации процесса в непрерывном режиме обеспечивает получение целевых продуктов в нанодисперсном состоянии.

Для оценки технологической возможности реализации плазмосинтеза карбида циркония проведено его термодинамическое моделирование. Плазмосинтез высокотемпературных соединений имеет следующую спе-

цифику, требующую обязательного методологического учета при проведении его термодинамического моделирования:

- крайне ограниченное время пребывания дисперсного сырья в зоне испарения и реакционной смеси в зоне образования целевого продукта в потоке газа – теплоносителя с температурой 5500-2000К, составляющее несколько микро- или миллисекунд соответственно, что позволяет предположить главенствующую роль температурного фактора над временным и, следовательно, возможность достижения равновесия;

- высокую реальность образования в анализируемых условиях целевых продуктов при взаимодействиях в газовой фазе или с её участием;

- необходимость реализации плазмосинтеза в системах, состоящих из нескольких химических элементов, вводимых с перерабатываемым сырьем и плазмообразующим газом и образующих многофазные и многокомпонентные системы, предопределяет безусловное применение при проведении термодинамического моделирования компьютерных технологий;

- особая важность результатов термодинамического моделирования процессов плазмосинтеза при отсутствии реальной возможности описания их кинетических закономерностей и механизма с достаточной достоверностью;

- прогнозный характер результатов термодинамического моделирования процессов плазмосинтеза, что позволяет рассматривать их как технологические ориентиры, требующие экспериментального подтверждения.

Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида циркония (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 плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья.

Объектами термодинамического моделирования являлись системы C–H–N, Zr–C–H–N и Zr–O–C–H–N, что обусловлено возможностью использования в качестве цирконийсодержащего сырья циркония и его диоксида, углеводородного сырья – метана, плазмообразующего газа – азота. Термодинамическая оценка возможности реализации процессов карбидообразования в системах Zr–C–H–N и Zr–O–C–H–N проведена впервые.

Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным методом». «Константный» метод основан на совместном решении следующих уравнений.

- закона действующих масс

$$n_i = \left(\frac{P}{N}\right)^{\sum_{j=1}^q a_{ij}-1} \prod_{j=1}^q n_j^{a_{ij}/K_i}, \quad 1 \leq i \leq m \quad q; \quad (1)$$

- материального баланса

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} n_i + \sum_{i=1}^f n_{is} = C_j, \quad (2)$$

$$1 \leq j \leq q;$$

– суммарного числа молей газовой смеси

$$\sum_{i=1}^m n_i = N, \quad (3)$$

– существования конденсированной фазы

$$K_i^s = \frac{P}{N} n_i, \quad (4)$$

$$1 \leq i \leq f;$$

– закона Дальтона

$$\sum_{j=1}^m P_j = P, \quad (5)$$

где n_i – число молей соответствующего компонента в газовой фазе; n_{is} – число молей соответствующего компонента в конденсированной фазе; N – общее число молей всех компонентов в газовой фазе; m – число компонентов в газовой фазе; K_i – константы равновесия реакций диссоциации сложных газообразных компонентов на атомы; a_{ij} – матрица стехиометрических коэффициентов реакций диссоциации сложных веществ; j – число компонентов, которые присутствуют в конденсированной фазе; C_j – число атомов элемента j в системе, делённое на число Авогадро; K_i^s – парциальные давления насыщения над соответствующей конденсированной фазой.

Следует отметить, что для процессов плазмосинтеза можно ожидать изменения 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) и соответствующие справочные данные. Ранее «константный» метод неоднократно успешно применялся научной школой профессора Галевского Г.В. для термодинамического моделирования высокотемпературных взаимодействий в сложных карбидо- и боридообразующих системах Si-O-C-H-N, Si-C-H-N, Cr-O-C-B-H-N, Cr-B-H-N и др., в связи с чем выбран в качестве основного для термодинамического исследования карбидообразующих систем при получении карбида циркония в условиях плазменного потока.

Температурная зависимость составов продуктов взаимодействия для исследуемых систем рассчитывалась с использованием программы компьютерного моделирования «PLASMA», дополненной в развитии встроенной базой данных, необходимых для анализа процессов получения кислород-бор-азот-углеродсодержащих соединений тугоплавких металлов. Рассматривалась область температур 2000-6000 К при постоянном общем давлении в системе, равном 0,1 МПа. В качестве исходных использовались константы равновесия реакций образования соединений из элементов, заимствованные из публикаций и справочников [4-8], в частности для ZrC – из [5], ZrN – из [6].

Компоненты газовой и конденсированной фаз, учитываемых в расчетах, представлены в таблице 1, а их соотношения – в таблице 2. Соотношения исходных компонентов задавались в соответствии со стехиометрией реакций образования целевых продуктов и параметрами технологического оборудования (расход плазмообразующего газа).

Таблица 1 – Составы газовой и конденсированной фаз исследуемых систем

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, 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
Zr–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, 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, Zr, ZrH	C, Zr, ZrC, ZrN
Zr–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, 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 , Zr, ZrO, ZrO ₂	C, Zr, ZrC, ZrN, ZrO, ZrO ₂

Таблица 2 – Заданные соотношения компонентов в исследуемых системах

Соотношение компонентов, моль	Примечание
C:H:N=0,75:3:20	По стехиометрии для реакции $CH_4=C+2H_2$ (6)
C:H:N=0,75:6:20	2-кратный избыток водорода по сравнению со стехиометрией для реакции (6)
Zr:C:H:N = 0,25:0,25:1:20	По стехиометрии по реакции $Zr + CH_4=ZrC + 2H_2$ (7)
Zr:C:H:N = 0,25:0,375:1,5:20	150 %-ное количество углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (7)
ZrO:C:H:N = 0,25:0,50:0,75:3:20	По стехиометрии для реакции $ZrO_2 + 3CH_4 = ZrC + 2CO + 6H_2$ (8)
Zr:O:C:H:N= 0,25:0,50:0,20:0,75:20	75 %-ный недостаток углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (8)
Zr:O:C:H:N= 0,25:0,50:0,375:1,5:20	50 %-ный недостаток углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (8)
Zr:O:C:H:N = 0,25:0,50:0,47:1,88:20	37,5 %-ный недостаток углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (8)
Zr:O:C:H:N = 0,25:0,50:0,56:2,25:20	25 %-ный недостаток углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (8)
Zr:O:C:H:N = 0,25:0,50:0,66:2,63:20	12,5 %-ный недостаток углерода по сравнению со стехиометрией для реакции (8)

Термодинамика плазменного пиролиза метана

Термодинамический анализ системы С-Н-Н выполнен для получения прогнозной информации о возможном составе газовой фазы, формирующемся в результате пиролиза метана и его взаимодействия с газом - теплоносителем. Температурная зависимость равновесных и квазиравновесных составов приведена на рисунке 1.

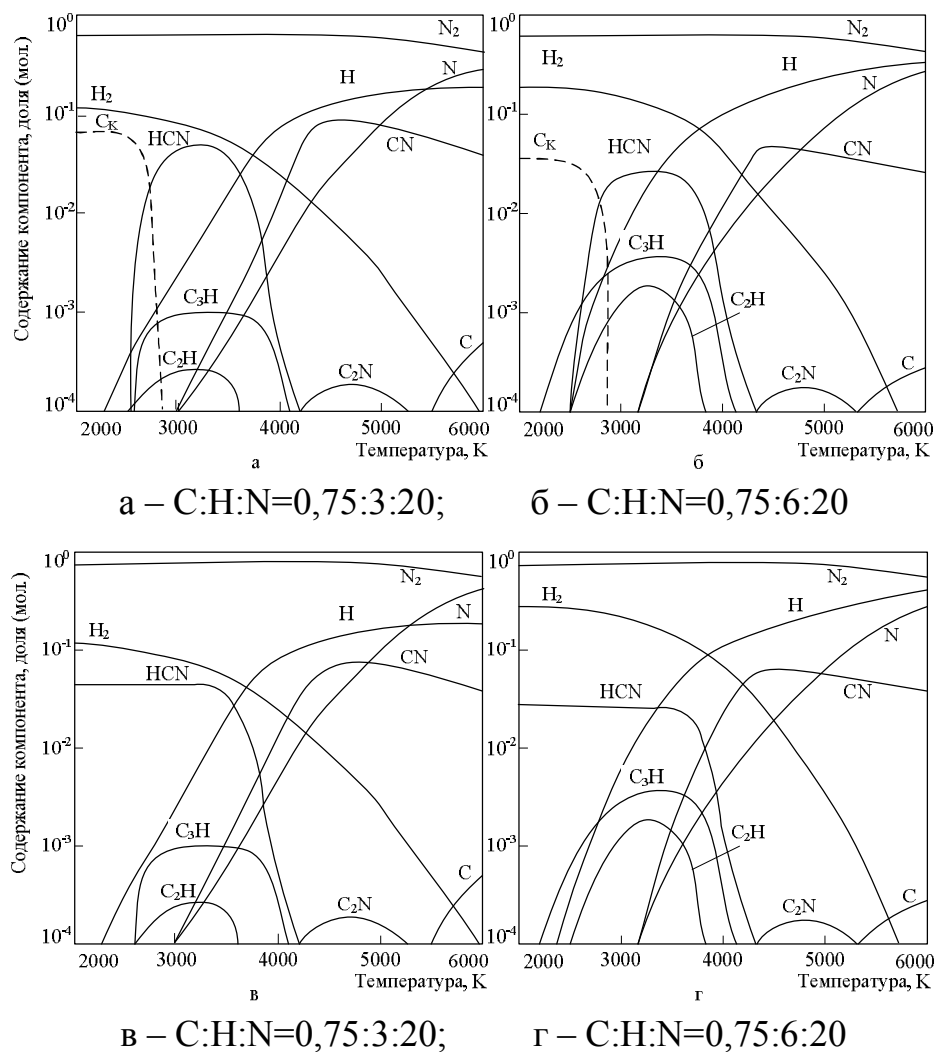


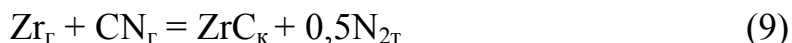
Рисунок 1 – Равновесный (а, б) и квазиравновесный (в, г) состав системы С-Н-Н в зависимости от соотношения компонентов и температуры

По результатам расчета равновесных составов системы (рисунок 1 а, б) выявлено присутствие в газовой фазе при температуре 2800 – 4200 К HCN, CN, C_3H , C_2H , причем около 98 % углерода связано в циановодород. Разложение циановодорода происходит при температуре ниже 2800 К и приводит к образованию свободного углерода в конденсированном состоянии.

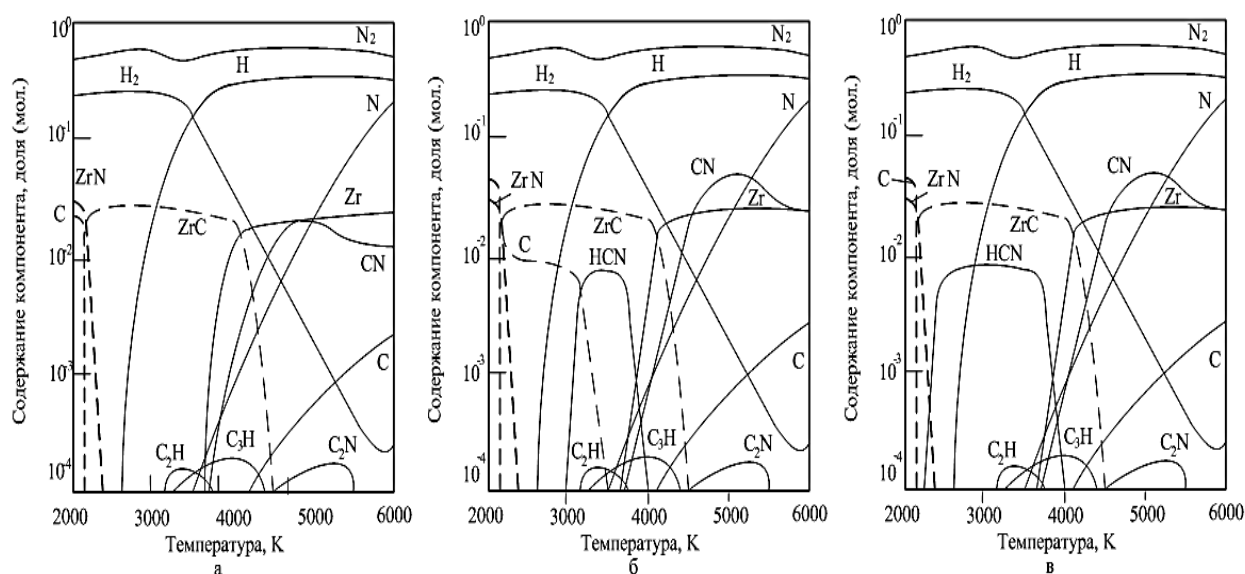
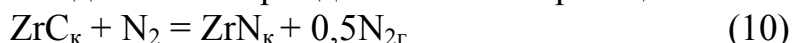
Результаты расчета квазиравновесных составов (рисунок 1 в, г), которые отличаются значительным расширением температурной области

стабильности циановодорода (составляющей 2000 – 3800 К), позволяют получить состав конечных продуктов и основные показатели процесса, соответствующие экспериментальным данным [8].

Результаты термодинамических расчетов системы $Zr - C - H - N$ приведены на рисунке 2. В этой системе образование ZrC возможно по реакции

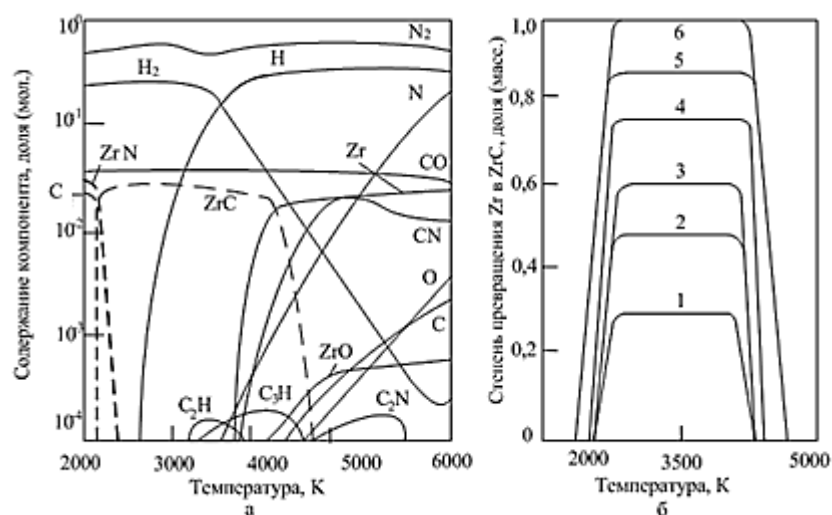


100 %-ный выход ZrC достигается при стехиометрическом соотношении компонентов $Zr:C$ в интервале температур 2300 – 4000 К. При избытке карбидизатора (соотношение $Zr:C=0,25:0,375$) в условиях равновесия продуктом синтеза является карбид-углеродная композиция, содержащая 2,8 % свободного углерода. В условиях квазиравновесия при избытке карбидизатора циановодород устойчив в области температур 2300 – 3800 К, что делает возможным получение карбида, не загрязненного пиролитическим углеродом. При температуре ниже 2300 К термодинамически возможным становится взаимодействие карбида с азотом по реакции



- а) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $Zr:C:H:N=0,25:0,25:1:20$;
- б) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $Zr:C:H:N=0,25:0,375:1,5:20$;
- в) квазиравновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $Zr:C:H:N=0,25:0,375:1:20$

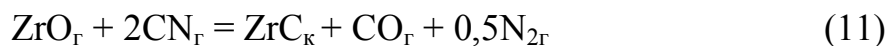
Рисунок 2 – Результаты термодинамических расчетов системы $Zr-C-H-N$



- а) равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $\text{Zr}:\text{C}:\text{O}:\text{H}:\text{N}=0,25:0,75:0,50:3:20$;
 б) зависимость степени превращения Zr в ZrC от соотношения $\text{Zr}:\text{C}=0,25:0,20$ (1); $0,25:0,375$ (2); $0,25:0,47$ (3); $0,25:0,56$ (4); $0,25:0,66$ (5); $0,25:0,75$ (6)

Рисунок 3 – Результаты термодинамических расчетов системы $\text{Zr}-\text{C}-\text{O}-\text{H}-\text{N}$

Результаты термодинамических расчетов системы $\text{Zr}-\text{C}-\text{O}-\text{H}-\text{N}$ приведены на рисунке 3. При изменении соотношения $\text{Zr}:\text{O}:\text{C}$ от $0,25:0,50:0,19$ до $0,25:0,50:0,75$ степень превращения циркония в карбид изменяется от 0,25 до 1. Карбид циркония устойчив в интервале температур 2300 – 4000 К. Образование ZrC возможно по реакциям (9) – до 98,5 % и (11) – до 1,5 %



При температуре ниже 2300К термодинамически возможной становится реакция (10), приводящая к образованию нитрида ZrN .

Выводы. Проведено термодинамическое исследование равновесных и квазиравновесных составов многокомпонентных систем для пиролиза углеводородов и различных технологических вариантов получения карбида циркония.

Установлено:

– в системе $\text{C}-\text{H}-\text{N}$ в равновесных условиях 100 %-ная газификация углерода достигается в интервале температур 2800-3800 К за счет образования циановодорода и углеводородных радикалов. До 98 % углерода присутствует в газовой фазе в виде HCN . Квазиравновесные условия, исключающие образование конденсированного углерода, позволяют расширить температурный интервал термодинамической устойчивости циановодорода до 2300 К;

– в системе системы Zr–C–H–N образование карбида циркония возможно при температуре ниже 4000 К в равновесных и квазиравновесных условиях при стехиометрическом и избыточном количестве углерода; при избытке углерода при соотношении $Zr:C = 0,25 \div 0,375$ в условиях равновесия образуется карбидуглеродная композиция, содержащая 2,8 % углерода, в условиях квазиравновесия – карбид циркония;

– в системе Zr–C–O–H–N также устойчив в интервале температур 2300-4000 К; при изменении соотношения $Zr:O:C$ от 0,25:0,50:0,19 до 0,25:0,50:0,75 степень превращения циркония в карбид изменится от 0,25 до 1;

– в обеих системах образование карбида циркония термодинамически возможно по газофазным реакциям с участием паров циркония и циана, т.е. по схеме «пар-кристалл», что позволяет прогнозировать достижение его высокого выхода в реальных условиях плазмосинтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы. /Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: издат. Центр «Академия», 2005 – 192 с.
2. Хартманн У. Очарование нанотехнологии / Перевод с нем. Т.Н. Захаровой под ред. Л.Н. Патрикеева – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008 – 173 с.
3. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии / А.И. Рудской. – СПб.: Наука, 2007 – 186 с.
4. 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.
5. Barin J. Thermochemical properties of Inorganic Substances / J. Barin, O. Knacke. – N-Y.: Academicpress, 1973. – 647 p.
6. JANAF Thermochemical tables. – Wash.Gov.print. off, 1966 – 1975.
7. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: справочник: в 3 т. / Под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНТИ, 1971–1973 гг.
8. Сурис А.Л. Термодинамика высокотемпературных процессов: справочник / А.Л. Сурис. – М.: Металлургия, 1985. – 568 с.

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЛАЗМОСИНТЕЗА ДИБОРИДА ТИТАНА

Для формирования представлений о механизме процессов боридообразования, протекающих при плазмообработке титан-борсодержащего сырья, изучены температурная зависимость состава образующихся газообразных и твердых продуктов, состав термодесорбированных с поверхности диборида титана газообразных соединений, морфология наночастиц. Анализ результатов позволяет предложить вероятный механизм образования диборида титана по схеме «пар – расплав – кристалл», включающий конденсацию паров титана в форме аэрозоля, борирование нанокapпель расплава бороводородами и кристаллизацию расплава титан – бор. Составлена обобщенная гипотетическая схема боридообразования, содержащая 2 зоны: высокотемпературную (5400 – 3500 K) формирования реакционной смеси, в которой происходят процессы испарения порошкообразной титан-борсодержащей шихты, «газификации» бора в бороводороды, и более низкотемпературную (3500 – 2000 K), в которой происходит конденсация паров титана, значительное снижение концентрации бороводородов и образование диборида титана.

The temperature dependence of the composition of the gaseous and solid products formed, the composition of gaseous compounds thermodesorbed from the surface of titanium diboride, and the morphology of nanoparticles were studied in order to form ideas on the mechanism of boride formation processes occurring during plasma treatment of titanium-boron-containing raw materials. Analysis of the results suggests a possible mechanism for the formation of titanium diboride in the "vapor-melt-crystal" scheme, which includes the condensation of titanium vapor in the form of an aerosol, the boron nano-drop of the melt with borohydrides, and the crystallization of the titanium-boron melt; A generalized hypothetical scheme of boride formation has been compiled, containing 2 zones: a high-temperature (5400-3500 K) for the formation of a reaction mixture in which evaporation of a powdered titanium-boron-containing charge occurs, "gasifica-

tion" of boron into borohydrides, and a lower-temperature (3500-2000 K), In which condensation of titanium vapor occurs, a significant decrease in the concentration of borohydrides and the formation of titanium diboride.

Введение

Современная металлургия обеспечивает мировую экономическую систему разнообразной металлопродукцией как массового, так и специального назначения. По данным World Steel Association, в структуре потребления металлопродукции 94 % приходится на сплавы железа, цветных металлов – 5 %, 1% составляет разнообразная по номенклатуре группа металлосодержащих материалов с особым комплексом свойств. В этой группе важное место занимают бориды металлов подгрупп титана, ванадия и хрома, материалы и сплавы на их основе, которые благодаря уникальному сочетанию практически значимых свойств применяются в машино-, авиа- и ракетостроении для решения прикладных инженерно-технических и производственных задач, требующих высокотемпературных, сверхтвердых, жаропрочных, жаростойких, износоустойчивых конструкционных, огнеупорных, наплавочных материалов и защитных покрытий, способных работать в экстремальных условиях.

В эту группу входит диборид титана TiB_2 , исследованный и введенный в обращение научной школой известного российского ученого-материаловеда Самсонова Г.В. более 50 лет назад и востребованный до сих пор в технологии различных материалов: металлокерамических инструментальных и конструкционных, огнеупорных и абразивных, напыляемых и наплавляемых, для модифицирования и смачиваемых металлами покрытий [1,2]. При этом прикладной интерес к дибориду титана постоянно растет: в течение последних 10-ти лет в изданиях, индексируемых в базах данных «Scopus» и «Web of Science», размещено 115 публикаций, содержащих технологическую информацию о его производстве и применении, отражающих тенденцию перехода от применения диборида титана крупнозернистого к микро- и нанокристаллическому, что обусловлено стремлением ученых и технологов-практиков к достижению качественно нового уровня эксплуатационных свойств материалов и покрытий на его основе.

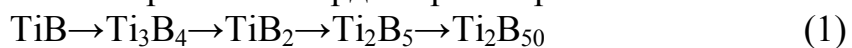
Основу современного производства диборида титана составляют карботермический, магниетермический и газофазный способы. Карбо- и магниетермический способы включают восстановление оксидов титана и бора углеродом или магнием и рафинирование продукта и реализуются в различных технологических вариантах. Газофазный способ основан на боридообразовании в условиях плазменного потока, реализуется в непрерывном режиме и обеспечивает производство нанокристаллического диборида титана. Выявлено 10 отечественных и 10 зарубежных фирм, реально позиционирующих себя в качестве производителей и поставщиков диборида титана. Российские производители предлагают к реализации диборид

титана магниетермического способа получения. Стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка полностью закрывается зарубежными поставщиками, среди которых такие компании как «American Elements», «Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.», «PlasmaChem GmbH», «NEOMAT Co». Это обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии диборида титана.

В связи с этим исследование и технологическая реализация процессов боридообразования при плазмометаллургической переработке титаноборсодержащего сырья является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для развития отечественной металлургии титана и его многофункциональных соединений сплавов, а также эффективного решения инновационных задач прикладного материаловедения.

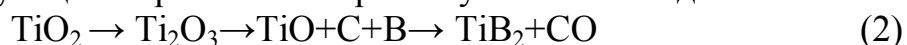
Современные представления о механизме образования

Анализ технологических результатов, приведенных в работах [1-6], свидетельствует о том, что механизм боридообразования в различных способах получения разный и определяется в первую очередь составом и состоянием шихты, кинетическими факторами реализуемых процессов – крупностью порошков реагентов, их чистотой, температурой, общим давлением в реакционном объеме, изотермичностью реактора, выбором газовой среды и др. Исследование и описание особенностей этих процессов осложняется возможностью образования в системе Ti-B следующих четырех боридов, а так же высокобористого твердого раствора



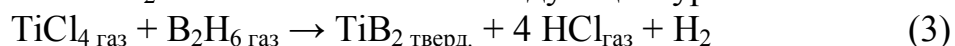
В основе образования TiB_2 , реализуемого при спекании и горячем прессовании при температурах ниже температуры плавления исходных веществ, лежит твердофазное взаимодействие. Лимитирующей стадией, определяющей параметры процесса, является диффузия бора в металл через слой образующегося продукта, в составе которого могут быть бориды TiB , Ti_3B_4 . При этом реальные скорости диффузионных процессов определяются крупностью частиц исходных порошков титана и бора, степенью однородности смеси, плотностью прессования, наличием и толщиной оксидных пленок, присутствием адсорбированных газов, средой, в которой осуществляется процесс. Для ускорения диффузионных процессов спекание трансформируется в сплавление, а горячее прессование проводят при температуре, превышающей температуру плавления титана в смеси титан-бор. Для полной гомогенизации диборида титана и получения из него очень плотных изделий зачастую дополнительно проводят измельчение спеченных заготовок и повторное прессование.

При углеродоборотермическом способе образования TiB_2 реакция восстановления TiO_2 углеродом в присутствии бора протекает в несколько стадий, соответствующих образованию промежуточных оксидов



Процесс может быть проведен в среде восстановительного газа при температуре 2173 – 2273 К. Лучшие результаты достигаются при проведении процесса в вакууме. За счет непрерывного удаления монооксида углерода и смещения равновесия реакции в сторону образования TiB_2 температура восстановления снижается до 1723 – 1973 К, уменьшается содержание углерода в TiB_2 , исключается его окисление и азотирование. Механизм процессов в этом случае определяется термодинамической устойчивостью оксидов и упругостью паров оксидов и субоксидов.

При образовании TiB_2 осаждением из газовой фазы, основанном на взаимодействии газообразных или легколетучих соединений титана и бора в присутствии водорода, последовательно и параллельно реализуется целая совокупность физических и химических процессов. Механизм боридообразования включает переход твердых и жидких исходных веществ в парообразное состояние, пиролиз или восстановление химических соединений, содержащих титан, бор или оба этих компонента одновременно, до ионного или атомарного их состояния, газофазную и гетерофазную диффузию компонентов в реакционной зоне, непосредственное химическое взаимодействие между ними, гетерогенное зародышеобразование TiB_2 и рост его кристаллов, отвод из газовой фазы побочных продуктов. Один из вариантов газофазного получения TiB_2 может быть описан следующим уравнением



Цель, гипотезы, методология

Целью настоящей работы является исследование процессов боридообразования при обработке титан-борсодержащего сырья в условиях плазменного потока, описание вероятного механизма их протекания и определение возможности технологического управления содержанием сопутствующих дибориду титана примесей, в том числе свободного бора.

Для экспериментального исследования процессов боридообразования использовался трехструйный плазмометаллургический реактор, включающий также системы электро-, газо-, водоснабжения и вентиляции, контрольно-измерительных приборов и автоматики, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов плазмообработки. Теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики реактора приведены в таблице 1, а методы их экспериментального определения и расчета описаны в работах [7-9].

Для генерации плазменного потока используются три электродугowych подогревателя газа (плазмотрона) ЭДП-104АМ постоянного тока мощностью до 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Для подачи в реактор высокодисперсного сырья и газообразного углеводорода используется водоохлаждаемая фурма. Для снижения радиального градиента температуры в пристеночной зоне канал реактора футеруется изнутри высокотемпературным теплоизоляционным

материалом – цилиндрическими вставками из диоксида циркония с внутренним диаметром 0,054 м.

Таблица 1 – Основные характеристики 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
Внутренний диаметр, м	0,054
Объем реактора, м ³	0,002
Футеровка канала реактора	диоксид циркония
Температура плазменного потока, К	5400 (L*=0) – 2600 (L=20)
Температура футеровки, К	1650 (L=0) – 500 (L=20)
Удельная электрическая мощность, МВт/м ³	2140
Ресурс работы, ч - анода; - катода	3000-3200; 100-110
Загрязнение диборида титана продуктами эрозии, % - анода; - катода	Cu – 0,0001; W – 0,000002
L* - относительная длина реактора	

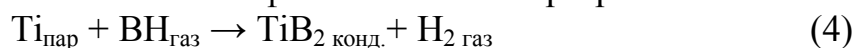
В качестве титан-борсодержащих компонентов шихт использовались порошки титана марки ПТН-8 (вариант 1), диоксида титана марки Р-1 (вариант 2), бора марки Б-99. Порошки имеют размерный диапазон и характеризуются следующим распределением по фракциям: титан 0,5 – 4 мкм и + 0,5 – 2 мкм - 48,2 %, +2 – 4 мкм - 51,8 %, диоксид 0,2 – 1,0 мкм и + 0,2 – 0,5 мкм - 48,7 %, + 0,5 – 1,0 мкм - 51,3 %, бор 0,05 – 0,25 мкм и + 0,05 – 0,125 мкм – 53,2 %, +0,125 – 0,25 мкм - 46,8 %. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовался технический азот (ГОСТ 9293-84, изм.), восстановителя – природный газ с содержанием метана до 93,6 % об., технологической добавки – водород (ГОСТ 3022-80, изм.).

При получении TiB₂ в условиях плазменного потока возможности изучения процесса боридообразования еще более ограничены, что обусловлено следующими причинами: 1) чрезвычайно высокие температуры: среднемассовая температура составляет 2800÷5400 К; 2) высокие скорости движения турбулентной реакционной химически активной смеси – (40÷60 м/с); 3) кратковременность процесса, оцениваемая на уровне 15 мс; 4)

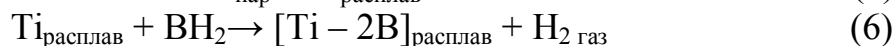
крайне ограниченный объем реакционной зоны, составляющий $0,0001 \text{ м}^3$; 5) практическая недоступность реакционной зоны для зондовой диагностики ввиду значительного возмущающего воздействия водоохлаждаемого зонда, технически исполнимого с наружным диаметром не менее $0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; 6) сложный состав газовой фазы, подлежащий определению только после закалки и, возможно, при этом изменяющийся; 7) непреодолимые пока трудности определения содержания в газовой фазе нестабильных борородов. В то же время изучение механизма боридообразования наряду с научной имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет установить возможность управления содержанием примесей, в том числе содержанием свободного бора.

Результаты термодинамического моделирования процессов боридообразования, описанные в работах [10-12], позволяют выдвинуть две научные гипотезы образования TiB_2 в условиях плазмообработки шихты:

– при взаимодействии в газовой фазе по схеме «пар-кристалл»



– при взаимодействии титансодержащего металлического аэрозоля с газообразными борородородами по схеме «пар-расплав-кристалл»



Для подтверждения гипотетических представлений, накопления и анализа необходимой научной информации были проведены следующие исследования:

1) Изучена температурная зависимость состава газообразных и твердых продуктов плазмообработки шихты. Для этого процесс проводили в реакторе различной длины – от 6 до 24 калибров, что позволило изменять температуру закалки продуктов от 4000 до 2000 К и осуществлять её при истечении газового потока из реактора в осадительную камеру со скоростью 10^4 - 10^5 градусов/с. Нанопродукты, осажденные на водоохлаждаемой поверхности осадительной камеры, анализировались для определения фазового и химического составов (см. рисунок 3.17). При каждой температуре закалки с помощью зонда также отбирались пробы газо-порошковой смеси. Для этих целей использовался стальной интенсивно охлаждаемый зонд (расход воды $0,050 \text{ кг/с}$), выполненный в виде трубки с внутренним диаметром $0,003 \text{ м}$ и длиной $0,5 \text{ м}$, последовательно соединенной с фильтром, стеклянной емкостью с поглотителем (этиловым спиртом), пипеткой, расходомером и вакуумным насосом КВН-8, создающим разрежение до 20 кПа . Зонд устанавливался на удаление 1 калибр от входа газового потока в осадительную камеру ортогонально потоку таким образом, чтобы его газозаборное отверстие совпадало с осью реактора. При зондировании скорость закалки газопорошковой смеси составляла порядка $5 \cdot 10^4$ граду-

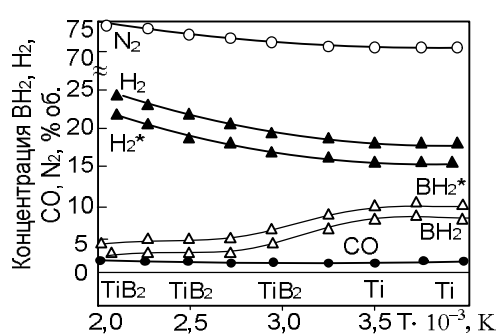
сов/с. Фильтр выполнялся из двух соприкасающихся основаниями конусов, разделенных фильтрующей перегородкой из стальной сетки саржевого плетения марки С-120 и обеспечивал выделение из пробы порошков, предохраняя их от контакта с воздушной атмосферой. Емкость с поглотителем позволяла улавливать борсодержащие соединения. Проба обеспыленного газового потока отбиралась в пипетку. Состав газовой фазы определялся хроматографически (см. рисунок 1). Кривые H_2^* и BH_2^* соответствуют 1,5-кратному избытку бора.

2) Изучен с помощью масс-спектрометрического анализа состав продуктов термодесорбции образцов, отобранных при зондировании (см. таблицу 2)

3) Изучена с помощью растровой электронной микроскопии морфология наночастиц TiB_2 (см. рисунок 2)

Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов подтверждает присутствие в азотно-водородном потоке газообразных борсодержащих соединений. В масс-спектрах продуктов вакуумной термодесорбции присутствуют компоненты с молекулярными массами 12,13, предположительно соответствующие BH и BH_2 . Сопоставление температурной зависимости концентраций BH и BH_2^* , рассчитанных по определенному экспериментально содержанию в газовой фазе бора, и изменения фазового состава уловленных порошкообразных продуктов подтверждает безусловное участие газообразных соединений бора в боридообразовании. В то же время изучение формы и размера частиц TiB_2 , полученного в виде нанопорошка с шаровидными частицами, однозначно указывает на формирование их по механизму «пар-расплав-кристалл».

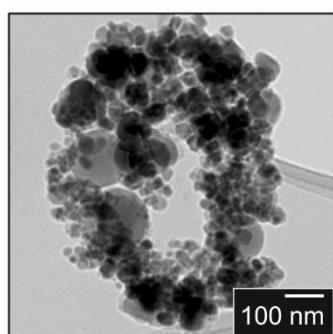


$\bar{a} \pm \Delta a$	Температура, К			
	2000	3000	3500	4000
H_2	$23,12 \pm 0,94$	$19,31 \pm 0,82$	$18,72 \pm 0,71$	$18,11 \pm 0,73$
BH_2	$0,82 \pm 0,06$	$3,62 \pm 0,10$	$7,00 \pm 0,39$	$7,31 \pm 0,42$
H_2^*	$21,05 \pm$	$17,62 \pm 0,53$	$16,05 \pm 0,50$	$18,25 \pm 0,44$
BH_2^*	$3,37 \pm 0,10$	$6,54 \pm 0,28$	$9,12 \pm 0,49$	$10,21 \pm 0,63$
N_2	$74,35 \pm 1,23$	$74,00 \pm 1,36$	$73,65 \pm 1,21$	$73,51 \pm 1,44$
CO	$0,98 \pm 0,04$	$1,00 \pm 0,05$	$1,14 \pm 0,04$	$1,11 \pm 0,05$

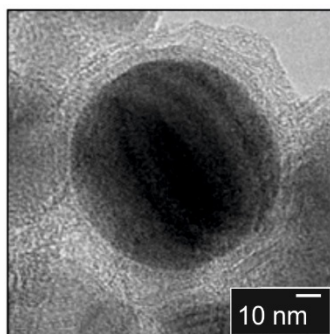
Рисунок 1 – Температурная зависимость состава газообразных и фазового состава твердых продуктов взаимодействия титана с бором в потоке азотной плазмы ($\bar{a} \pm \Delta a$ – средние арифметические значения и доверительные интервалы концентраций).

Таблица 2 – Состав и количества продуктов вакуумной термодесорбции образцов TiB_2 , неконтактировавших с атмосферой

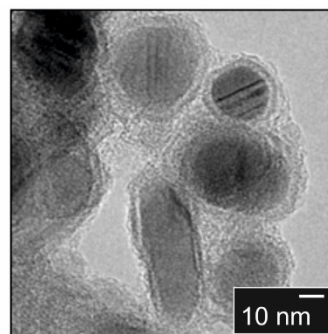
Характеристика	TiB_2 (1)	TiB_2 (2)
Химический состав, %		
TiB_2	96,26	93,27
$\text{B}_{\text{свободный}}$	1,05	0,45
$\text{Ti}_{\text{свободный}}$	1,13	-
C	-	1,22
O	0,44	-
N	1,12	1,24
TiO_2	-	3,82
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	45000	37000
Размер* частиц, нм	37	45
Молекулярные массы продуктов десорбции	2,12 – 13, 26 - 28, 32-36	2,12-12, 14- 16, 26-28, 32-36
Предполагаемый состав продуктов десорбции	H_2 , BH , BH_2 , N_2 , CO , O_2	H_2 , BH , BH_2 , CH_3 , CH_2 , N_2 , CO , O_2
Количество десорбированных газообразных продуктов	1,24	1,36
* – рассчитывался по величине удельной поверхности		



а



б



в

Рисунок 2 – Микрофотографии нанокристаллического диборида титана TiB_2 (1) (а – частицы и агрегаты; б – морфологическая картина агрегата; в – отдельные частицы)

Полученные результаты и их обсуждение делают возможным описание процесса боридообразования в виде следующей схемы, включающей две основные температурно-пространственные зоны и представленной на рисунке 3.

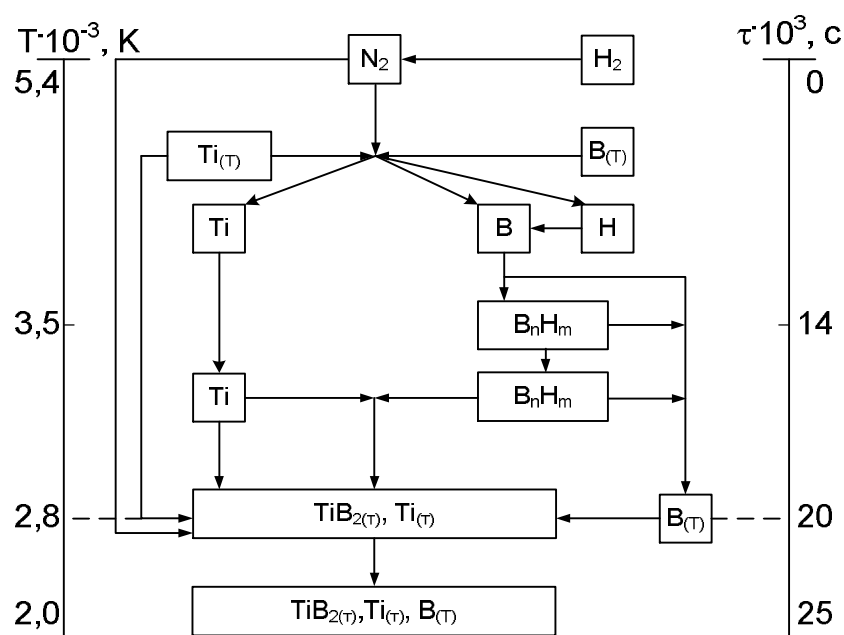


Рисунок 3 – Предполагаемая схема взаимодействия титана с бором в потоке азотно-водородной плазмы

Зона 1 соответствует температурному интервалу 5400-3500 К. В ней протекают процессы тепло- и массообмена и формирование реакционной смеси заданного состава: активное перемешивание азотно-водородного плазменного потока и порошкообразной титан-борсодержащей шихты, нагрев, плавление и испарение титана и бора, «газификация» бора в бороводороды.

Зона 2 соответствует температурному интервалу 3500-2000 К. Характерная особенность зоны – существенное снижение концентрации в газовом потоке бороводорода BH_3 , соответствующее появлению в продуктах TiB_2 . Это позволяет предположить, что образование TiB_2 возможно при кристаллизации расплава титан – бор – продукта борирования бороводородами металлического аэрозоля, формирующегося в потоке при объемной конденсации паров титана. Характер изменения концентрации BH_3 с температурой при 1,5 кратном избытке бора в шихте подтверждает устойчивость его в пределах температурной зоны и свидетельствуют о реальной возможности ограничения содержания свободного бора в дибориде титана. Сформировавшиеся в рассматриваемой зоне боридные наночастицы активно адсорбируют технологические газы и газообразные продукты боридообразования.

Заключение. Процесс боридообразования с получением TiB_2 в условиях плазмообработки шихты характеризуется особенностями, существенно отличающими его от традиционных технологических вариантов. Образование TiB_2 возможно при кристаллизации расплава титан-бор-продукта борирования бороводородами металлического аэрозоля, формирующегося

в потоке при объемной конденсации паров титана. Наряду с обсуждаемым механизмом возможны и иные, не выявленные пока доступными средствами диагностики реакционные схемы, но характерные для высокотемпературных неидеальных химико-металлургических реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов В.С. Тугоплавкие металлы IV – VI групп и их соединения. Структура, свойства, методы получения : учеб. пособие / В.С. Панов. – М. : МИСиС, 2006. – 63 с.
2. Ефимова К.А. Физико-химические свойства диборида титана: анализ, актуализация, оценка практической значимости в современных условиях / К.А. Ефимова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. – СибГИУ. – Москва-Новокузнецк. – 2016. – В. 37. – С. 90 – 102.
3. Ефимова К.А. Современное состояние производства диборида титана: оценка, определение доминирующих тенденций и перспектив / К.А. Ефимова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – № 2. – С. 144-158.
4. Ефимова К.А. Разработка технологии плазменного синтеза нанопорошка диборида титана – компонента функциональных композиционных покрытий / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Т.И. Алексеева // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. – СибГИУ. – Москва-Новокузнецк, 2015. – В. 35. – С. 112 – 119.
5. Крутский Ю.Л. Изучение процесса синтеза диборида титана с использованием нановолокнистого углерода / Ю. Л. Крутский, Е. В. Антонова, А. Г. Баннов, И. С. Фролова // Актуальные проблемы в машиностроении: мат. I Междунар. науч.-практ. конф., – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 453-458.
6. Ноздрин И.В. Борид хрома – нанотехнология, свойства, применение: монография / И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский. – Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014 – 233 с.
7. Ефимова К.А. Реактор для обработки и производства тугоплавких материалов: теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики / К.А. Ефимова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Т.И. Алексеева// Minsk International Heat and Mass Transfer Forum MIF-XV. –2016. - pp. 72-76.
8. Галевский Г. В. Применение плазменного нагрева в производстве высокотемпературных боридов и карбидов / Г. В. Галевский, В. В. Руднева, И. В. Ноздрин, С. Г. Галевский, К. А. Ефимова // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра: мат.XIV Всеукр. науч.-практ. конф. – Киев, 2016. – С. 248 – 259.
9. Галевский Г.В. Разработка научных и технологических основ плазменного синтеза наноборида титана / Г.В. Галевский, К.А. Ефимова, В.В.

Руднева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Metallургия и материаловедение. – 2015. – № 2(219) – С.141 – 150.

10. Галевский Г.В. Моделирование процессов боридо- и карбидообразования при переработке титансодержащего сырья в плазменном реакторе / Г.В. Галевский, В.В. Руднева, А.К. Гарбузова, К.А. Ефимова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Metallургия и материаловедение. – 2016. – № 1(238). – С. 90-99.

11. Ефимова К.А. Термодинамическое моделирование плазмосинтеза диборида титана / К.А. Ефимова, Г.В. Галевский, В.В. Руднева// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Metallургия и материаловедение. – 2016. – №4(254)– С. 233 – 244.

12. Ефимова К.А. Термодинамическое моделирование параметров плазменного синтеза диборида титана / К.А. Ефимова, Г.В. Галевский, Т.И. Алексеева // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов : мат. V Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием. – Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2015. – С. 18-20.

УДК 669.046:536.45

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова

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

ОКИСЛЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИБОРИДА ТИТАНА ПРИ ХРАНЕНИИ И НАГРЕВАНИИ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость диборида титана при хранении и нагревании в воздушной среде. Диборид титана синтезирован плазменным и магнетермическим способами и имеет удельную поверхность $\text{м}^2/\text{кг}$: TiB_2 (1) – 43000, TiB_2 (2) – 38000, TiB_2 (3) – 2600. Установлено, что при хранении на воздухе в течение первых 24 часов диборид титана активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB_2 (1) достигает $11,06 \cdot 10^{-7}$, TiB_2 (2) – $8,15 \cdot 10^{-7}$, TiB_2 (3) – $31,5 \cdot 10^{-7}$ $\text{кг O}_2/\text{м}^2$. Для расчета окисленности получены аналитические зависимости. При нагревании на воздухе нанокристаллы диборида титана окисляются в интервале температур (623 – 673)

± 15 К, микрокристаллы при температуре 688 ± 5 К и выше. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются в интервалах температур $(550 - 870) \pm 12$ К и $(670 - 790) \pm 17$ К.

The oxidation and thermal-oxidative stability of titanium diboride are studied during storage and heating in air. Titanium diboride is synthesized by plasma and magnesium-thermal methods and has a specific surface area of m^2 / kg : TiB_2 (1) - 43000, TiB_2 (2) - 38000, TiB_2 (3) - 2600. It was found that when stored in air for the first 24 hours, titanium diboride actively adsorbs oxygen and moisture: the oxidation of TiB_2 (1) reaches $11.06 \cdot 10^{-7}$, TiB_2 (2) - $8.15 \cdot 10^{-7}$, TiB_2 (3) - $31.5 \cdot 10^{-7}$ $\text{kg O}_2 / \text{m}^2$. Analytical dependencies were obtained for the calculation of oxidation. When heated in air, titanium diboride nanocrystals are oxidized in the temperature range $(623 \pm 673) \pm 15$ К, microcrystals at a temperature of 688 ± 5 К and higher. The pyrolytic boron and carbon accompanying the diboride are oxidized in the temperature ranges $(550 \pm 870) \pm 12$ К and $(670 - 790) \pm 17$.

Введение

Наноматериалы, как правило, имеют высокую химическую активность, обусловленную следующими особенностями их кристаллического строения и энергетического состояния [1-4]:

1) Малый размер зерен обуславливает большую развитость и протяженность межзеренных границ: при размере зерна от 100 до 10 нм границы содержат от 10 до 50 % атомов нанокристаллического твердого тела.

2) Зерна в наносостоянии имеют различные атомные дефекты: вакансии, их комплексы, дислокации, количество и распределение которых качественно иное, чем в крупных зернах размером 5 – 10 мкм и более.

3) Исключительно высокая диффузионная подвижность атомов по границам зерен нанокристаллического твердого тела, в $10^5 - 10^6$ превосходящая таковую в обычных поликристаллах.

4) Возбужденное состояние в нанозернах атомных слоев вблизи их поверхностей, вызывающее сжатие кристаллов и отклонение в них атомов от положения, соответствующего равновесному.

5) Постоянное стремление наносистем к релаксации избыточной энергии.

В совокупности это приводит к проявлению ими наноразмерных эффектов в таких свойствах, как склонность к агрегированию, активное взаимодействие с атмосферными и технологическими газами, повышенная растворимость в жидких средах, диффузионная подвижность в матрицах композиционных материалов, способность в твердофазной коалесценции и спеканию и др. Особенности физико-химических свойств наноматериалов

обуславливают необходимость проведения их комплексной аттестации с обязательным определением характеристик, практически значимых при их дальнейшем применении, определении конкурентных преимуществ и реальной стоимости. В течение последних 15 лет опубликовано значительное количество работ, содержащих результаты исследования особенностей свойств нанопорошков металлов, карбидов, боридов, их композиций, а частности [5-8]. Их анализ в целом подтверждает специфику свойств нанокристаллических веществ и необходимость учета ее при проведении последующих технологических переделов с их участием. Однако для каждого вещества в наносостоянии характерны свои температурно-временные условия проявления размерных эффектов и конкретные уровневые значения, что позволяет в каждом случае рассматривать полученные результаты как новую информацию, имеющую научно-прикладное значение.

С учетом особенностей свойств нанокристаллических материалов по предложению их потребителей, начиная с 2000 года, расширен спектр сертификационных характеристик порошковой нанопроизводства. Наряду с традиционными характеристиками – фазовым и химическим составами, удельной поверхностью добавлены окисленность и температура начала окисления.

Цель и методика исследований

Целью настоящей работы является исследование окисленности и термоокислительной устойчивости в воздушной среде диборида титана нано- и микроразмерного уровня дисперсности и сопоставительный анализ результатов.

Окисленность определяется количеством кислорода (кг), приходящегося на 1 м² поверхности порошка. Определение удельной поверхности диборида титана проводилось на анализаторе TRISTAR 3020 и основано на методе низкотемпературной адсорбции азота.

Температура начала окисления соответствует изменению массы нанопорошка на 1 % при нагревании в воздушной среде. В качестве характеристики термоокислительной устойчивости может учитываться также наиболее вероятный температурный интервал, в котором начинается процесс окисления нанопорошка при нагревании на воздухе. Окисление порошков диборида титана в воздушной среде исследовалось методами термогравиметрии и высокотемпературной рентгенографии, для чего использовались дериватограф Setaram LabSys Evo и дифрактомер ДРОН-3 с приставкой ГПВТ-1500.

В качестве объектов исследования использовались неконтактировавшие с воздухом нанопрошки диборида титана, полученные плазмосинтезом из шихт Ti+B (TiB₂ (1)), TiO₂+B (TiB₂ (2)), а также его микропорошок магниетермического способа получения (TiB₂ (3)). Фазовый и химиче-

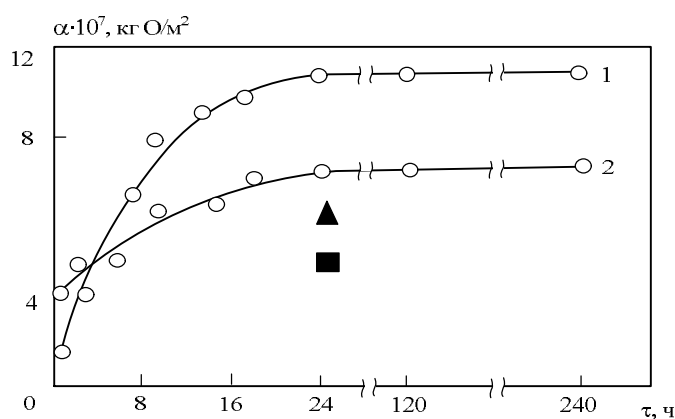
ский составы, удельная поверхность, начальная окисленность образцов приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых образцов диборида титана

Характеристики	TiB ₂ (1)	TiB ₂ (2)	TiB ₂ (3)
Фазовый состав	TiB ₂	TiB ₂	TiB ₂
Химический состав, %			
TiB ₂	96,32	93,61	97,24
свободный бор	1,00	0,42	0,42
титан свободный	1,15	-	-
диоксид титана	-	3,84	-
углерод	-	1,12	-
магний	-	-	0,41
кислород	0,61	1,54	0,82
азот	0,92	1,01	0,41
Удельная поверхность, м ² /кг	43000	38000	2600
Размерный диапазон частиц, мкм	0,01-0,06	0,02-0,08	<5
Окисленность $\times 10^7$, кг O ₂ /м ²	1,42	4,05	31,5

Определение окисленности

Изменение окисленности образцов диборида титана при контактировании их с воздухом в течение 240 часов представлено на рисунке 1. В течение первых 2-х суток содержание кислорода в образцах контролировалось каждые 4 часа, в последующие сутки - каждые 12 часов.



((1): $(1,42 \div 11,06) \pm (0,02 \div 0,18)$; (2): $(4,05 \div 8,0) \pm (0,06 \div 0,016)$)

Рисунок 1 – Изменение окисленности (α) образцов диборида титана при контактировании их с воздухом (▲, ■ – окисленность образцов 1 и 2, термодесорбированных в вакууме после хранения на воздухе в течение 24 часов)

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие четыре научных аспекта, подлежащих обсуждению:

1) Значительный рост окисленности происходит в течение первых 20-24 часов. В последующий период времени окисленность практически не меняется. При этом отмечается увеличение окисленности для TiB_2 (1) приблизительно в 8 раз (с $1,42 \cdot 10^{-7}$ до $11,06 \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$), для TiB_2 (2) - ~ в 2 раза (с $4,05 \cdot 10^{-7}$ до $8,15 \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$). Оксиды титана и бора на рентгенограммах образцов не обнаруживаются. Повышение окисленности вероятнее всего связано с адсорбцией кислорода и паров воды. Этот факт подтвержден в целом ряде работ при исследовании высокотемпературных наноразмерных соединений [9-12]. Однако механизм сорбции – физическая адсорбция или хемосорбция – до сих пор не изучен.

Полученные данные позволили определить зависимость величины окисленности диборида титана от продолжительности контактирования его с воздухом, которая описывается для TiB_2 (1) уравнением вида

$$a = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^{-7} \quad (1)$$

а для TiB_2 (2) –

$$a = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

где a – окисленность, кг кислорода $\cdot \text{м}^{-2}$;

τ - продолжительность контактирования TiB_2 с воздухом, ч.

Эти зависимости графически представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

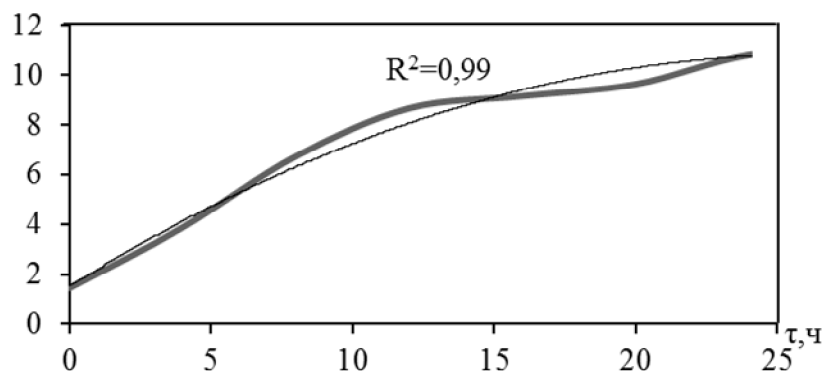


Рисунок 2 – Графическая зависимость окисленности (α) образцов диборида титана TiB_2 (1) при контактировании их с воздухом (τ – продолжительность контактирования TiB_2 с воздухом ($\tau=0 \div 24$ ч), ч, R^2 – коэффициент детерминации)

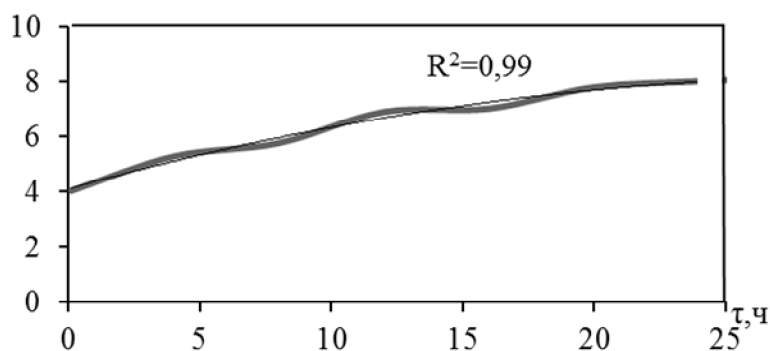


Рисунок 3 – Графическая зависимость окисленности (α) образцов диборида титана TiB_2 (2) при контактировании их с воздухом (τ – продолжительность контактирования TiB_2 с воздухом ($\tau=0\div 24$ ч), ч, R^2 – коэффициент детерминации)

2) Образец TiB_2 (2) более устойчив к воздействию кислорода воздушной атмосферы, что обусловлено адсорбцией им на стадии получения монооксида углерода, обладающего высокой пассивирующей способностью по отношению к высокодисперсным порошкам переходных металлов и их соединениям с углеродом, бором, азотом. Действительно, концентрация CO в газовой фазе для варианта 2 составляет 3,2 – 5 %, варианта 1 – 0,8 – 1,0 %.

3) Вакуумный отжиг образцов (1) и (2), контактировавших с воздухом, при температуре 973 К для десорбции газов обеспечивает удаление только 40 % кислорода (точки ▲ и ■ на рисунке 1). Оставшееся количество кислорода при этих температурных условиях, по-видимому, участвует в поверхностном окислении наночастиц, с образованием аморфных оксидных пленок, что подтверждается описанными ниже результатами определения температуры начала окисления исследуемых образцов.

4) Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 ($11,06 \cdot 10^{-7}$, $8 \cdot 10^{-7}$ и $31,5 \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$ поверхности соответственно) подтверждает, что по этой характеристике нанопорошки не только не уступают микропорошку, но и превосходят его.

Определение термоокислительной устойчивости

Процесс окисления при нагревании в воздушной среде обычно исследуется двумя методами: высокотемпературной рентгенографии и термогравиметрии. В первом случае изучается температурная зависимость интенсивности одного из характеристических пиков исследуемого материала, в связи с чем, особых требований по содержанию основной фазы и примесей к объекту исследований не предъявляется. Однако метод позволяет констатировать лишь интервал температуры, в котором начинается процесс окисления. Значительно более точно температура начала окисления может быть определена методом термогравиметрии, но при условии

отсутствия или минимального содержания примесей, окисляющихся в том же температурном интервале, что и основная фаза. Диборид титана, получаемый по вариантам 1 и 2, фактически представляет собой композиции составов, % $92,55\text{TiB}_2 + 1,05\text{Ti}_{\text{своб.}} + 1,05\text{B}_{\text{своб.}}$ (1) и $91,25\text{TiB}_2 + 0,83\text{B}_{\text{своб.}} + 1,21\text{C}$ (2). При этом пиролитические бор и углерод окисляются в интервалах температур 550-870 К и 671 – 790 К соответственно, что создает непреодолимые трудности корректного термографирования нанокристаллического TiB_2 (см. рисунок 4). Следует ожидать, что температура окисления нанокристаллического TiB_2 может быть на 30 – 50° ниже, чем микропорошка TiB_2 [13], окисление которого начинается при температуре 688 ± 5 К.

Рентгеновская термическая характеристика нанопорошков TiB_2 (1) и TiB_2 (2) и микропорошка TiB_2 представлена на рисунке 5. При нагревании образцов в интервале температур $(273 - 623) \pm 15$ К изменение интенсивности пиков не отмечается. При дальнейшем нагревании у образцов TiB_2 (1) и (2) в интервале температур $(623 - 673) \pm 15$ К и у образца микропорошка

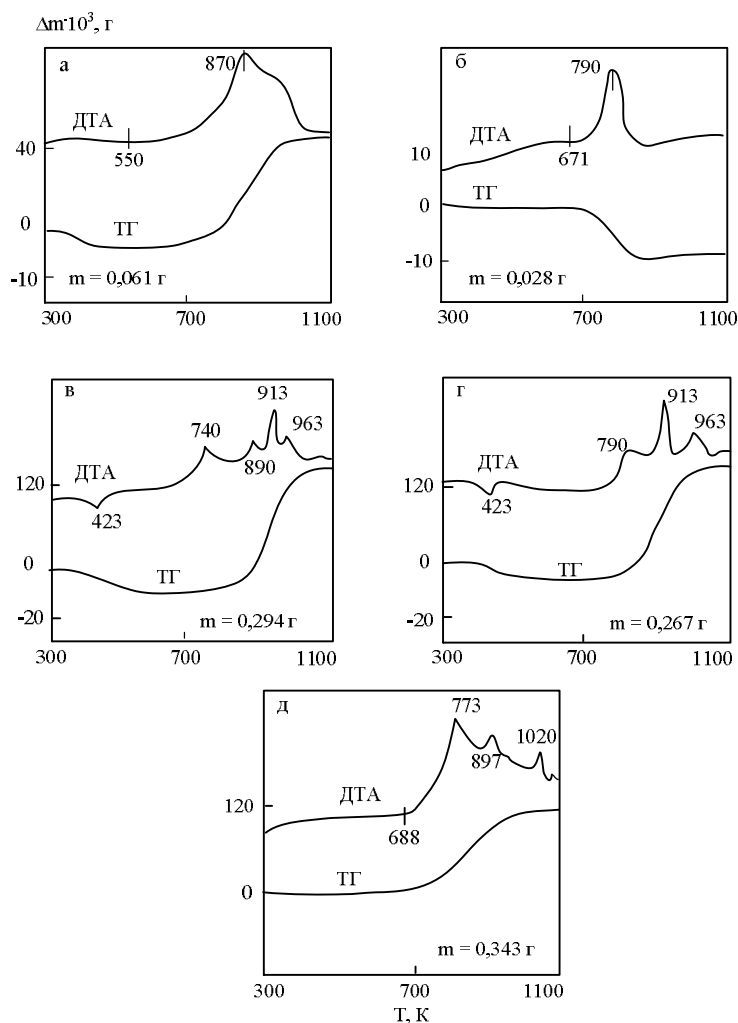


Рисунок 4 – Дериватограммы нанопорошков пиролитических бора (а), углерода (б), диборида титана (1) (в), (2) (г) и микропорошка диборида титана (д)

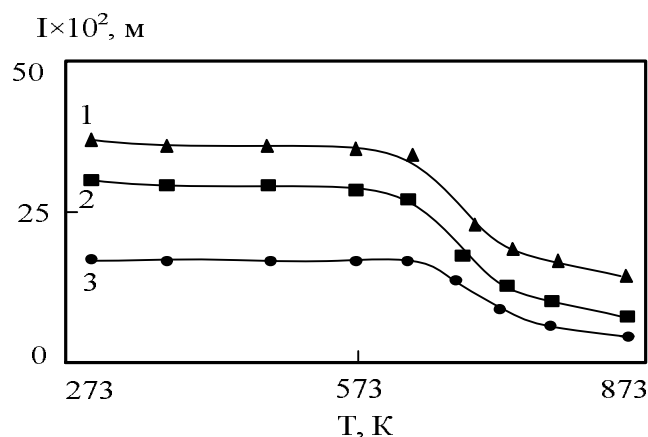


Рисунок 5 – Рентгеновская термическая характеристика диборида титана (1 – TiB_2 (1), 2 – TiB_2 (2), 3 – TiB_2 микропорошок)

TiB_2 в интервале температур $(673 - 723) \pm 15$ К наблюдается значительное снижение интенсивности пиков, продолжающееся и в более высокой температурной области, что свидетельствует о начале и развитии процессов окисления. В исследуемой области температур на рентгенограммах отсутствуют пики, соответствующие оксидам титана и бора, что позволяет предположить образование их в аморфном состоянии.

Заключение

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость на воздухе нано- и микропорошка диборида титана. Диборид титана при хранении на воздухе в течении первых 24 часов активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB_2 (1), синтезированного по варианту (Ti+B), изменяется в пределах $(1,42-11,06) \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$, TiB_2 (2), синтезированного по варианту (TiO_2+B) – $(4,05-8,15) \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$ и описывается уравнениями $a(1) = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^7$, $a(2) = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^7$. Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 ($11,06 \cdot 10^{-7}$, $8 \cdot 10^{-7}$ и $31,5 \cdot 10^{-7}$ кг $\text{O}_2/\text{м}^2$ поверхности соответственно) подтверждает, что по этой характеристике нанокристаллический диборид превосходит более крупный микрокристаллический.

Диборид титана термодесорбирует в вакууме при температуре 973 К не более 40 % поглощенного при хранении кислорода, что подтверждает адсорбционно-диффузионный механизм его взаимодействия с атмосферными газами и возможность окисления наночастиц с формированием аморфных оксидных слоев при нагревании. Нанокристаллы диборида титана при нагревании на воздухе окисляются в интервале температур $(623-673) \pm 15$ К, что на 66 градусов ниже температуры начала окисления его микрокристаллов, составляющей 688 ± 5 К. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются в интервалах температур $(550-870) \pm 12$ К и $(671-790) \pm 17$ К соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
2. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии / А.И. Рудской. – СПб.: Наука, 2007. – 186 с.
3. Колмаков А.Г. Основы технологий и применение наноматериалов/ А.Г. Колмаков, С.М. Баринов, М.И. Алымов. – М.: Физматлит, 2012. – 208 с.
4. Балоян Б.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Б.М. Балоян., А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов – М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Угреша», 2007. – 125 с.
5. Гуров А.А. Синтез и свойства нанопорошка диоксида титана для получения функциональных материалов / А.А. Гуров, В.И. Карманов, С.Е. Порозова, В.О. Шоков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т.16. – № 1. – С. 23-29.
6. Руднева В.В. Исследование сорбционной активности ультрадисперсных порошков тугоплавких соединений в воздушной среде / В.В. Руднева // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 5 – С. 16-19.
7. Ширяева Л.С. Исследование газонасыщенности, окисленности и термоокислительной устойчивости нанокарбонитрида хрома / Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева // Перспективные материалы. – 2014. – № 9. – С. 40–46.
8. Карпов И.В. Исследование технологических свойств нанопорошка TiN, синтезированного в плазме дугового разряда низкого давления / И.В. Карпов, А.В. Ушаков, А.А. Лепешев // Технология машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 39-42.
9. Лепешев А.А. Плазмохимический синтез нанодисперсных порошков и полимерных нанокомпозитов // А.А. Лепешев, А.В. Ушаков, И.В. Карпов. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 310 с.
10. Ноздрин И.В. Карбид хрома – нанотехнология, свойства, применение: монография / И.В. Ноздрин, Л.С. Ширяева, В.В. Руднева. – Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014 – 297 с.
11. Ноздрин И.В. Борид хрома – нанотехнология, свойства, применение: монография / И.В. Ноздрин, В.В. Руднева, Г.В. Галевский. – Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014 – 233 с.
12. Ушаков А.В. Физико-химические свойства порошка TiO₂, полученного в плазмохимическом реакторе низкого давления / А.В. Ушаков, А.А. Лепешев, И.В. Карпов, Г.Г. Крушенко // Технология металлов. – 2012. – № 10. – С. 27-32.

13. Иванов В.В. Изотермическое окисление порошков TiB_2 в воздухе / В.В. Иванов, И.А. Блохина, С.Д. Кирик // Огнеупоры и техническая керамика. – 2013. – № 4-5. – С. 10-15
14. Пойлов В.З. Термодинамика окисления боридов циркония и гафния / В.З. Пойлов, Е.Н. Прямилова // Журнал неорганической химии. – 2016. – Т. 61. – № 1. – С. 59-62

ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

В.Б. Деев¹, О.Г. Приходько², А.И. Куценко², И.Ф. Селянин²¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

РАСЧЕТЫ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ СИСТЕМ В ПРИБЛИЖЕНИИ ПОСТОЯННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

В статье показано, что в атомных системах приближение постоянной электронной плотности позволяет получить аналогичные методу Хартри-Фока результаты по расчету энергии связи электронной оболочки с одним квантовым числом n .

The article shows that in atomic systems the approximation of a constant electron density makes it possible to obtain results similar to the Hartree-Fock method for calculating the binding energy of an electron shell with a single quantum number n .

Энергию электронов в атомных системах, металлах и других конденсированных объектах рассчитывают квантомеханическими методами. Металлурги и металлофизики все шире их применяют для расчета термодинамических, прочностных и пластических свойств сплавов, фазовых границ на диаграммах состояния [1, 2]. Активное применение квантовофизических методик для расчета технологических свойств материалов сдерживает громоздкость математического аппарата и трудности в физической интерпретации полученных результатов.

Исторически первыми для расчетов энергии атомов и молекул применялись методы Хартри (Х) и Хартри-Фока (ХФ). Дальнейшим развитием методов Х и ХФ стал метод X_α (Хартри-Слэтера), который позволил перейти к расчету энергии и электронных спектров кристаллов, используя идеи псевдопотенциала. Основные идеи методов Хартри-Фока и X_α , которые позволяют перейти к приближению постоянной электронной плотности (ПЭП) для расчета простых и сложных атомных систем, заключаются в следующем.

В приближении Хартри-Фока полная энергия основного состояния равна [3]:

$$E_0^{X\Phi} = \sum_{i=1}^N h_i^0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N (I_{il}^0 - K_{il}^0), \quad (1)$$

где

$$h_i^0 = \int \varphi_i^*(\xi) h(r) \varphi_i(\xi) d\tau, \quad (2)$$

$$h(r) = -\frac{\hbar^2}{2\mu} + \frac{Ze^2}{r}, \quad (2a)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка.

$$I_{il}^0 = \frac{\int \int \varphi_i^*(\xi) \varphi_l(\xi) \varphi_i^*(\xi') \varphi_l(\xi')}{|r-r'|} d\tau d\tau', \quad (3)$$

$$K_{il}^0 = \frac{\int \int \varphi_i^*(\xi) \varphi_l(\xi') \varphi_i^*(\xi) \varphi_l(\xi')}{|r-r'|} d\tau d\tau', \quad (4)$$

где $\varphi(\xi)$ – одноэлектронные волновые функции (ВФ); μ – приведенная масса ядра с зарядом Ze и электрона; $|r - r'|$ – расстояние между электронами с обобщенными координатами ξ и ξ' ; $d\tau$ – элемент объема; ξ – обобщенная координата, которая включает пространственную и спиновую переменные.

Одноэлектронный интеграл h_i^0 представляет среднее значение кинетической и потенциальной энергий электрона в поле ядер; кулоновский интеграл I_{il}^0 – энергия кулоновского взаимодействия двух электронов в состояниях $\varphi_i(\xi)$ и $\varphi_l(\xi)$; обменный интеграл K_{il}^0 – его появление связано с антисимметрией ВФ.

С помощью приближения ХФ просчитаны волновые функции, уровни энергии и полные энергии атомов от He до Rb [4]. Основным недостатком метода – его громоздкость, что требует неоправданно больших затрат машинного времени, особенно при переходе к молекулам и кристаллам.

Для возбужденных и виртуальных состояний метод ХФ даже дает неверные результаты. В этом случае обменный интеграл (4) равен нулю и электрон действует сам на себя. Для основного состояния $E_{il}^0 - I_{il}^0$, эффект самодействия уничтожается. Таким образом, для возбужденных и виртуальных состояний количество взаимодействующих пар электронов (M_n) равно

$$M_n = N^2 / 2, \quad (5)$$

для основного состояния

$$M_n = N(N-1)/2. \quad (6)$$

Выход из данной ситуации был предложен Слэтером и Джонсоном, разработавшим расчетную методику X_α [5]. Основой метода является моделирование нелокального обменного оператора (4) в методе ХФ локальным обменным потенциалом Слэтера

$$V_{x_\alpha}(\bar{r}) = -9\alpha \left(\frac{3}{4\pi} \rho^\uparrow(\bar{r})^{\frac{1}{3}} \right), \quad (7)$$

где

$$\rho^\uparrow(\bar{r}) = -\sum_{i\uparrow} n_i (\varphi_i(\bar{r}))^2 \quad (8)$$

– плотность электронов с одним направлением спина ($\uparrow$); n_i – числа заполнения φ_i – состояния; α – параметр, задаваемый в пределах от 0,6 до 1,0.

В методе X_α выражение для полной электронной энергии имеет следующую форму

$$E_{x\alpha} = \sum_i n_i \int \varphi_i h(r) \varphi_i d\tau_i + \frac{1}{2} \int \rho(r) \rho(r') \frac{1}{|r-r'|} d\tau d\tau' + \\ + \frac{1}{2} \int [\rho^\uparrow(r) V_{x\alpha}^\uparrow + \rho^\downarrow(r) V_{x\alpha}^\downarrow] d\tau, \quad (9)$$

где $d\tau$ – элемент объема в координатном пространстве; $\rho(r) = \rho^\uparrow(r) + \rho^\downarrow(r)$ полная плотность электронов с обоими направлениями спинов; $0 \leq n_i \leq 1$; $h(r)$ – одноэлектронный интеграл (2а).

Первый член выражения (9) идентичен одноэлектронному интегралу (2) в приближении ХФ, второй и третий члены описывают кулоновское и обменное взаимодействие электронов, что соответствует интегралам (3) и (4).

Главное отличие методов ХФ и X_α проявляется в том, что в (9) числа заполнения не целые числа и $E_{X\alpha}$ представляет непрерывную функцию n_i , тогда как в однодетерминантном методе Хартри-Фока каждая спиновая орбиталь содержит один электрон либо является пустой.

В X_α – методе в качестве стандартного состояния принимается состояние с полуцелым заселением i и j , т.е.

$$n_i = n_j = \frac{1}{2}, \quad (10)$$

Аналогично, для энергии ионизации электрона из состояния i в состояние сплошного спектра с волновым вектором $\bar{k}$ принимается

$$n_i = n_{\bar{k}} = \frac{1}{2}. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11), принятые в X_α – методе, позволяют эффективно рассчитать одноэлектронные и виртуальные переходы, энергии ионизации, учесть релаксацию электронной структуры атомов и молекул при таких переходах.

Покажем, что X_α – метод, дополненный приближением постоянной электронной плотности ($\rho(r) = \text{const}$), дает те же эффективные результаты, значительно сокращая вычислительную работу, тем более в сравнении с методом Хартри-Фока.

Возьмем псевдопотенциал Слэтера

$$V(r) = -\frac{Z}{r} + \frac{n(n-1)}{2r^2}. \quad (12)$$

где n – главное квантовое число, Z – заряд ядра.

Решение уравнения Шредингера

$$\left(-\frac{1}{2} \nabla^2 + \frac{Z}{r} - \frac{n(n-1)}{2r^2} \right) \varphi_n = \varepsilon \varphi_n. \quad (13)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, дает для волновой функции φ_n , энергии электрона ε и среднего значения $\bar{r}$ выражения

$$\varphi_n = A r^{n-1} \exp\left(-\frac{Zr}{n}\right); E = -\frac{Z^2}{2n^2}; \bar{r} = \frac{1,5n^2}{Z}; \quad (14)$$

где A – постоянная нормирования.

При постоянной электронной плотности по сфере радиуса r_0 вместо уравнения (13) имеем классическое уравнение [6], записанное для атомных уровней энергии без учета взаимодействия между электронами

$$E = -\frac{1,5Z}{r} + \frac{1,125n^2}{r^2}. \quad (15)$$

После оптимизации по радиусу $dE/dr = 0$, имеем

$$E = -\frac{Z^2}{2n^2}, r_0 = \frac{1,5n^2}{Z}, \quad (16)$$

Из сравнения (14) и (16) имеем $r = r_0$, т.е. квантомеханическое среднее значение радиуса электронной орбитали равно радиусу атомной сферы в приближении постоянной электронной плотности. Следуя X_α -методу, запишем уравнение энергии многоэлектронной системы в приближении постоянной плотности для оболочки с квантовым числом n

$$E = -\frac{1,5Z \cdot N}{r} + \frac{1,125n^2 \cdot N}{r^2} + \frac{0,6N^2}{r} \alpha_1 - \frac{0,458N^{4/3}}{r} \alpha_1, \quad (17)$$

где N – число электронов в оболочке; α_1 – коэффициент, учитывающий отклонение плотности электронов в атоме от модели свободных электронов и подлежащий определению.

Первые два члена в (17) соответствуют первому члену в (9). Третий и четвертый члены описывают соответственно кулоновское и обменное взаимодействие между электронами, что равносильно второму и третьему членам в X_α – методе и получены при $(\rho(r) \rightarrow \text{const})$ [7].

Согласно теории возмущений Релея-Шредингера межэлектронные взаимодействия в основном состоянии вызывают виртуальные переходы в незанятые состояния дискретного и сплошного спектра [3]. Бесконечный ряд теории возмущений суммируется только для идеального случая модели свободных электронов с помощью диаграммной техники Фейнмана. Для дискретного спектра такие вычисления сделать невозможно.

Для определения коэффициента α_1 учтем, что переходы на виртуальные уровни одновременно ведут к изменению энергии и распределения электронной плотности основного состояния.

Так как число взаимодействующих пар электронов в основном и виртуальном состояниях равны $N(N-1)/2$ и $N^2/2$, то для определения коэффициента α_1 в (17) имеем следующее выражение

$$\begin{aligned} n_i \left(\frac{0,6N(N-1)}{r} - \frac{0,458N^{4/3}(N-1)}{r} \right) + n_j \left(\frac{0,6N^2}{r} - \frac{0,458N^{4/3}}{r} \right) = \\ = \alpha_1 \left(\frac{0,6N^2}{r} - \frac{0,458N^{4/3}}{r} \right) \end{aligned}$$

Принимая, согласно (10) и (11) $n_i = n_j = 1/2$, имеем

$$\alpha_1 = \frac{2N-1}{2N} \quad (18)$$

Пределы изменения α_1 от 0,75 до 1 при $N \geq 2$, что совпадает со значениями для коэффициента α , принимаемыми в X_α – методе.

Для сокращения дальнейших выкладок третий и четвертый члены в (17) используем для определения константы экранирования σ , приходящейся на $(N - 1)$ электронов данной квантовой оболочки

$$\frac{0,6N^2}{r} - \frac{0,458N^{\frac{4}{3}}}{r} \cdot \frac{2N-1}{2N} = \frac{1,5\sigma}{r}N, \quad (19)$$

где правая часть в (19) записана в общепринятой форме в приближении постоянной плотности электронов.

Тогда

$$\sigma = (0,4N - 0,3054N^{1/3}) \frac{2N-1}{2N}. \quad (20)$$

Уравнение (17) в одноэлектронном приближении принимает вид

$$E = -\frac{1,5(Z-\sigma)N}{r} + \frac{1,125n^2N}{r^2}. \quad (21)$$

В таблице 1 приведены вычисления по (21) полной энергии и энергии отдельных оболочек для некоторых атомных объектов. Для $1s^2$ -оболочки данные расчеты практически точно совпадают с таковыми по модели Хартри-Фока.

Таблица 1 – Расчетные значения энергии атомных объектов без учета эффектов проникновения

Энергия связи	Объект								
	H,	He,	Li ⁺ ,	B ²⁺ ,	Be		Ne		
	1s ²	1s ²	1s ²	1s ²	1s ²	1s ²	1s ²	2s ²	2p ⁶
$E^{ХФ}[4]$	0,4784	2,8617	7,2452	13,628	13,558	1,09	92,506	10,407	24,711
$E(21)$	0,4742	2,8517	7,2287	13,606	13,606	0,713	93,867	7,747	23,310

Для Be и Ne соответствие в расчетах нарушается. Это связано с тем, что $2s^2$ -электроны проникают под $1s^2$ -оболочку и увеличивают энергию связи.

В то же время энергия связи $1s^2$ -электронов с ядром уменьшается за счет частичной экранировки их $2s^2$ -электронами. Данный эффект учитывается в расчетах по Хартри-Фоку, но не учитывается в простой оболочечной модели по (21).

Выводы: Приближение постоянной электронной плотности дает те же результаты по расчету энергии связи электронной оболочки с одним квантовым числом n , что и метод Хартри-Фока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портной К.И., Богданов В.И. Фукс Д.Л. Расчет взаимодействия и стабильности фаз. – М.: Металлургия, 1981. – 248 с.
2. Жидомиров Г.М., Багатурьянц А.А., Аборин И.А. Прикладная квантовая химия. – М.: Химия, 1979. – 296 с.
3. Цюлике Л. Квантовая химия. – М.: Мир, 1976. – 512 с.
4. Fischer Ch. F. Atomic Data, 1972. Volume 4. P. 302.
5. Johnson K.H. – Ann. Rev. Physchem. 1975. Volume 26. P. 39.
6. Селянин И.Ф. К расчету энергии основного состояния двухатомных молекул // Журнал физической химии. 1977. № 12. С. 3017–3020.
7. Слэтер Дж. Диэлектрики, полупроводники, металлы: М.: Мир. 1969. – 647 с.
8. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия: М.: Эдиториал, 2001. – 896 с.

УДК 530.145

В.Б. Деев¹, О.Г. Приходько², А.И. Куценко², И.Ф. Селянин²

¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМОВ С РАЗЛИЧНЫМ НАБОРОМ КВАНТОВЫХ ЧИСЕЛ

В статье на основе модели постоянной электронной плотности с учетом взаимодействия электронных оболочек выполнены расчеты уровней энергии отдельных электронов и полной энергии многоэлектронных атомов. Результаты расчетов сравниваются с данными, полученными методом Хартри-Фока и экспериментом.

On the basis of constant electron density model based on the interaction of the electron shells of the calculations of the levels of specific electron energy and the total energy of the many-electron atoms. The results of the calculations are compared with the data obtained by the Hartree-Fock method and experiment.

Приближение постоянной электронной плотности (ПЭП), развитое в работе [1] позволяет рассчитать с хорошей точностью энергию электронной оболочки с одним квантовым числом n . Электроны с различными главными квантовыми числами так же взаимодействуют между собой за счет эффектов проникновения. Электроны ns -оболочек проникают под все нижележащие оболочки, np - и nd -электроны за счет центробежных эффектов выбрасываются за пределы $1s^2$ -оболочки.

Внешняя орбиталь, проникая во внутренние оболочки, испытывает сдвиг по фазе (δ_0) за счет большего эффективного заряда ядра, который действует на внутренние электроны. Радиальный сдвиг будет равен $\Delta r = \delta_0 / k$, где k – волновое число. На рисунке показаны изменения $2s$ волновой функции (ВФ) лития при ее проникновении в $1s$ - оболочку.

В работе [2] показано, что энергия i -орбитали ε_i , полная энергия E_0 многоэлектронного атома и эффективный заряд ядра Z^* равны

$$\varepsilon_i = -\frac{n_i^2}{2} (\overline{r_i^{-1}})^2 = -\frac{n_i^2}{2r_i^2}, \quad E_0 = \sum_i -\frac{n_i^2}{2} (\overline{r_i^{-1}})^2;$$

$$Z_i^* = \frac{n_i^2}{r_i} = n_i^2 \cdot \overline{r_i^{-1}}$$

где n_i – главное квантовое число; $\overline{r_i^{-1}}$ – квантовомеханическое среднее величины $1/r$; $r_i = 1/\overline{r_i^{-1}}$ – классическое значение радиуса орбитали, при котором выполняется теорема Виряла. Следовательно, определив $\overline{r_i^{-1}}$ или, аналогично r_i , с учетом проникновения i -орбитали во внутренние оболочки можно однозначно определить ε_i , E_0 , Z_i^* .

Радиальный сдвиг $2s$ -орбитали лития (Li) равен

$$\Delta r_{2s} = \frac{an_{1s}^2}{Z_{2s}^0} - \frac{an_{1s}^2}{Z_{1s}^*} = \frac{an_{1s}^2}{Z_{1s}^*} \cdot \left(\frac{Z_{1s}^*}{Z_{2s}^0} - 1 \right)$$

где $r_{2s}^{1s} = \frac{an_{1s}^2}{Z_{2s}^0}$ – радиальный размер $2s$ -орбитали внутри $1s^2$ -оболочки при действии на $2s$ -электрон внешнего заряда ядра $Z_{2s}^0 = Z_{\text{я}} - N_{1s^2} = 3 - 2 = 1$; $\frac{an_{1s}^2}{Z_{1s}^*}$ – радиальный размер $2s$ -орбитали внутри $1s^2$ -оболочки за счет эффективного заряда ядра Z_{1s}^* ; $Z_{\text{я}}$ – заряд ядра; N_{1s^2} – число внутренних электронов; a – вариационный параметр, определяющий ширину потенциальной ямы внутренних оболочек.

Тогда

$$r_{2s} = r_{2s}^0 - \Delta r_{2s} = \frac{n_{2s}^2}{Z_{2s}^0} - ar_{1s} \cdot \left(\frac{Z_{1s}^*}{Z_{2s}^0} - 1 \right); \quad (1)$$

$$E_{2s} = \frac{n_{2s}^2}{2r_{2s}^2}, \quad Z_{2s}^* = \frac{n_{2s}^2}{r_{2s}}, \quad (2)$$

где Z_{2s}^* – эффективный заряд ядра $2s$ -электрона с учетом эффектов проникновения.

Внешний электрон, проникая в $1s^2$ -оболочку, частично экранирует $1s^2$ -электроны от ядра и уменьшает энергию связи $1s^2$ -электронов на величину

$$\Delta E_{1s^2}^{2s} = (2Z_{1s}^* - \Delta Z_{1s}^{2s}) \cdot \Delta Z_{1s}^{2s} \cdot \left(\frac{ar_{1s}}{r_{2s}} \right)^3, \quad (3)$$

$\left(\frac{ar_{1s}}{r_{2s}} \right)^3$ – вероятность перекрытия $1s$ - и $2s$ - электронных плотностей; ΔZ_{1s}^{2s} – константа экранирования $1s$ -электрона проникающим $2s$ -электроном. Формула (3) получена из выражения $\Delta E_{1s}^{2s} = -Z_{1s}^{*2} + (Z_{1s}^* - \Delta Z_{1s}^{2s})^2$ при опускании члена $(\Delta Z_{1s}^{2s})^2$ – второго порядка малости.

Значение ΔZ_{1s}^{2s} можно определить, вскрывая физическое содержание выражений (11 – 17) из работы [1]. При этом $2s^\downarrow$ -электрон за счет сильной ортогональности, связанной с принципом Паули, выталкивает $1s^\downarrow$ -электрон с тем же направлением спина на периферию атома, за счет тождественности частиц.

Виртуальные комбинации $\varphi(2s^\downarrow)\varphi(1s^\downarrow)$ и $\varphi(1s^\downarrow)\varphi(2s^\downarrow)$ – равноценны, т.е. происходит виртуальный переход $2s^\downarrow \leftrightarrow 1s^\downarrow$. Электростатически внешний электрон взаимодействует только с одним электроном внутренней гемини, который имеет противоположный спин. За счет антисимметрии ВФ и тождественности частиц в области перекрытия электронных плотностей $1s^\downarrow$ - и $2s^\downarrow$ -электроны при виртуальном переходе обмениваются эффективными зарядами ядер $Z_{1s}^* \leftrightarrow Z_{2s}^*$, т.е. в области перекрытия на $2s^\downarrow$ -электрон действует заряд ядра Z_{1s}^* , на $1s^\downarrow$ -электрон заряд Z_{2s}^* , и константа экранирования ΔZ_{1s}^{2s} равна

$$\Delta Z_{1s}^{2s} = \frac{Z_{1s}^* - Z_{2s}^*}{N_{1s}^2}.$$

Уровень энергии $2s^2$ -электрона будет меньше его полной энергии и составит

$$I_{2s} = \varepsilon_{2s} + \Delta E_{1s^2}^{2s}, \quad (4)$$

где $\Delta E_{1s^2}^{2s}$ – энергия реорганизации внутренней $1s^2$ -оболочки.

Вариационный параметр a определяется численным методом после дифференцирования выражения (4) по a :

$$\frac{dI}{da} = \varphi \left(a, n_{1s}, n_{2s}, Z_{1s}^*, Z_{2s}^*, \Delta Z_{1s}^{2s} \right) = 0. \quad (5)$$

Энергия реорганизации внутренней $1s^2$ -оболочки после удаления внешнего $2s$ -электрона, исходя из (4), составит

$$\Delta E_{1s^2}^{2s} = I_{2s} - \varepsilon_{2s}. \quad (6)$$

Эффекты проникновения обусловлены тем, что электронные плотности различных оболочек перекрываются, т.е.

$$\int \varphi_i^2 \varphi_j^2 d\tau_i d\tau_{ij} \neq 0, \quad (7)$$

где φ_i^2, φ_j^2 – одноэлектронные ВФ, соответственно внутренней и внешней оболочки.

Величина интеграла (7) зависит от азимутального квантового числа l . В одноэлектронном приближении потенциал, действующий на электрон, равен

$$V(r) = -\frac{Z^*}{r} + \frac{l(l+1)}{2r^2}.$$

Он включает центробежный член $\frac{l(l+1)}{2r^2}$, который не дает электрону проникнуть к ядру при $l \geq 1$. Верхняя граница связанного состояния определяется условием $V(r) = 0$, что дает для точки поворота электрона выражение

$$r_{nl} = \frac{l(l+1)}{2Z_{ns}^*}.$$

где Z_{ns}^* – эффективный заряд ядра ns -электрона.

Радиальный сдвиг ВФ nl -электронов при $l \geq 1$ определяется по отношению к сдвигу ns -электронов. Без учета потенциала внутренних замкнутых оболочек энергии ns и nl -электронов совпадают, т.е. $Z_{ns}^* = Z_{nl}^*$. За счет эффекта проникновения ВФ ns -электронов сжимаются на величину Δr_{ns} . Эффективный заряд ядра ns -электронов увеличивается $Z_{ns}^* > Z_{nl}^*$ и становится равным $Z_{ns}^* = \frac{n^2}{r_{ns} - \Delta r_{ns}}$. Вариационный параметр a в формуле (1) определяет радиальную протяженность действия потенциала внутренних оболочек на внешние ns -электроны. Протяженность внутренней потенциальной ямы, действующей на nl -электроны уменьшается на величину

$$\Delta r_{nl}^0 = \frac{l(l+1)}{2Z_{ns}^*} \left(\frac{1}{Z_{nl}^0} - \frac{1}{Z_{ns}^*} \right), \quad (8)$$

которая определяется точкой поворота l -электронов. Окончательно радиальный сдвиг nl ВФ составит

$$\Delta r_{nl} = \left[a n_s^2 \frac{l(l+1)}{2Z_{ns}^*} \right] \cdot \left(\frac{1}{Z_{nl}^*} - \frac{1}{Z_{ns}^*} \right), \quad (9)$$

$$r_{nl} = r_{nl}^0 - \Delta r_{nl}, \quad Z_{nl}^* = \frac{n^2}{2r_{nl}}, \quad E_{nl} = \frac{Z_{nl}^{*2}}{2n^2},$$

где $r_{nl}^0 = n^2/Z_{nl}^0$ – классический радиус nl -орбитали без учета проникновения.

За счет частичного проникновения nl -электронов во внутренние оболочки, энергия последних по отношению к ΔE_{ns} понижается на величину

$$\Delta E_{nl} = \Delta E_{ns} \cdot \frac{1}{N_l(2l+1)} \left(\frac{r_{ns}}{r_{nl}} \right)^3, \quad (10)$$

где N_l – число внешних l -электронов. Вероятность перекрытия nl -электрона с замкнутыми внутренними оболочками в $(2l+1)$ раза меньше, чем ns -электронов. Это связано с тем, что по угловой координате один l -

электрон занимает объем $\tau_l = 1/(2l+1)$ объема всей сферы, ns -электроны по угловой координате занимают весь объем сферы.

Определив радиальные сдвиги всех nl -электронов и уменьшение энергии $\Delta E_{(n-1)l}$ внутренних электронов, для полной энергии i -квантовой оболочки E_i и атома получаем выражение

$$E_i = \sum_i^m -\frac{n_i^2}{2} \left(\frac{1}{r_i}\right)^2, \quad E_0 = \sum_j \frac{z_j^{*2}}{2n_j^2} N_j \quad (11)$$

где m – число электронов в i -квантовой оболочке, $\sum N_j = N_0$ – число электронов в атоме.

В таблице 1 приведены результаты расчета по формулам и дано сравнение с экспериментальными данными и данными расчета по Хартри-Фоку (ХФ).

Метод ХФ позволяет вычислить уровень энергии только основного состояния Li (2s), для возбужденных состояний этот метод дает неверные результаты. Расчеты возбужденных уровней энергии этим методом не проводят. Метод постоянной электронной плотности, как и метод X_a , дает хорошие результаты и для возбужденных состояний (ns , nl), так как основа расчетной методики у них одинакова. Полные энергии основного состояния атомов Be и Ne в оболочечной модели с учетом эффектов проникновения практически совпадают с таковыми, определенными ХФ-методом.

Таблица 1 – Расчетные значения атомных параметров в приближении постоянной электронной плотности

Атом	Квантовое состояние	Вариационный параметр a	Δr_{nl} (9)	Z_{nl}^* (9)	E_n (9)	$\Delta E_{(n-1)l}$ (3) (10)	I_{2S} (4)	$I_{экс}$ [3]	$I_{ХФ}$ [4] $E_{ХФ}$ [4]	E_0 (11)	$E_{экс}$ [4]
Li	2s	1,75	0,924	1,38	0,238	0,042	0,196	0,198	0,196	7,424	7,479
	3s	2,8	1,76	1,244	0,086	0,012	0,0741	0,0742	-		
	4s	3,6	2,26	1,164	0,0424	0,0038	0,0386	0,0386	-		
	5s	4,5	2,83	1,127	0,0253	0,0016	0,0237	0,0237	-		
	2p	1,75	0,206	1,054	0,138	0,0063	0,1317	0,132	-		
	3p	2,8	0,196	1,022	0,058	0,0022	0,0558	0,056	-		
	3d	2,8	0	1	0,555	0	0,555	0,555	-		
Be	1s ²	-	-	3,6886	14,610	0,11				14,57	14,59
	2s ²	1,425	0,456	2,09	1,092						
Ne	1s ²			9,628	93,86					128,54	128,08
	2s ²	1,324	0,0684	6,444	10,38	0,272					
	2p ⁶	1,324	0,021	5,738	24,69	0,577					

Точка поворота $3d$ -электронов Li выходит за пределы действия потенциала, действующего на $1s^2$ -электроны, $3d$ -ВФ практически совпадает с водородоподобной ВФ. На $3d$ -электрон дополнительно действует только слабый поляризационный потенциал от $1s^2$ -оболочки. Энергия ns и np -уровней Li с учетом эффектов проникновения несколько меньше экспериментальных значений, т.к. в расчетах не учитывалась поляризационная поправка.

Выводы: Расчеты уровней энергии и полной энергии атомных систем в приближении постоянной электронной плотности в пределах вычислительной ошибки совпадают со значением данных параметров, определенных методом Хартри-Фока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Куценко А.И. К расчету энергии атомов и их систем в приближении постоянной электронной плотности / Изв. вузов. Черная металлургия, 2002, № 10. С. 44–46.
2. Селянин И.Ф. Определение полной энергии атома в приближении Хартри-Фока по рассчитанному значению r^{-1} // Журнал физической химии. 1982. №11. С. 2846–2848.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия: М.: Эдиториал, 2001. – 896 с.
4. Fisher Ch. F. Atomic Data., 1972. Volume 4. P. 302.

УДК 530.145

В.Б. Деев¹, О.Г. Приходько², А.И. Куценко², И.Ф. Селянин²

¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕОРЕМЫ КУПМАНСА В ПРИБЛИЖЕНИИ ПОСТОЯННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

В модели постоянной электронной плотности для многоэлектронных атомов показано, что теорема Купманса выполняется с приближением, характерным для метода Хартри-Фока.

In the constant electron density model for many-electron atoms, it is shown that the Koopmans theorem is

satisfied with an approximation typical of the Hartree-Fock method.

В общем случае уравнения Хартри-Фока имеют одноэлектронную форму и записываются через нелокальный оператор Фока $\bar{F}$

$$\bar{F}\varphi_i = \varepsilon_i \varphi_i$$

где ε_i – орбитальные энергии; φ_i – одноэлектронные волновые функции (ВФ).

При этом сумма одноэлектронных энергий $\sum_i \varepsilon_i$ меньше полной энергии атома на энергию кулоновского взаимодействия электронов, т.е. при вычислении энергии орбитальных уровней электростатическое взаимодействие электронов учитывается дважды.

В приближении постоянной электронной плотности (ПЭП) уравнение для полной энергии E_i и уровня энергии ε_i i -орбитали [1] имеют вид

$$E_i = -\frac{1,5(Z-\sigma)}{r} + \frac{1,125n^2}{r^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = -\frac{1,5(Z-2\sigma)}{r_0} + \frac{1,125n^2}{r_0^2}, \quad (2)$$

при этом радиус орбитали

$$r_0 = \frac{1,5n^2}{(Z-\sigma)}, \quad (3)$$

вычисляется из уравнения для полной энергии атома (1).

Подставив (3) в (2) имеем

$$\varepsilon_i = -\frac{(Z-2\sigma)(Z-\sigma)}{n^2} + \frac{(Z-\sigma)^2}{2n^2} = -\frac{(Z-\sigma)^2}{n^2} \cdot \left(0,5 - \frac{\sigma}{Z-\sigma}\right) \quad (4)$$

Теорема Купманса утверждает, что орбитальные энергии в приближении ХФ равны энергии ионизации с обратным знаком. Основное условие, принятое при доказательстве теоремы Купманса состоит в том, что ВФ основного состояния, рассчитанные для N -электронной системы, остаются неизменными при удалении одной ВФ из детерминанта Слэтера. Это означает, что величина среднего значения $1/r = \overline{r_i^{-1}}$ остается неизменной или то же самое остается постоянным радиус орбитали (3), определенный для основного состояния по уравнению (2).

Символически теорема Купманса записывается так

$$\varepsilon_i = E_0^{\text{ХФ}}(N) - E_0^{\text{ХФ}}(N-1), \quad (5)$$

где $E_0^{\text{ХФ}}(N)$ и $E_0^{\text{ХФ}}(N-1)$ – полная энергия N и $(N-1)$ -электронной системы.

Для двухэлектронной системы ($1s^2$ -оболочка) после удаления одного электрона в потенциальном члене (1) константу экранирования нужно отбросить, а r_0 определить по (3) как и для основного состояния. Тогда

$$E_0^{\text{ПЭП}}(N-1) = -\frac{Z(Z-\sigma)}{n^2} + \frac{(Z-\sigma)^2}{2n^2}, \quad (6)$$

Так как $N=2$ в нашей задаче, то полная энергия атома с двумя электронами равна

$$E_o^{\text{ПЭП}}(N) = -\frac{(Z-\sigma)^2}{n^2}, \quad (7)$$

то после подстановки (6) и (7) в (5) имеем в приближении ПЭП

$$\varepsilon_i = -\frac{(Z-\sigma)^2}{n^2} - \left[\frac{Z(Z-\sigma)}{n^2} + \frac{(Z-\sigma)^2}{2n^2} \right] = \frac{(Z-\sigma)^2}{n^2} \cdot \left(0,5 - \frac{\sigma}{Z-\sigma} \right). \quad (8)$$

Выражения (4) и (8) идентичны, что показывает справедливость теоремы Купманса и в приближении ПЭП.

Результаты расчета орбитальных уровней ε_i двухэлектронных атомных объектов представлены в таблице 1.

В последней строке таблицы 1 приведены расчетные значения потенциала ионизации (I_σ) $1s$ -электрона с учетом релаксации ВФ оставшегося $1s$ -электрона. В этом случае для потенциала ионизации получается выражение

$$I = -\frac{Z-\sigma}{n^2} + \frac{Z^2}{2n^2}, \quad (9)$$

где σ определяется по формуле [1]:

$$\sigma = (0,4N - 0,3054N^{\frac{1}{3}}) \cdot \frac{2N-1}{2N}$$

Таблица 1 – Расчетные значения потенциалов ионизации I и орбитальных уровней ε_i двухэлектронных систем (а.е.)

Энергия, а.е.	H ⁻	He	Li ²⁺	Be ²⁺	B ³⁺	C ⁴⁺	N ⁵⁺	O ⁶⁺	Mg ¹⁰⁺
ε_i (8)	0,02265	0,8998	2,7770	5,6543	9,5315	14,4006	20,2858	27,163	64,6713
$I_{\text{экс}}$ [3]	0,02755	0,9037	2,7799	5,6558	9,5326	14,4100	20,2890	27,170	64,6750
I (9)	-0,0258	0,8517	2,7528	5,6058	9,4822	14,3689	20,238	27,115	64,6243

Расчет показывает, что всегда $\varepsilon_i > I$, аналогичная ситуация возникает и в расчетах по ХФ [4]. Так для He $\varepsilon_i = 0,9200$, если учесть релаксацию $1s$ - ВФ после удаления $1s$ -электрона, то потенциал ионизации будет равен $I_{\text{He}} = 2,8617 - 2,0000 = 0,8617$, т.е. опять $\varepsilon_i > I_{\text{He}}$.

Это связано с тем, что в методе ХФ кинетическая энергия равна

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2} \int 4\pi r^2 \left(\frac{d\varphi}{dr} \right)^2 dr, \quad (10)$$

где φ – самосогласованная ВФ.

При соблюдении условий теоремы Купманса после удаления одного электрона ВФ не изменяется. Следовательно, ВФ более диффузна, чем после

учета релаксации оставшейся электронной оболочки. Кинетическая энергия занижается, теорема Вириала нарушается, т.е.

$$E_{\text{кин}} < \frac{1}{2} E_{\text{пот}}, \quad \text{или} \quad \frac{1,125n^2}{r_0^2} < \frac{1,5Z^*}{2r_0}$$

где $E_{\text{пот}}$ – потенциальная энергия $(N-1)$ оставшихся электронов.

За счет более диффузной ВФ уменьшается и энергия кулоновского межэлектронного взаимодействия, что приводит к увеличению орбитального уровня энергии по сравнению с потенциалом ионизации, который рассчитан с учетом изменения ВФ оставшихся электронов.

В расчетах потенциала ионизации I и орбитального уровня энергии ε_i (табл.) не учитывалась корреляционная поправка. Поэтому расчетные данные всегда меньше данных эксперимента.

В физико-химических исследованиях атом или ион часто аппроксимируется сферой конечного радиуса. Предлагаемое приближение ПЭП дает методическую основу для определения классического размера кванто-механического объекта.

Теорема Купманса и выражения (4) и (5), полученные в приближении ПЭП, позволяют определить энергию реорганизации атома $E_i(N-1)$ после удаления электрона с I -орбитали. Она равна

$$\Delta E_i(N-1) = -E_i + \varepsilon_i = -\frac{n_i^2}{2} (\overline{r_i^{-1}})^2 + \varepsilon_i$$

При поочередном удалении всех электронов атома, каждый раз оставляя $(N-1)$ электрон, имеем

$$\sum \Delta E_i(N-1) = -\sum \frac{n_i^2}{2} (\overline{r_i^{-1}})^2 + \sum \varepsilon_i.$$

Следовательно, полная энергия реорганизации атома равна энергии кулоновского взаимодействия электронов и, используя данные расчетов по ХФ [4] для $(\overline{r_i^{-1}})$ и ε_i , можно определить величины $\Delta E_i(N-1)$

Методом ПЭП следует рассчитывать энергию возбужденного состояний атомов, используя данные по Z_{nl}^* для внутренних оболочек, рассчитанных в ХФ-приближении для основного состояния.

Релятивистские поправки к $(\overline{r_i^{-1}})$ а, следовательно, и к энергии орбиталей вычисляются в приближении ПЭП через эффективные заряды Z_{nl}^* [5]. Метод X_a (ХФС – для атомов) дает хорошие результаты для релятивистских значений энергии [6], но значение $(\overline{r_i^{-1}})$ значительно завышается за счет замены нелокального обменного потенциала ХФ на локальный потенциал Слэтера, как это показано в работе [2].

Релятивистские расчеты методом ХФ не проводились из-за неоправданно больших затрат машинного времени.

Электрон в классическом атоме находится в потенциальной яме глубиной

$$V(r_0) = \frac{Z^{*2}}{n^2},$$

кинетическая энергия электрона равна:

$$E_{\text{кин}} = \frac{Z^{*2}}{2n^2},$$

где Z^* – эффективный заряд ядра.

За счет волновых свойств электрон преодолевает потенциальный барьер высотой

$$\Delta V = V(r_0) - E_{\text{кин}} = \frac{Z^{*2}}{2n^2}.$$

Коэффициент прозрачности барьера в атомных единицах равен, согласно [7]:

$$D = D_0 \exp[-2\sqrt{2(V - E_{\text{кин}})}] = D_0 \exp\left(-2\frac{Z^*r}{n}\right), \quad (11)$$

D_0 – предэкспоненциальный множитель.

ВФ всех электронных состояний на периферии атома имеют вид [7]

$$\varphi \sim \exp\left(\frac{Z^*r}{n}\right)$$

Соответственно, электронная плотность дается выражением

$$|\varphi|^2 \sim \exp\left(\frac{2Z^*r}{n}\right). \quad (12)$$

Асимптотика поведения электронной плотности одинакова по (11) и (12). Следовательно, атом обладает как классическими так и квантовыми свойствами. Под воздействием измерительного импульса или потенциальных полей других атомов классический атом «разваливается» и превращается в квантовый объект и взаимодействует с соседними объектами квантомеханическим способом.

Цель настоящей работы показать, что приближение постоянной электронной плотности дает те же результаты, что и более громоздкое в математическом смысле приближение Хартри-Фока. Среднее математическое выражение $(\overline{r_i^{-1}})$ совпадает для обоих приближений. Следовательно, величины $(\overline{r_i^{-1}})$, Z_{nl}^* , ε_{nl} , которые необходимы для вычислений в приближении постоянной плотности, можно брать из таблиц [4], вычисленных в нерелятивистском приближении самосогласованного поля.

В металлах и сплавах, где потенциал, действующий на валентные электроны, практически постоянен, приближение постоянной электронной плотности будет наиболее эффективно. Авторы работы намерены это показать в последующих публикациях.

Выводы: Приближение постоянной электронной плотности позволяет учесть взаимодействие между электронными оболочками атома.

В данном методе расчета теорема Купманса выполняется с приближением, характерным для метода Хартри-Фока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Куценко А.И. К расчету энергии атомов и их систем в приближении постоянной электронной плотности / Изв. вузов. Черная металлургия, 2002, № 10. С. 44–46.
2. Селянин И.Ф. Определение полной энергии атома в приближении Хартри-Фока по рассчитанному значению r^{-1} // Журнал физической химии. 1982. №11. С. 2846–2848.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия: М.: Эдиториал, 2001. – 896 с.
4. Fisher Ch. F. Atomic Data. 1972. Volume 4. P. 302.
5. Соколов А.А., Тернов И.М. Квантовая механика и атомная физика.-М.: Просвещение, 1970.- 423 с.
6. Lu C.C., Carlson T.A., Malik F.B., Tucker T.C. Nestor C.W. Relativistic Hartree-Fock-Slater Eigenvalues, Radial Expectation Values, and Potentials for Atoms. //Atomic Data. 1971. Volume 3. pp. 1–131.
7. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Высшая школа. – 1968. – 620 с.

УДК 530.145

В.Б. Деев¹, О.Г. Приходько², А.И. Куценко², И.Ф. Селянин²

¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва

²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. Новокузнецк

РАСЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ПОПРАВКИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА В МОДЕЛИ ПОСТОЯННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

В данной модели получено выражение для расчета корреляционной энергии многоэлектронной системы. Результаты расчета по модели ПЭП сравниваются с энергией корреляции по Вигнеру, Гелл-Ману, Бракнеру и экспериментом.

In this model an expression is derived for calculating the correlation energy of a multielectron system. The calculation results for the CED model are compared with the Wigner correlation energy, Gell-Mann, Brackner and experiment.

В работах [1, 2] показано, что полную энергию атома в приближении Хартри-Фока (ХФ) можно рассчитать двумя методами: квантомеханически с использованием уравнения Шредингера и классически с использованием модели постоянной электронной плотности (ПЭП).

Конечные результаты по расчёту энергии атома и математического ожидания $\overline{r^{-1}}$ совпадают, если учесть, что численное моделирование многоэлектронной системы на основе уравнения Шредингера всегда даёт приближённые значения вычисляемой величины [3].

По определению [4], корреляционная энергия ($\Delta E_{\text{корр}}$) многоэлектронной системы равна

$$\Delta E_{\text{корр}} = E_0 - E_{\text{ХФ}},$$

где E_0 – полная энергия системы без учета релятивистских поправок; $E_{\text{ХФ}}$ – энергия, вычисленная в приближении Хартри-Фока.

В приближении Хартри-Фока учитывается только корреляция в движении электронов, обусловленная кинематическим принципом Паули: два электрона с параллельными спинами одновременно не могут находиться в одной точке координатного пространства. Электроны с противоположными спинами также коррелируют свое движение за счет электростатических сил взаимного отталкивания.

Впервые исторически корреляционную энергию электронов в атоме гелия вычислил Хиллерас [5]. Но предлагаемая им волновая функция содержит большое количество параметрических членов и для атомных систем, содержащих более двух электронов, не нашла применения.

Метод Бойса и Ханди [6], в котором используются корреляционные множители, также приводит к очень сложным волновым функциям, их трудно интерпретировать, что затрудняет объяснение особенностей строения атомных систем.

Для учета корреляции электронов в настоящее время применяют разложение по конфигурациям с базисом Хартри-Фока (КВ-метод) [6].

Волновую функцию в этом методе строят из суммы детерминантов Слэтера, куда входят орбитали основного состояния и орбитали однократно и двухкратно возбужденных состояний.

Расчет методом КВ основного $1s$ -состояния атома бериллия в базисе Хартри-Фока с 37 конфигурациями позволил учесть 88 % корреляционной энергии. Волновые функции высших орбитальных состояний разделяют электронные плотности по различным областям атомного пространства, что позволяет электронам с противоположными спинами находиться вдали друг от друга. Но корреляция носит кинематический характер, так как межэлектронные расстояния r_{ij} не закладываются в конструкцию волновой функции.

Технические проблемы, связанные с затратой машинного времени, не позволяют широко применять метод КВ для расчета атомов с зарядом ядра $Z > 20$, тем более сложных молекул и кристаллов.

Для оценки энергии корреляции в свободном электронном газе часто используют приближение Вигнера [7]

$$\Delta E_{\text{корр}} = -\frac{0,288}{r_s + 5,1} \quad (1)$$

где r_s – радиусы сферы, приходящейся на один электрон, которая даёт удовлетворительные результаты.

При выводе формулы (1) Вигнер сконструировал волновую функцию, которая позволила ему при $r_s \rightarrow \infty$ получать пространственное распределение свободных электронов, соответствующее ОЦК – координации. Число 5,1 в знаменателе (1) появилось для того, чтобы согласовать экспериментальное значение $\Delta E_{\text{корр}}$ с формульным значением при $2 \leq r_s \leq 10$ а.е., которые характерны для металлов и других кристаллов.

Гелл-Манн и Бракнер вычисляли $\Delta E_{\text{корр}}$ в другом предельном случае $r_s \rightarrow 0$. Они использовали разложение полной электронной энергии в ряд теории возмущений и смогли просуммировать этот ряд, используя диаграммную технику Фейнмана. Суммирование только по кольцевым диаграммам привело их к результату:

$$\Delta E_{\text{корр}} = \frac{\Delta E_{\text{кольц}}^{(n)}}{N} = \frac{3}{16\pi^6} \left(\frac{\pi^2}{ar_s} \right)^2 \times \\ \times \int k d\bar{k} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\ln \left(1 + \frac{Q_k(u)ar_s}{\pi^2 k^2} \right) - \frac{Q_k(u)ar_s}{\pi^2 k^2} \right] du \quad (2)$$

где k – волновой вектор; $\alpha = (4/9\pi)^{1/3}$; $Q_k(u)$ – интеграл Фурье, зависящий от волнового вектора k и переменной u .

Гелл-Манн и Бракнер использовали в подынтегральном выражении (2) для $Q_k(u)$ приближённую формулу

$$Q_k(u) = 4\pi(1 - u \cdot \text{arctg}(u^{-1})), \quad (3)$$

произвольно обрезали интеграл (2) по k на значении $k=1$ ($0 \leq k \leq 1$). Следовательно, рассмотрели случай, когда энергия электростатического взаимодействия $V(r_{12}) = r_{12}^{-1}$ намного превышает кинетическую энергию двух взаимодействующих электронов $E_{\text{кин}} = \hbar^2 k^2 / 2m$, где $\hbar$ – постоянная Планка, и m – масса электрона. Окончательно, для энергии корреляции, приходящейся на один электрон, при $r_s \ll 1$ получено выражение:

$$\Delta E_{\text{корр}} = -0,048 + 0,0311 \ln r_s. \quad (4)$$

При $r_s = 1$ энергии корреляции по Вигнеру и по Гелл-Манну, Бракнеру, соответственно, равны:

$$\Delta E_{\text{корр}}^{\text{В}} = 0,049 \text{ а.е.}, \Delta E_{\text{корр}}^{\text{Г-Б}} = 0,048 \text{ а.е.} \quad ;$$

С увеличением r_s значение $\Delta E_{\text{корр}}^{\Gamma-B}$ уменьшается более существенно, чем $\Delta E_{\text{корр}}^B$.

Как правило, оценку энергии корреляции для значения $2 \leq r_s \leq 10$ а.е. проводят по интерполяционной формуле, конструкция которой аналогична (4) [8]:

$$\Delta E_{\text{корр}} = 0,0575 + 0,0155 r_s \text{ (а.е.)} \quad (5)$$

Отметим, что основа расчета $\Delta E_{\text{корр}}$ по Вигнеру и Гелл-Манну, Бракнеру имеет квантомеханическое противоречие. По Вигнеру при $r_s \rightarrow \infty$ и $E_{\text{кин}} \rightarrow 0$ электроны строго занимают узлы ОЦК-решетки. По соотношению неопределенностей

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar, \quad (6)$$

где Δp , Δx – неопределенности в определении импульса и координаты частицы, электрон, локализованный в узле объемно-центрированной решетки ($\Delta x \rightarrow 0$) имеет бесконечно большой импульс ($p \rightarrow \infty$), а, следовательно, и кинетическую энергию $E_{\text{кин}} = p^2 / 2m \rightarrow \infty$.

Вигнер, наоборот, предположил, что электроны локализуются в определенных точках пространства при $E_{\text{кин}} \rightarrow 0$.

Гелл-Манн и Бракнер также рассмотрели случай при $E_{\text{кин}} \rightarrow 0$. Они произвольно обрезали интеграл (2) при $k = 1$, что соответствуют бесконечно малому значению импульса $\hbar k = p \rightarrow 0$ и $E_{\text{кин}} = \hbar^2 k^2 / 2m \rightarrow 0$. Из соотношения (6) при этом следует, что неопределенность в положении частицы $\Delta x \rightarrow \infty$, а, следовательно, и радиус сферы, занимаемой одним электроном $r_s \rightarrow \infty$. Но задача корреляции электронов, наоборот, решалась при $r_s \rightarrow 0$.

Возникает вопрос, почему конечные формулы (1) и (4) дают разумные результаты для $E_{\text{корр}}$? Объяснение следует искать в теореме Гельмана – Фейнмана [9].

Теорема утверждает, что градиент энергии многоэлектронной системы по некоторому параметру $dE / d\beta$ равен ожидаемому значению градиента гамильтониана по этому параметру $\partial H / \partial \beta$ (где параметр β расстояние между электронами для задачи корреляции). Гамильтониан

$$H = \frac{1}{2} \nabla^2 + \frac{1}{r_{ij}}, \quad (7)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, содержит чисто электростатический член $1/r_{ij}$, где r_{ij} – расстояние между i и j электронами, есть параметр задачи. Теорема справедлива только, если основное состояние системы описывается точными волновыми функциями. Вигнер, Гелл-Манн и Бракнер рассматривали коррелированное движение свободного электронного газа на компенсирующем фоне размазанного положительного заряда, когда точными волновыми функциями электронов будут плоские волны $\Psi \sim \exp(ikr)$. Используя такие волновые функции, авторы вышеназванных работ получили

практически правильные результаты для $\Delta E_{\text{корр}}$ рассчитав только классические электростатические взаимодействия при $E_{\text{кин}} \rightarrow 0$.

Корреляционная поправка в модели ПЭП. Модель постоянной электронной плотности позволяет определить корреляционную поправку к рассчитанной Хартри-Фоковской энергии, применяя классические приближения.

Разобьем объем многоэлектронного атома на геминальные области, в каждой из которых находится по два электрона с противоположными спинами с одинаковым набором квантовых чисел n, l, m . Идея такого разбиения принадлежит В.А. Фоку [10]. Следуя Фоку, основное состояние системы с четным числом электронов $N = 2n$ представим в виде волновой функции Ψ , составленной из антисимметризованного произведения n -геминалей:

$$\Psi = A O'_{\text{ас}} [\Psi_1(\xi_1, \xi_2) \Psi_2(\xi_3, \xi_4) \dots \Psi_t(\xi_{2n-1}, \xi_{2n})] \quad (8)$$

где A – нормировочный множитель; $O'_{\text{ас}}$ – оператор антисимметрии; ξ – обобщенная координата электрона, включающая пространственную и спиновую переменную.

В приближении геминалей для основного состояния атома бериллия вместо определителя Хартри-Фока $(\varphi_{1s}^{\uparrow} \cdot \varphi_{1s}^{\downarrow} \cdot \varphi_{2s}^{\uparrow} \cdot \varphi_{2s}^{\downarrow})$ имеем $O'_{\text{ас}} [\Psi_{1s}(1,2) \Psi_{2s}(3,4)]$, где $\varphi_{1s}^{\uparrow} \dots \varphi_{2s}^{\downarrow}$ – одноэлектронные волновые функции $1s$ и $2s$ -состояний с определенным направлением спина.

Два электрона в замкнутом пространстве геминали перемещаются по двум направлениям $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ (рисунок 1). Направления $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ могут совпа-

дать и не совпадать, т.е. их скалярное произведение подчиняется условиям $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = 0$ либо $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 \neq 0$.

На первом направлении вероятность корреляции $W_1 = r_{12} / r_1$, где r_{12} – минимальное расстояние, на которое могут сблизиться два электрона с противоположными спинами за счет их кинетической энергии. Аналогично, на втором направлении $W_2 = r_{12} / r_2$. Если электроны последовательно движутся по направлениям $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$, то вероятность корреляции равна $W_0 = W_1 + W_2$. При независимом движении вероятность возникновения корреляционной конфигурации равна произведению вероятностей

$$W_{\text{корр}} = W_1 W_2 = \frac{r_{12}^2}{r_1 r_2}. \quad (9)$$

В атомной сфере имеются два независимых взаимодействия двух электронов, по радиусу и в плоскости, перпендикулярной радиусу (рисунок 1). Совместим радиальное движение с осью z , тогда в ортогональной плоскости $ab' ba'$ движение двух электронов происходит по множеству хорд равной длины $ab, a'b'$ и т.д. Нам нужно знать среднюю длину хорды $\overline{ab}$ при перемещении плоскости вдоль оси z от $z = 0$ до $z = r$.

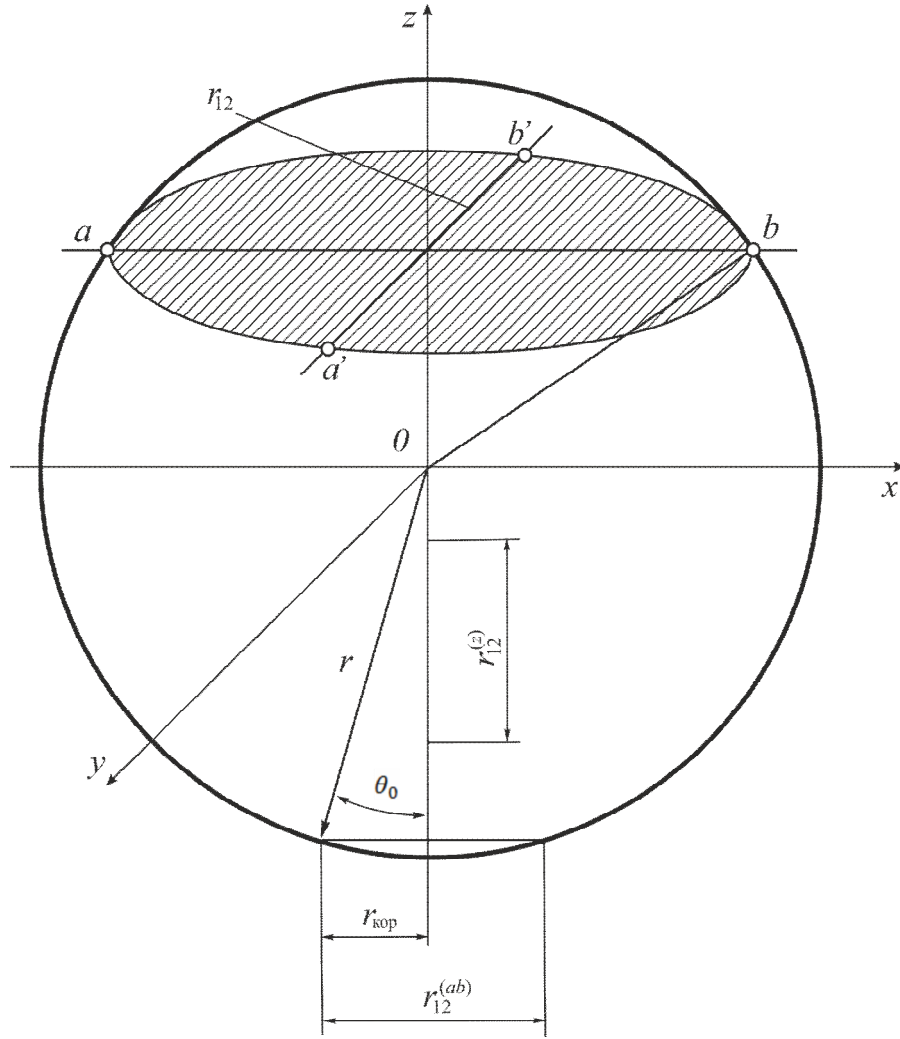


Рисунок 1 – Взаимодействие электронов в пространстве геминалей

Из геометрических построений следует, что $ab = 2r \cdot \sin\theta$, где θ – зенитный угол для ортогональной плоскости. Среднее значение хорды равно $\overline{ab} = 2r \cdot \overline{\sin\theta}$. Угол θ изменяется от θ_0 до $\pi/2$.

Предельное минимальное значение угла $\theta = \theta_0$ обусловлено тем, что хорда ab не может быть меньше r_{12} , т.е. $ab \geq r_{12}$, и $\sin\theta_0 = r_{\text{кор}}/r$, где $r_{\text{кор}} = r_{12}/2$ – радиус корреляционной дырки.

Следовательно,

$$\begin{aligned} \overline{\sin\theta} &= \frac{1}{\frac{\pi}{2} - \theta_0} \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta = \frac{1}{\frac{\pi}{2} - \theta_0} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta - \int_0^{\theta_0} \sin\theta d\theta \right) = \\ &= \frac{2}{\pi} - \frac{\cos\theta_0 - 1}{\frac{\pi}{2} - \theta_0} = \frac{2}{\pi} + \frac{1 - \cos\theta_0}{\frac{\pi}{2} - \theta_0} \end{aligned} \quad (10)$$

В рассматриваемой задаче $r_{\text{кор}} \ll r$; $\sin\theta \approx \theta = r_{\text{кор}}/r$, следовательно

$$\overline{\sin\theta} = \frac{2}{\pi} + \frac{1 - \cos(r_{\text{кор}}/r)}{\frac{\pi}{2} - r_{\text{кор}}/r}. \quad (11)$$

Рассмотрим предельный случай, когда угол $\theta_0 \rightarrow 0$, т.е. корреляционная дырка может находиться в любой точке атомной сферы. Такая ситуация наблюдается в двухэлектронных ионах с большим зарядом ядра, когда $r_{\text{кор}} \rightarrow 0$, $\cos(r_{\text{кор}}/r) = 1$, следовательно:

$$\overline{\sin\theta} = \frac{1}{\pi/2} = \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta = \frac{2}{\pi}.$$

Тогда вероятность корреляции в плоскости коллинеарной yOx равна

$$W_2 = \frac{r_{12}}{ab} = \frac{2r_{\text{кор}}}{2r \cdot 2/\pi} = \frac{\pi r_{\text{кор}}}{2r}. \quad (12)$$

Учитывая, что вероятность радиальной корреляции равна:

$W_1 = \frac{r_{12}}{2r} = \frac{r_{\text{кор}}}{r}$, для общей корреляционной конфигурации имеем

$$W_K = W_1 W_2 = \frac{r_{\text{кор}}}{r} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_{\text{кор}}}{r} = \frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{2r^2}. \quad (13)$$

Выражение для энергии двух электронов ($N = 2$) в поле ядра с зарядом Z имеет вид [1]:

$$E = -\frac{1,5(Z-\sigma)}{r} \cdot 2 + \frac{1,125n^2}{r^2} \cdot 2 = -\frac{3Z}{r} + \frac{3\sigma}{r} + \frac{2,25n^2}{r^2} \quad (14)$$

где Z – заряд ядра; σ – константа экранирования; n – главное квантовое число.

Электростатическое взаимодействие электронов между собой передаются членом

$$E_{\text{пот}} = \frac{3\sigma}{r}$$

Для корреляционной дырки получаем выигрыш в потенциальной энергии

$$E_{\text{пот}} = -\left(\frac{3\sigma}{r_{\text{кор}}} - \frac{1}{r_{12}}\right) W_K = -\frac{1,5\pi(\sigma - 0,166)}{r^2} r_{\text{кор}}. \quad (15)$$

Корреляционная дырка уменьшает объем атомной сферы (V_0) на величину $V_k = 4/3\pi r_{\text{кор}}^3$.

Преобразуем кинетический член с учетом, что $r^2 = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} V_0^{2/3}$, где V_0 – объем атомной сферы.

Тогда получаем при $n = 1$

$$E_{\text{кин}} = \frac{2,25}{r^2} = \frac{2,25\left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{2}{3}}}{V_0^{\frac{2}{3}}}.$$

Корреляционная дырка объемом V_k , уменьшает объем атомной сферы, кинетическая энергия увеличивается и будет равна

$$E_K = \frac{2,25 \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{2}{3}}}{(V_0 - V_k)^{\frac{2}{3}}} = \frac{2,25 \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{2}{3}}}{V_0^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{V_k}{V_0}\right)^{\frac{2}{3}}} =$$

$$= \frac{2,25}{r^2 (1 - W_K)^{2/3}} \approx \frac{2,25}{r^2 (1 - \pi r_{\text{кор}}^2 / (2r^2))^{2/3}}. \quad (16)$$

Увеличение кинетической энергии за счет корреляции электронов составит

$$\Delta E_{\text{кин}} = \frac{2,25}{r^2 (1 - \pi r_{\text{кор}}^2 / (2r^2))^{2/3}} - \frac{2,25}{r^2} \approx \frac{2,25}{r^2} \frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{3r^2} = \frac{2,356 r_{\text{кор}}^2}{r^4}$$

Здесь учтено, что

$$\frac{1}{(1 - \pi r_{\text{кор}}^2 / (2r^2))^{2/3}} - 1 = 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_{\text{кор}}^2}{r^2} \cdot \frac{2}{3} - 1 = \frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{3r^2}. \quad (17)$$

В нашей задаче всегда $r_{\text{кор}}^2 / (2r^2) \ll 1$ и преобразование (17) справедливо.

Полная корреляционная поправка будет равна

$$\Delta E_{\text{корр}} = -\Delta E_{\text{пот}} + \Delta E_K = -1,5\pi(\sigma - 0,166) \frac{r_{\text{кор}}}{r^2} + \frac{2,356n^2}{r^4} r_{\text{кор}}^2. \quad (18)$$

После дифференцирования (18) по $r_{\text{кор}}$, находим значения $r_{\text{кор}}$ и W_K , которые дают максимальную величину $\Delta E_{\text{корр}}$, из уравнения

$$\frac{d\Delta E_{\text{корр}}}{dr_{\text{кор}}} = -\frac{1,5\pi(\sigma - 0,166)n^2}{r^2} + \frac{4,712n^2}{r^4} r_{\text{кор}} = 0.$$

Для искомых величин получаем

$$r_{\text{кор}} = (\sigma - 0,166)r^2; \quad (19)$$

$$W_K = \frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{2r^2} = \frac{\pi}{2} (\sigma - 0,166)^2 r^2; \quad (20)$$

$$\Delta E_{\text{корр}} = -1,5\pi(\sigma - 0,166)^2 + 2,356(\sigma - 0,166)^2 =$$

$$= -2,356(\sigma - 0,166)^2. \quad (21)$$

Константа экранирования σ задается выражением [1]

$$\sigma = (0,4 N - 0,3054 N^{\frac{1}{3}}) \cdot \frac{2N-1}{2N} \quad (22)$$

Для $1s^2$ -гемииали $N=2$, $\sigma = 0,3114$ и расчет по (19), (20), (21) дает следующие значения:

$$r_{\text{кор}} = (\sigma - 0,166)r^2 = 0,1448r^2, \quad W_K = 3,25 \cdot 10^{-2} r^2,$$

$$\Delta E_{\text{корр}} = -0,0492 \text{ а.е.} \quad (23)$$

Структура выражения (21) показывает, что при определении $\Delta E_{\text{корр}}$, теорема Вириала выполняется точно:

$$\Delta E_{\text{корр}} = -\frac{\Delta E_{\text{пот}}}{2} = -\Delta E_{\text{кин}}, \quad (24)$$

что говорит о корректности предположений, положенных в основу вывода формулы (21).

Теорема Вириала в приближении Вигнера (1) и Гелл-Манна, Бракнера (4) не выполняется.

Следует отметить практически точное совпадение величин $\Delta E_{\text{корр}}$ по (21) и по (1), (4), если в последних формулах положить $r_s = 1$.

Выводы: Корреляционная поправка первого порядка ($\Delta E_{\text{корр}} = 0,0492$ а.е.), рассчитанная в приближении размазанного положительного заряда по атомной сфере с использованием модели постоянной электронной плотности, практически точно совпадает с корреляционными поправками по Вигнеру ($\Delta E_{\text{корр}}^{\text{В}} = 0,049$ а.е.), по Гелл-Манна, Бракнеру ($\Delta E_{\text{корр}}^{\text{ГБ}} = 0,048$ а.е.) при $r_s = 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Куценко А.И. К расчету энергии атомов и их систем в приближении постоянной электронной плотности / Изв. вузов. Черная металлургия, 2002, № 10. С. 44–46.
2. Селянин И.В., 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. Отделение металлургии. Выпуск 24. Москва-Новокузнецк. 2009. С. 160–163.
3. Селянин И.Ф. Определение полной энергии атома в приближении Хартри-Фока по рассчитанному значению r^{-1} // Журнал физической химии. 1982. №11. С. 2846–2848.
4. Реймс С. Теория многоэлектронных систем. М.: Мир, 1976. – 333 с.
5. Гомбаш П. Проблема многих частиц в квантовой механике. М.: ИЛ, 1953. – 276 с.
6. Цюлик Л. Квантовая химия. Т. 1. М.: Мир, 1976. – 512 с.
7. Зейтц Ф. Современная теория твердого тела. М.-Л.: ЛГТТЛ, 1949. – 736 с.
8. Хейне В., Коэн М., Уэйр Д. Теория псевдопотенциала. М.: Мир, 1973. – 558 с.
9. Feynman R. P., Forces in molecules, Phys. Rev., 56, 340 (1939).
10. Фок В.А. Начала квантовой механики. М.: Наука, 1976. – 376 с.

В.Б. Деев¹, О.Г. Приходько², А.И. Куценко², И.Ф. Селянин²¹ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСиС», г. Москва²ФГБОУ ВО «СибГИУ», г. НовокузнецкРАСЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ПОПРАВКИ В ДВИЖЕНИИ
ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО
ЗАРЯДА ЯДРА

В работе выведены поправки к выражению энергии корреляции двух электронов в поле размазанного положительного заряда. Расчет корреляционной поправки первого порядка показывает, что она учитывает 90...95 % общей энергии корреляции.

The corrections to the expression for the correlation energy of two electrons in the field of the smeared positive charge are derived. Calculation of the correlation correction of the first order shows that it accounts for 90 ... 95 % of the total correlation energy.

В работе [1] получено выражение для корреляционной поправки в первом приближении

$$\Delta E_{\text{корр}} = 1,5\pi(\sigma - 0,166)^2 + 2,356(\sigma - 0,166)^2 = -2,356(\sigma - 0,166)^2 \quad (1)$$

Формула (1) получена в предположении, что два электрона геминили коррелируют свое движение на размазанном поле положительного компенсирующего заряда. В действительности электроны находятся в поле точечного ядра с зарядом Z (рисунок 1). Когда электроны находятся друг над другом в т. 1 и 2 их потенциальная энергия будет равна

$$\Delta E'_{\text{пот}} = -1,5 \left(\frac{Z^*}{r - r_{\text{кор}}} + \frac{Z^*}{r + r_{\text{кор}}} \right)^2 = - \frac{3Z^*}{r(1 - r_{\text{кор}}^2/r^2)} \quad (2)$$

где Z^* – эффективный заряд ядра.

Выигрыш в потенциальной энергии от радиальной корреляции составит

$$\begin{aligned} \Delta E'_{\text{пот}} &= \frac{3Z^*}{1 - \frac{r_{\text{кор}}^2}{r^2}} - \frac{3Z^*}{r} = - \frac{3Z^*}{r} \left(\frac{r_{\text{кор}}^2}{r^2 - r_{\text{кор}}^2} \right) = \\ &= - \frac{3 \cdot 1,5}{r^2} \cdot \frac{r_{\text{кор}}^2}{r^2} \left(\frac{r^2}{r^2 - r_{\text{кор}}^2} \right) = -A \frac{4,5 r_{\text{кор}}^2}{r^4}, \end{aligned} \quad (3)$$

где множитель $A = \frac{r^2}{r^2 - r_{\text{кор}}^2}$ и $r = 1,5 / Z^*$, $Z^* = 1,5 / r$. (4)

Но взаимное расположение электронов относительно ядра на поверхности корреляционной дырки изменяется случайным образом. При их нахождении в т. 3 и 4 радиальной корреляции нет, $\Delta F'_{\text{пот}} = 0$ и электроны в этом положении коррелируют свое движение также, как и в компенсирующем размазанном поле положительного заряда. Если электроны находятся в промежуточном положении в т. 5 и 6, то их корреляция будет содержать радиальную (вдоль оси OX) и широтную (вдоль оси OY и OZ) составляющую.

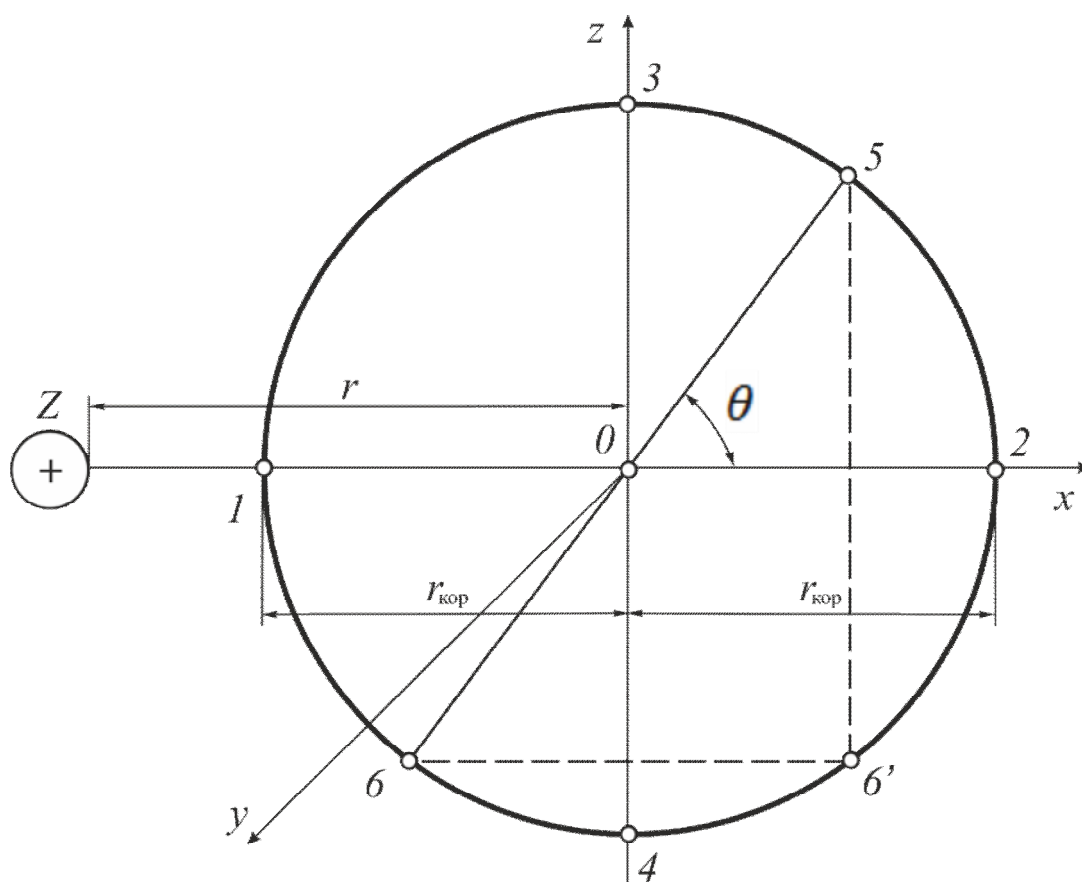


Рисунок 1 – Движение электрона в поле точечного заряда

Перенесем т. 6 в симметричную точку 6' (рисунок 1).

Взаимодействие электронов по хорде 56' будет аналогично взаимодействию электронов по равновеликим хордам в поле размазанного положительного заряда [1]. Так как движение электронов независимое, то полная вероятность потенциальной корреляции, связанной с точечным положением положительно заряженного ядра равна произведению рассмотренных корреляций. Движение электрона по трем координатным осям равновероятно. Поэтому радиальная корреляция составляет 1/3 от общей корреляционной конфигурации

$$E'_{\text{пот}} = -A \frac{4,5r_{\text{кор}}^2}{r^4} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{2r^2} = -A \frac{1,5\pi}{2} \cdot \frac{r_{\text{кор}}^4}{2r^6} \quad (5)$$

где $\frac{\pi r_{\text{кор}}^2}{2r^2} = W_{\text{к}}$ – вероятность корреляции в первом приближении [1, формула (13)].

Так как в системе частиц, взаимодействующих только по закону Кулона, теорема Вириала должна выполняться точно, преобразуем последнее выражение к необходимому виду

$$\begin{aligned} E'_{\text{пот}} &= -\frac{1,54\pi(\sigma-0,166)(\sigma-0,166)^2 r^2}{2r^2} \cdot r_{\text{кор}} = \\ &= -\frac{1,54\pi(\sigma-0,166) \cdot 0,021r^2}{2r^2} \cdot r_{\text{кор}} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь учтено, что $r_{\text{кор}} = (\sigma - 0,166)r^2$ – радиус корреляционной дырки [1].

Полная корреляционная энергия с учетом поправки (6) составит

$$\Delta E_{\text{корр}} = \Delta E_{\text{пот}} + \Delta E'_{\text{пот}} + \Delta E_{\text{кин}}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{корр}} &= -\frac{1,5\pi(\sigma-0,166)}{r^2} \cdot r_{\text{кор}} - \frac{1,54\pi(\sigma-0,166) \cdot 0,021r^2}{2r^2} \cdot r_{\text{кор}} + \\ &+ \frac{2,256}{r^4} \cdot r_{\text{кор}}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

где $-\frac{1,5\pi(\sigma-0,166)}{r^2} \cdot r_{\text{кор}} = E'_{\text{пот}}$ – потенциальная корреляционная энергия из работы [1, формула (15)].

Радиус корреляционной дырки возрастает:

$$r_{\text{кор}} = (\sigma - 0,166) \cdot (1 + 0,0105Ar^2)r^2. \quad (8)$$

Для больших значений Z^* , $r = (1,5)^2 / (Z^*)^2 \rightarrow 0$, $E'_{\text{пот}} \rightarrow 0$ и $\Delta E_{\text{корр}}$ определяется по первому приближению [1]. В общем случае необходимо учитывать среднее значение $\overline{\sin\theta}$ по формуле [1, формула (11)]. Это приводит к уменьшению вероятности W_2 [1, формула (12)]:

$$W_2 = \frac{r_{12}}{ab} = \frac{2r_{\text{кор}}}{2r\sin\theta} = \frac{r_{12}}{ab} = \frac{\pi r_{\text{кор}}}{2r} \left[1 + \frac{1 - \cos(r_{\text{кор}}/r)}{1 - 2r_{\text{кор}}/(\pi r)} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Общая корреляционная конфигурация будет равна

$$W = W_1 W_2 = \frac{A_1 \pi r_{\text{кор}}^2}{2r^2} \quad (10)$$

где множитель

$$A_1 = \left[1 + \frac{1 - \cos(r_{\text{кор}}/r)}{1 - 2r_{\text{кор}}/(\pi r)} \right]^{-1}. \quad (11)$$

При этом $W_1 = \frac{r_{\text{кор}}}{r}$ [1] и $A_1 \leq 1$, $\theta_0 \leq \theta \leq \pi/2$ [1, вывод формулы (10)] будет входить во все члены формулы (6), он не повлияет на значение $r_{\text{кор}}$

по (8), но величина корреляционной энергии уменьшается на этот множитель:

$$\Delta E_{\text{кор}} = -2,356A_1 (\sigma - 0,166)^2 (1 + 0,0105A^2 r^2). \quad (12)$$

В таблице 1 приведены данные по расчету различных составляющих энергии атомных систем.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения энергии

Ион	E , ат. ед.					
	A (4)	A_1 (11)	$E_{\sigma} =$ $(Z-\sigma)^2$	$\Delta E_{\text{корр}}$ (12)	$E_{\sigma} + \Delta E_{\text{корр}}$	$E_{\text{экспер.}}$ [3]
H^-	1,17 1,263	0,941 0,953	0,47412	0,05140 0,05326	0,52552 0,52738	0,52754
He	1,017 1,018	0,995 0,996	2,8514	0,0511 0,0515	2,9025 2,9029	2,9037
Li^+	1,003	0,998	7,2287	0,0502	7,2789	7,2798
Be^{2+}	1,00	1,00	13,6057	0,0495	13,6553	13,6580
B^{3+}	1,00	1,00	21,9830	0,0492	22,0322	13,0380
C^{4+}	1,00	1,00	32,3682	0,0492	32,4174	32,4286

Расчет по формуле (12) проводится методом итераций. Радиус корреляционной дырки $r_{\text{кор}}$ по (8) определяется в первом приближении, для уточнения $r_{\text{кор}}$ необходимо его определить по формуле

$$r_{\text{кор}} = (\sigma - 0,166) \cdot \left(1 + r_{\text{кор}}^2 A / (2r^2) \right) r^2, \quad (13)$$

которая вытекает из общего выражения для $E'_{\text{пот}}$ (5). Для $r_{\text{кор}}$ получаем квадратное уравнение

$$r_{\text{кор}}^2 = -\frac{2}{A(\sigma - 0,166)} r_{\text{кор}} + \frac{2r^2}{A} = 0, \quad (14)$$

$$r_{\text{кор}} = -\frac{1}{A(\sigma - 0,166)} \pm \sqrt{\frac{1}{A^2(\sigma - 0,166)^2} - \frac{2r^2}{A}}.$$

Величина $A = (1 - r_{\text{кор}}^2 / r^2)^{-1}$ также зависит от $r_{\text{кор}}$. С увеличением количества итераций $r_{\text{кор}}$ и A возрастают до определенных значений, $\Delta E_{\text{корр}}$ также растет до предельных значений. Для иона H^- конечный результат $\Delta E_{\text{корр}} = 0,05326$ получен на пятом шаге, для He – на втором шаге. Для остальных ионов итерационная процедура практически не влияет на конечные результаты.

Точные расчеты по Хартри-Фоку (метод КВ – разложение по возбужденным конфигурациям с базисом по Хартри-Фоку) показывают, что атомная электронная плотность за счет корреляции электронов становится более диффузионной, электроны из внутренних областей атома частично выталкиваются на периферию [2]. Главное квантовое число n $1s^2$ -геминили

за счет корреляции эффективно растет ($n^* > 1$), особенно это наглядно демонстрирует метод КВ. Учет 37 конфигураций высших состояний электронов позволил получить для атома *He* полную энергию $E_{am} = 2,90375$ [3].

В модели постоянной электронной плотности эффект увеличения размера атома следует учесть суммированием объемов исходного атома и корреляционной дырки

$$V_0^* = V_0 + V_{\text{корр}},$$

и эффективный радиус атомной сферы будет равен

$$r^* = r_0 \left(1 + \frac{r_{\text{корр}}^3}{r_0^3} \right). \quad (15)$$

Корреляция приводит к уменьшению константы экранирования σ . Для новых значений n^* и σ^* получаем формулы

$$\left. \begin{aligned} (n^*)^2 &= \frac{(Z - \sigma)}{1,5}, \\ Z - \sigma^* &= n^* \sqrt{E_\sigma + \Delta E_{\text{корр}}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

или

$$\sigma^* = Z - n^* \sqrt{E_\sigma + \Delta E_{\text{корр}}}.$$

Последние выражения получены с использованием формул для двух-электронных ионов

$$r = \frac{1,5n^2}{Z - \sigma}, \quad E = -\frac{(Z - \sigma)}{n^2},$$

которые получены в приближении постоянной электронной плотности.

Процедура по формулам (15), (16) была проведена для иона H^- , что позволило получить практически те же результаты для его энергии, что и результаты, полученные методом КВ [3], громоздким, требующим больших затрат времени и практически непригодного из-за этого для расчета атомных систем с $N > 20$.

Физическую прозрачность предлагаемого метода расчета $\Delta E_{\text{корр}}$ можно показать, используя простые классические представления. Два свободных электрона могут сблизиться на корреляционное расстояние $r_{12} = 2r_{\text{корр}}$ за счет полного использования их кинетической энергии, т.е. в точке поворота электронов соблюдается равенство

$$\frac{1}{2r_{\text{корр}}} = 1,105 \frac{N^{5/3}}{r^2}. \quad (17)$$

Из (17) вытекает для радиуса корреляционной дырки выражение ($N = 2$):

$$r_{\text{корр}} = 0,143r^2,$$

что практически точно совпадает со значением $r_{\text{корр}} = 0,1448 r^2$ по [1, формула (23)].

Если взять коэффициент 1,125 в кинетическом члене, который вытекает из приближения ПЭП, то значение $r_{\text{кор}}$ точно совпадет с формульной величиной $r_{\text{кор}} = 0,1448r^2$ [1, формула (23)].

В работе выведены формулы для расчета энергии корреляции электронов $1s^2$ -геминиали. При переходе к высшим квантовым состояниям с $n > 1$ во все исходные выражения необходимо подставить значение радиуса атомной сферы

$$r = \frac{1,5\pi^2}{Z^*},$$

которое вытекает из приближения постоянной электронной плотности.

Выводы: модель постоянной электронной плотности для атомных систем позволяет провести расчет электронной корреляции. Результаты расчета корреляционной энергии соответствуют результатам других исследований и экспериментальным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянин И.Ф., Шакиров К.М., Деев В.Б. и др. Корреляционная поправка первого порядка в модели постоянной электронной плотности // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. № 2. С. 3–7.
2. Марч Н., Янг У., Сампатхар С. Проблема многих тел в квантовой механике. – М.: Мир, 1969. – 496 с.
3. Цюлике Л. Квантовая химия. Т. 1. М.: Мир, 1976. – 512 с.

УДК 519.237: 669.018.25

А.И. Гусев, Н.А. Козырев, Н.В. Кибко, Р.Е. Крюков,
И.В. Осетковский

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

СВОЙСТВА МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ СИСТЕМЫ Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co

В лабораторных условиях изготовлены образцы порошковых проволок системы Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co, изучено влияние введения в шихту наплавочной проволоки вольфрама и хрома. Проведены металлографические исследования наплавленного металла: оценена микроструктура, величина зерна, загрязнен-

ность оксидными неметаллическими включениями. Определена твердость и скорость истирания наплавленного валика. Проведена оценка влияния химического состава на износ и твердость наплавленного металла.

Produced samples of powder wires system Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co, the influence of introduction of batch surfacing wire of tungsten and chromium. Held metallographic weld metal: evaluated microstructure, grain, non-metallic inclusions of oxide contamination. Defined hardness and abrasion speed weld bead. The estimation of influence of chemical composition on wear and hardness of weld deposited metal.

Механизмы машин горнорудного оборудования, испытывающие абразивное и ударное изнашивание при эксплуатации, преждевременно выходят из строя и требуют восстановления. Поэтому разработка материалов повышающих износостойкость таких механизмов и деталей, а так же разработка технологий их восстановления является важной задачей. Наиболее перспективным направлением является наплавка порошковой проволокой на изнашивающиеся поверхности деталей. Для этих целей в нашей стране и за рубежом ведётся разработка, изготовление и использование специальных наплавочных порошковых проволок [1-6]. Благодаря оптимально подобранному способу легирования наплавленные покрытия обладают высокими значениями твёрдости, абразивной и ударно-абразивной износостойкости. В настоящее время в нашей стране широко используются порошковые проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo фирмы DRATEC (Германия) марки DT-SG 600 F и порошковые проволоки фирмы ESAB марок OK Tubrodur 15.52, OK Tubrodur 58 O/G M.

Данная работа продолжает начатые исследования по разработке новых составов порошковых проволок работающих в условиях абразивного износа в горнорудной промышленности [7-9], в частности изучение влияния введения в систему Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co вольфрама и хрома на степень износа и твердость наплавленного слоя.

Изготовление проволоки проводилось на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из ленты Ст3. В качестве наполнителя использовались соответствующие порошкообразные материалы порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849-86, порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ1415-93, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755-91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759-91, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130-94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721-79, в качестве углеродсодержащего компонента использовали углеродофторсодержащий порошок со следующим химическим составом компонентов, мас. %: $Al_2O_3 = 21-46,23$; F = 18-

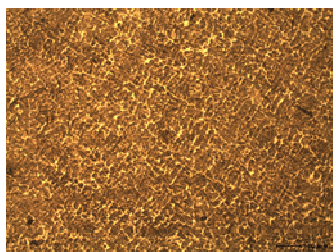
27; Na_2O = 8-15; K_2O = 0,4-6; CaO = 0,7-2,3; SiO_2 = 0,5-2,48; Fe_2O_3 = 2,1-3,27; $\text{C}_{\text{общ}}$ = 12,5-30,2; MnO = 0,07-0,9; MgO = 0,06-0,9; S = 0,09-0,19; P = 0,1-0,18.

Наплавку изготовленной проволокой производили под флюсом АН-26С, на пластины из стали марки Ст3 в 6 слоев (для исключения перемешивания наплавляемого металла с подложкой), при помощи сварочного трактора АСАВ-1250, с режимом наплавки: $I=450$ А, $U=30$ В, $V=10$ м/ч. Далее пластины разрезались на соответствующие образцы для испытаний. Химический состав исследуемых наплавленных образцов определяли по ГОСТ 10543–98 рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре XRF-1800 и атомно-эмиссионным методом на спектрометре ДФС-71. Химический состав наплавленных слоев с использованием порошковых проволок приведен в таблице 1. Твёрдость изучаемых образцов измерялась с помощью твердомера МЕТ-ДУ. Испытания на износостойкость производили на машине 2070 СМТ–1. Испытания проводились на режимах: нагрузка 30 мА, частота 20 об/мин. Изучение микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений $\times 100$ -1000 после травления в спиртовом растворе азотной кислоты. Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Размер игл мартенсита определяли по ГОСТ 8233-56 при увеличении $\times 1000$. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений осуществляли в соответствии с ГОСТ 1778-70 при увеличении $\times 100$. Структура образца №1Г9 (рисунок 1 а, б) представляет собой крупноигольчатый мартенсит (балл 7) в первичных зернах аустенита, по границам которых находятся незамкнутые тонкие прослойки, предположительно состоящие из δ -феррита. Размер игл мартенсита – 3-14 мкм. Наплавленный слой характеризуется четко выраженной дендритной структурой. Величина зерна аустенита по шкале зернистости соответствует №6 и 7. По телу и границам зерен распределены точечные дисперсные включения. Структура образца №2Г10 (рисунок 1 в, г) представляет собой мелкоигольчатый и среднеигольчатый мартенсит (балл 4, 5) в первичных зернах аустенита, по границам которых находятся незамкнутые тонкие прослойки, предположительно состоящие из δ -феррита. Размер игл мартенсита – 3-6 мкм. Наплавленный слой характеризуется четко выраженной дендритной структурой. Величина зерна аустенита по шкале зернистости №6 и 7. По телу и границам зерен распределены точечные дисперсные включения.

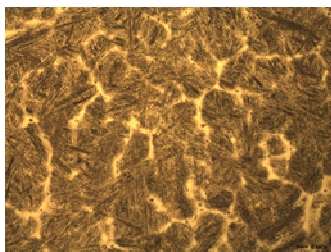
Структура образца №3Г11 (рисунок 1 д, е) представляет собой крупноигольчатый мартенсит (балл 7), формирующийся внутри четко выраженных границ первичного аустенитного зерна. По границам первичных зерен аустенита находятся незамкнутые тонкие прослойки, предположительно состоящие из δ -феррита. Размер игл мартенсита – 8-12 мкм. Наплавленный слой характеризуется четко выраженной дендритной структурой.

Таблица 1 –Химический состав, содержание водорода, износ и твердость наплавленных слоев

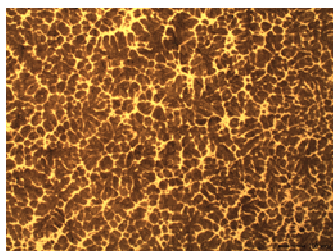
Номер образца	Массовая доля элементов %														Твердость образцов, HRC	Износ об- разцов г/об.
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Co	W	Al	Cu	Ti	S	P		
1 Г9	0,19	0,77	0,61	4,17	0,34	0,38	0,02	0,05	0,002	0,01	0,07	0,02	0,054	0,024	44,5	0,000071
2 Г10	0,19	0,63	0,65	4,06	0,3	0,38	0,03	0,06	0,001	0,01	0,08	0,03	0,056	0,019	43	0,000039
3 Г11	0,2	0,59	0,61	4,12	0,3	0,38	0,02	0,12	0,001	0,02	0,06	0,04	0,049	0,019	46	0,000044
4 Г12	0,2	0,64	0,6	4,03	0,3	0,39	0,03	0,2	0,002	0,01	0,08	0,03	0,058	0,021	30	0,000073
5 Г13	0,2	0,59	0,56	0,01	0,3	0,33	0,01	0,05	7,74	0,01	0,1	0,02	0,072	0,017	22	0,000206
6 Г14	0,2	0,55	0,49	0,01	0,26	0,34	0,01	0,07	7,42	0,02	0,09	0,02	0,048	0,014	25	0,000048
7 Г15	0,2	0,58	0,52	0,01	0,28	0,34	0,01	0,07	7,55	0,05	0,09	0,03	0,038	0,014	21	0,000039
8 Г16	0,21	0,55	0,52	0,01	0,27	0,35	0,02	0,06	7,65	0,05	0,08	0,02	0,036	0,017	25	0,000036



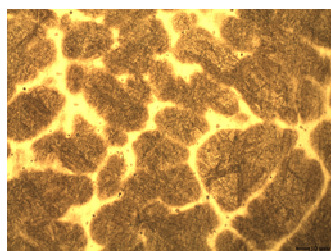
а



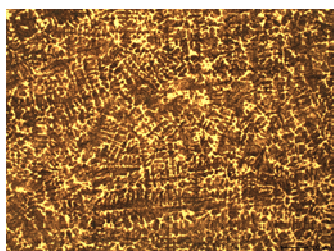
б



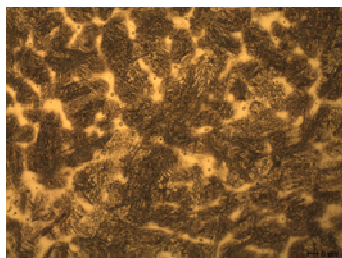
в



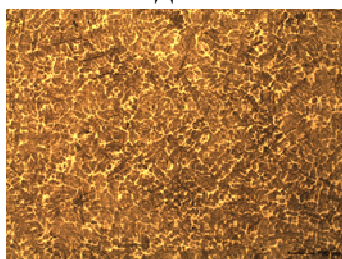
г



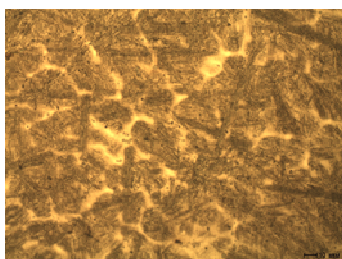
д



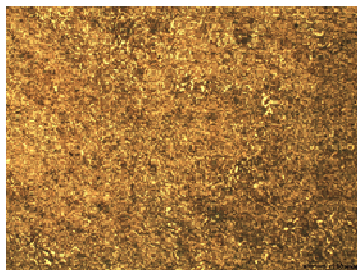
е



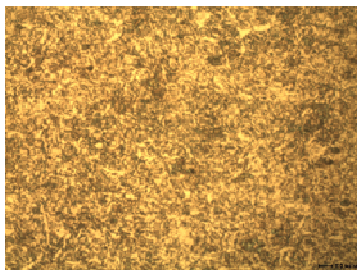
ж



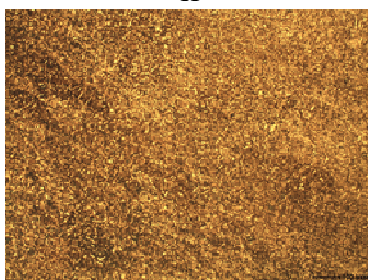
з



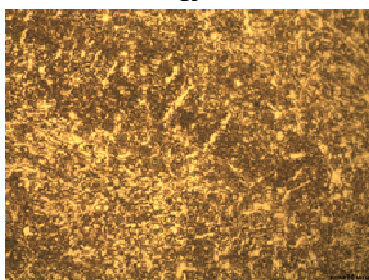
и



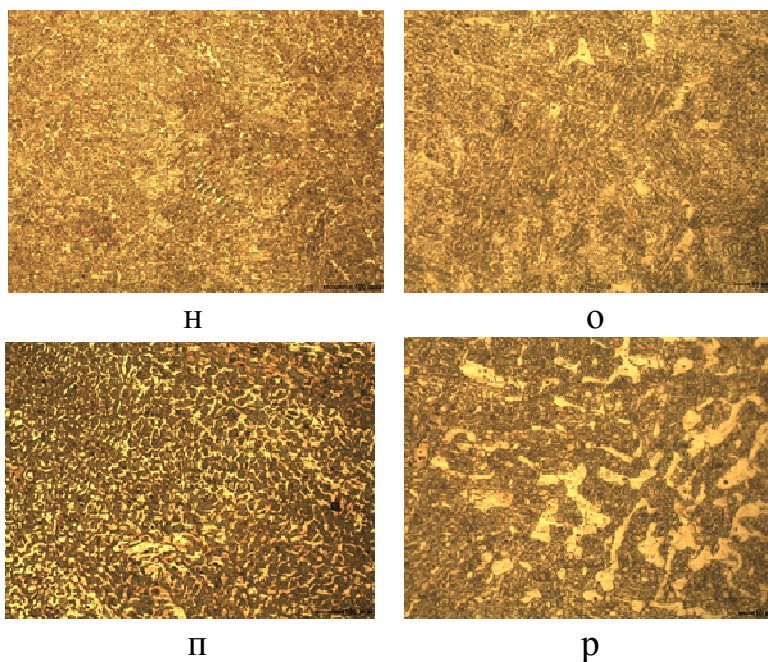
к



л



м



а, б - №1Г9; в, г - №2Г10; д, е - №3Г11; ж, з - №4Г12; и, к - №5Г13;
л, м - 6Г14; н, о - 7Г15; п, р - 8Г16

Рисунок 1 – Микроструктура исследуемых образцов, (а, в, д, ж, и, л, н, п $\times 100$), (б, г, е, з, к, м, о, р $\times 500$)

рой. Величина зерна аустенита по шкале зернистости №6 и 7. По границам и телу зерен распределены точечные дисперсные включения.

Структура образца №4Г12 (рисунок 1 ж, з) представляет собой крупно-игольчатый мартенсит (балл 7) в первичных зернах аустенита, по границам которых находятся незамкнутые тонкие прослойки, предположительно состоящие из δ -феррита. Размер игл мартенсита – 3-11 мкм. Наплавленный слой характеризуется четко выраженной дендритной структурой. Величина зерна аустенита по шкале зернистости №7, 6. По границам и телу зерен распределены точечные дисперсные включения.

В структуре образца №5Г13 (рисунок 1 и, к) наблюдается феррит и перлит. Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости №5, 6. По телу зерен и по ферриту распределены точечные включения.

Образец №6Г14 (рисунок 1 л, м) имеет феррито-перлитную структуру. Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости № 6.

По телу зерен и по ферриту распределены точечные включения.

В структуре образца №7Г15 (рисунок 1 н, о) наблюдается феррит, перлит. Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости № 5.

По телу зерен и по ферриту распределены точечные включения.

Образец №8Г16 (рисунок 1 п, р) имеет феррито-перлитную структуру. Величина бывшего зерна аустенита по шкале зернистости № 6. По телу зерен и по ферриту распределены точечные включения. Влияние концентрации хрома и вольфрама на твердость приведены на рисунках 2 и 3. Несмотря на введение в состав образцов 5Г13-8Г16 вольфрама, износостойкость образцов предопределена структурой наплавленного металла. Износостойкость образ-

цов 1Г9-4Г12 выше в связи с тем, что они имеют мартенситную структуру, а образцы 5Г13-8Г16 феррито-перлитную.

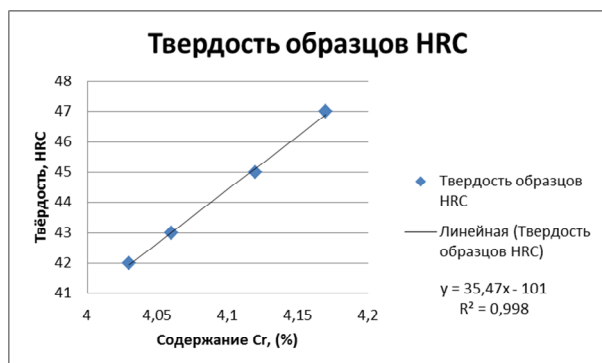


Рисунок 2 – Твёрдость образцов №1Г9-4Г12

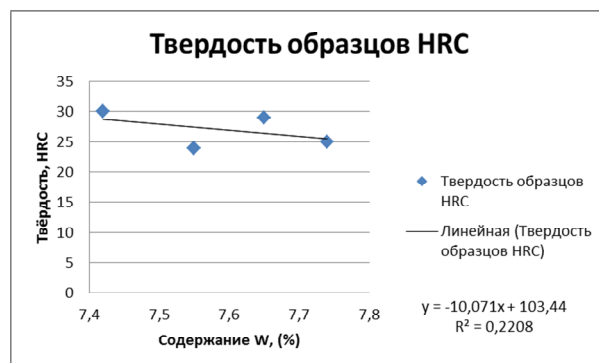


Рисунок 3 – Твёрдость образцов №5Г13-8Г16

В результате оценки загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями установлено присутствие оксидных неметаллических включений, в частности силикатов недеформирующихся и оксидов точечных (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристики неметаллических включений и структуры

Номер образца	Загрязненность неметаллическими включениями, балл		Величина зерна аустенита, балл	Размер игл мартенсита, мкм
	силикаты недеформирующиеся (хрупкие)	оксиды точечные		
1Г9	1б, 2а	1а	7	3-14
2Г10	2б, 1б, 2а, 3а	1а, 2а	6, 7	3-6
3Г11	1б, 2б, 2а, 3а	1 а, 2а	6, 7	8-12
4Г12	1б, 2б, 3а	1 а, 2а	7, 6	3-11
5Г13	1б, 2б, 2, 5а	1а	5, 6	-
6Г14	1б, 2б, 4б	1а	6	-
7Г15	1б, 2б, 3б	1а	5	-
8Г16	2б, 4б	1а, 2а	6	-

Выводы:

1. Введение в систему Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co хрома приводит к формированию в наплавленном слое мартенситной структуры, с тонкими прослойками δ-феррита, что обеспечивает требуемые для эксплуатации деталей, работающих в условиях абразивного износа, твердость и износостойкость.

2. Введение в систему Fe-C-Si-Mn-Mo-Ni-V-Co вольфрама и практически отсутствие в ней хрома приводит к образованию в наплавленном слое

феррито-перлитной с частицами карбидов вольфрама, при этом не обеспечивается требуемый уровень твердости и износостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirchgaßner M, Badisch E, Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. / *Wear Journal*. 2008. – Vol.265. –P. 772–779.
2. Azzoni M. Directions and developments in the types of hard phases to be applied in abrase deposits against abrasion. \ *Weld International*. 2009. – Vol.23. – P. 706–716.
3. Klimpel A. Abrasion resistance of GMA metal cored wires surfaced deposits. / Klimpel A, Dobrzanski LA, Janicki D, Lisiecki A. // *Materials Processing Technology*. 2005. – Vol.164 – 165. – P. 1056–1061.
4. Wang Q, Li X. Effects of Nb, V, and W on microstructure and abrasion resistance of Fe–Cr–C hardfacing alloys. / *Welding*. 2010. - Vol 89. – P. 133–139.
5. Metlitskii V.A. [Flux-cored](#) wires for arc welding [and](#) surfacing [of cast iron](#) / *Welding International*. 2008. – Vol 22. – P. 796-800.
6. [R. Kejžar & J. Grum. Hardfacing of Wear-Resistant Deposits by MAG Welding with a Flux-Cored Wire Having Graphite in Its Filling](#) \ *Welding International*. 2005. – Vol 20. – P. 961-976.
7. Гусев А.И. Изучение свойств металла наплавленного порошковой проволокой системы С-Mn-Si-Cr-V-Mo-Co / Гусев А.И., Осетковский И.В. // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи в 2-х томах. Том 1. Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – С. 91-94.
8. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF/ A I Gusev, N V Kibko, N A Kozyrev, M V Popova, I V Osetkovsky// *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 150 (2016) 012033- pages 1-9
9. Структура и свойства наплавленных слоев, полученных с применением порошковых проволок 40ГМФР и 40ХЗГ2МФ / Гусев А. И., Кибко Н.В., Попова М.В., Козырев Н.А., Осетковский И.В. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сб. научн. тр. - Вып.36.- Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016 – С. 174-181.

И.В. Осетковский, Н.А. Козырев, А.И. Гусев, Р.Е. Крюков,
М.В. Попова

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

СВОЙСТВА МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ СИСТЕМ FE-C-SI-MN-NI-MO-W -V И FE-C-SI-MN- CR-NI-MO-V

В статье представлен сравнительный анализ структур наплавленного металла порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V и Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V. Предполагается использование данных проволок при восстановлении деталей и узлов механизмов и машин, работающих в условиях ударно абразивного и абразивного изнашивания.

Изготовление порошковой проволоки, и наплавка проводились в лабораторных условиях. Определен химический состав наплавленного металла. Образцы подвергались испытаниям на износостойкость и твердость.

В ходе металлографического анализа наплавленных поверхностей проведены металлографические исследования: определены характер и уровень загрязненности оксидными неметаллическими включениями, строение и тип микроструктуры, величина зерна наплавленных образцов. Произведена оценка влияния составляющих компонентов химического состава наплавленного металла на твердость и износ.

The article presents a comparative analysis of the weld metal structures with powder wires systems Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V and Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V. It is assumed that the data wires at restoration of components and units of machinery and equipment, working in conditions of shock abrasive and abrasive wear. Flux cored wire fabrication and welding were performed under laboratory conditions. Determined the chemical composition of the deposited metal. Samples were subjected to tests for durability and hardness. In the course of the metallographic analysis of weld surfaces held metallographic studies: the nature and level of contamination of non-metallic inclusions, oxide structure and microstructure type, grain overlaid samples. Assess influence of constituents of the chemical composition of weld metal on hardness and wear.

Разработка новых материалов и использование инновационных технологий восстановления, значительно повышающих износостойкость изделий,

является актуальной задачей машиностроения. Для этих целей ведётся разработка и изготовление специальных методов и материалов для наплавки [1-16]. Наибольшее распространение для наплавки абразивно - изнашивающихся изделий получили наплавочные проволоки низкоуглеродисты низколегированные типа, аустенитные высокомарганцевые типа С, а также быстрорежущие стали типа F по классификации МИС [17]. Широкое применение нашли наплавочные карбидные сплавы типа Р, представляющие собой композиционные материалы, и состоящие из армирующих частиц карбидов вольфрама и матрицы. Они отличаются наивысшей износостойкостью в условиях абразивного износа [17]. Характерной особенностью процесса износа таких сплавов является поэтапный износ отдельных элементов композиции. При этом наблюдается так называемый теневой эффект, когда более износостойкие армирующие частицы берут на себя основную нагрузку от разрушающих сил, предохраняя матрицу сплава от износа. Таким образом, при равной износостойкости матрицы работоспособность композиционных сплавов определяется их химическим составом, концентрацией, износостойкостью и прочностью армирующих частиц [1]. Однако износостойкость матрицы может быть определяющим показателем при работе в условиях абразивного износа.

В данной работе проведены результаты исследования износостойкости и твердости наплавленного металла порошковыми проволоками систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V и Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V.

Изготовление проволоки проводилось на лабораторной машине. Диаметр изготовленной проволоки 5 мм, оболочка выполнена из ленты Ст3. В качестве наполнителя использовались соответствующие порошкообразные материалы порошок железа марки ПЖВ1 по ГОСТ 9849-86, порошок ферросилиция марки ФС 75 по ГОСТ 1415-93, порошок высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А по ГОСТ 4757-91, порошок углеродистого ферромарганца ФМн 78(А) по ГОСТ 4755-91, порошок никеля ПНК-1Л5 по ГОСТ 9722-97, порошок ферромolibдена марки ФМо60 по ГОСТ 4759-91, порошок вольфрама марки ПВП-1, порошок феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130-94, порошок кобальта ПК-1У по ГОСТ 9721-79. В качестве углеродсодержащего компонента использовали ранее опробованный [18-21] углерод-фторсодержащий материал (УФСМ) следующего химического состава, мас. %: $Al_2O_3 = 21-46,23$; $F = 18-27$; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4-6,0$; $CaO = 0,7-2,3$; $Si_2O = 0,5-2,48$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,27$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; $S = 0,09-0,19$; $P = 0,1-0,18$.

Наплавку под флюсом АН-26С производили на образцах толщиной 16 мм из стали марки 09Г2С в 6 слоев. Процесс проводили проволокой Св-08ГА с использованием сварочного трактора АСАВ-1250 при режимах: $I_{св} = 450A$; $U_d = 30 B$; $V_{св} = 10 м/ч$.

Измерение твердости проводилось с использованием твердомера МЕТ-УД. Осуществляли 5 измерений твердости на поверхности каждого образца. В таблице 1 представлены усредненные по пяти измерениям значения твердости наплавленного металла. Испытания на износостойкость производили на

машине 2070 СМТ – 1. Испытание на износ проводили по схеме вращающийся диск – образец. Диск наплавлен вольфрамовыми сплавами. Испытание проводили в течение 6 часов с частотой вращения -20 об/мин. До и после испытаний на износ образцы взвешивали и определяли разницу между начальной и конечной массой, а также, фиксировали количество оборотов диска. За величину износа принята потеря массы образца за один оборот диска.

Металлографический анализ образцов проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений $\times 100 - 1000$. В качестве реактива для травления поверхности образцов использовали спиртовой раствор азотной кислоты. Исследование продольных образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений осуществляли в соответствии с ГОСТ 1778-70 при увеличении $\times 100$. Величину бывшего зерна аустенита определяли по ГОСТ 5639-82 при увеличении $\times 100$. Размер игл мартенсита определяли по ГОСТ 8233-56 при увеличении $\times 1000$.

Результаты испытаний на износ, измерения твердости и химический анализ образцов приведены в таблице 1.

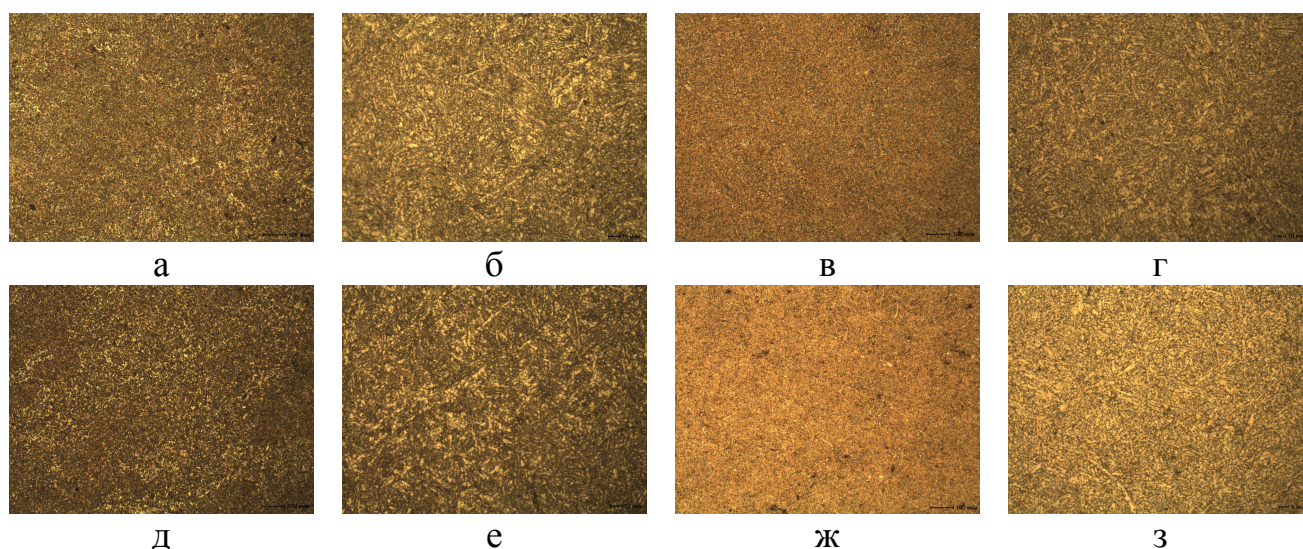
Таблица 1 – Химический состав, износ и твердость наплавленного металла

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

Металлографический анализ металла наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V показал, что при содержании углерода 0,17-0,23 % и хрома в пределах 1,30 – 1,50 % (образцы № 1–4) в наплавленном слое образуется равномерная структура с мелкоигльчатый мартенситом (балл № 3) в бывших зернах аустенита, остаточным аустенитом, присутствующим в небольшом количестве в виде отдельных островков, и δ - ферритом в виде тонких прослоек по границам первичных зерен аустенита (рисунок 1). Размер игл мартенсита в структуре образцов находится в диапазоне 2-5 мкм (таблица 2). Величина бывшего зерна аустенита соответствует № 6.

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

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



а, б – образец №1; в, г – образец №2; д, е – образец №3; ж, з – образец №4

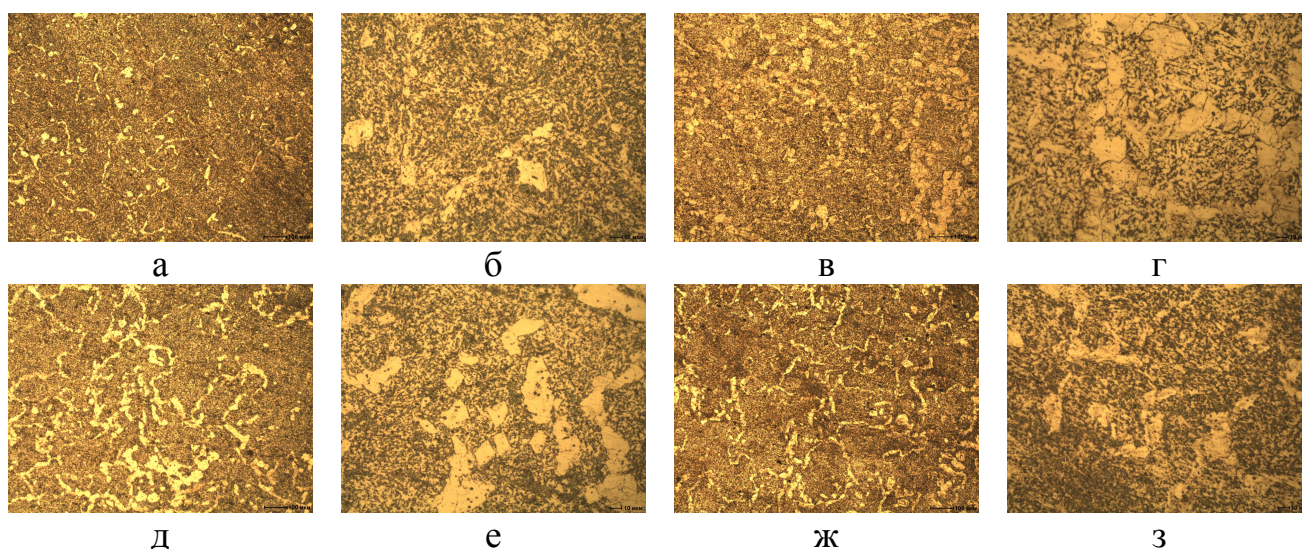
Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного металла порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V, (а, в, д, ж $\times 100$), (б, г, е, з $\times 500$)

Таблица 2 – Характеристики неметаллических включений и структуры исследованных образцов

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

Металлографический анализ металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V показал, что введение вольфрама в количестве 2,43–3,38 % при уменьшении содержания углерода и хрома до 0,12–0,15 % и 0,07–0,09 % соответственно приводит к образованию в наплавленном слое феррито-перлитной структуры (рисунок 2).

Образцы № 4–8 имеют феррито-перлитную структуру с размером бывшего зерна аустенита №4, №5. Кроме того, в структуре в большом количестве присутствует остаточный аустенит, располагающийся по границам перлитных колоний. Отмечено также наличие мелкодисперсных темных включений по границам колоний перлита, что характерно для карбидов вольфрама. Указанные структурные изменения обуславливают снижение твердости и износостойкости наплавленного металла (таблица 2).



а, б – образец №5; в, г – образец №6; д, е – образец №7; ж, з – образец №8

Рисунок 2 – Микроструктура наплавленного металла порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V, (а, в, д, ж $\times 100$), (б, г, е, з $\times 500$)

Таким образом, установлено, что, несмотря на наличие карбидов вольфрама в феррито-перлитной структуре образцов, наплавленных низкоуглеродистой порошковой проволокой системы Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V, предпочтительней для наплавки деталей и механизмов оборудования, работающего при абразивном изнашивании, является порошковая проволока системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V. По-видимому, феррито-перлитная матрица недостаточно хорошо противодействует абразивному износу по причине меньшей твердости, а образовавшиеся карбиды вольфрама не могут в полной мере обеспечить износостойкость, поскольку им необходима более твердая матрица для прочного сцепления. В связи с этим следует вывод, что феррито-перлитная структура не является приемлемой для внедрения в нее карбидов вольфрама с целью увеличения износостойкости.

Выводы:

Установлено, что использование для наплавки низкоуглеродистых экономнолегированных порошковых проволок систем Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V и Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V с применением в качестве углеродсодержащего компонента УФСМ обеспечивает формирование наплавленных слоев с малой степенью загрязненности неметаллическими включениями.

Использование для наплавки порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-V приводит к формированию в наплавленном слое равномерной структуры мелкоигльчатого мартенсита с тонкими прослойками δ -феррита и остаточного аустенита, что обеспечивает твердость и износостойкость, достаточные для эксплуатации деталей горного оборудования.

Использование для наплавки порошковой проволоки системы Fe-C-Si-Mn-Ni-Mo-W-V приводит к образованию наплавленных слоев, имеющих более низкое содержание углерода и хрома, но повышенное содержание вольфрама, вследствие чего образуется не мартенситная, а феррито-перлитная структура с частицами карбидов вольфрама, не обеспечивающая требуемого уровня твердости и износостойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.И. Белый. Износостойкость и прочность карбидов вольфрама WC – W₂C, полученных различными способами / Автоматическая сварка, -2010. – №12. – С. 20-23.
2. Y. V. Poletaev & A. S. Zubchenko. Structure and properties of welded joints in chromium-manganese steels / Welding International. 1988. – Vol. 2. – P. 452-455.
3. K.C. Barker & A. Ball. Synergistic abrasive—corrosive wear of chromium containing steels / British Corrosion Journal. 1989. – Vol. 24. – P. 222-228.
4. I. El-Mahallawi, R. Abdel-karim & A. Naguib. Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel / Materials Science and Technology. 2001. – Vol. 17. – P. 1385-1390.
5. S. Mizoguchi. Multilayer Submerged Arc Surfacing With High Chromium Iron Alloy / S. Mizoguchi, T. Tanigaki, M. Tokura, H. Koike & H. Nishimura // Surfaced Engineering. 1987. – Vol. 3. – P. 313-320.
6. A. Molinari, G. Straffelini & P. Campestri. Influence of microstructure on impact and wear behaviour of sintered Cr and Mo steel / Powder metallurgy. 1999. – Vol. 42. – P. 235-241.
7. Z. Rao. Wear behaviour of carbon implanted hard chromium coatings / Z. Rao, B. H. O'Connor, D. K. Sood & J. S. Williams // Surface Engineering. 1997. – Vol. 13. – P. 61-65.
8. D. S. Liu, R. P. Liu & Y. H. Wei. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy / Material Science and Technology. 2014. – Vol. 30. – P. 316-322.

9. New materials for welding and surfacing/ N A Kozyrev, G V Galevsky, R E Kryukov, D A Titov, V M Shurupov//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012031- pages 1-8 | doi:10.1088/1757-899X/150/1/012031.

10. A study on the properties of the deposited metal by flux cored wires 40GMFR and 40H3G2MF/ A I Gusev, N V Kibko, N A Kozyrev, M V Popova, I V Osetkovsky// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 150 (2016) 012033- pages 1-9| doi:10.1088/1757-899X/150/1/012033

11. Influence of Filler Metals in Welding Wires on the Phase and Chemical Composition of Weld Metal/ N A Kozyrev, I V Osetkovskiy, O A Kozyreva, E A Zernin and D S Kartsev//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 125(2016) - pages 1-7: All-Russia Scientific and Practical Conference on Materials Treatment: Current Problems and Solutions 26–28 November 2015, Yurga,Russia|doi:10.1088/1757-899X/125/1/01/012027.

12. On Quality of a Weld Bead Using Power Wire 35v9h3sf /N A Kozyrev, G V Galevskiy, D A Titov, D E Kolmogorov and D E Gusarov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 125(2016) - pages 1-8: All-Russia Scientific and Practical Conference on Materials Treatment: Current Problems and Solutions 26–28 November 2015, Yurga, Russia | doi:10.1088/1757-899X/125/1/01/012028.

13. Y F Jiang. Effects of iron ion contents on composition, morphology, structure and properties of chromiumcoatings electrodeposited from novel trivalent chromium sulphate electrolyte / Y F Jiang, F Z Yang, Z Q Tian & S M Zhou // Transaction Of The IMF. 2012. – Vol. 19. – P. 86-91.

14. L. C. Casteletti. Hard chromium substitution using HVOF coatings / L. C. Casteletti, Rafael Nucci, Lombardi A. Neto, E. A. B. Arnoni & G. E. Totten // International Heat Treatment And Surface Engineering. 2008. – Vol. 2. – P. 27-31.

15. Alejandro Basso , Sebastian Laino & Ricardo C. Dommarco. Wear Behavior of Carbide Ductile Iron with Different Matrices and Carbide Distribution / Tribology Transactions. 2013. – Vol. 56. – P. 33-40.

16. X. D. Du. Microstructure and wear behaviour of WC-steel composite cladding / X D Du, Y F Wang, K Wang & D R Xu // Materials Technology. 2011. – Vol. 26. – P. 90-95.

17. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Металлургия, 1974 – 768с.

18. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования С-Si-Mn-Cr-V-Mo и С-Si-Mn-Cr-W-V/ Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А.// Бюллетень «Черная металлургия» - 2016.- № 4. -С. 74-78.

19. Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки для наплавки прокатных валков, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик наплавленного металла/ Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А.// Производство проката -2016.- № 5. -С. 43-47.

20. Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Никитин А.Г. / Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки системы $C - Si - Mn - Cr - V - Mo$ для наплавки прокатных валков// Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – т. 59. – № 10. – С. 727-733.

21. Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Бащенко Л.П. / Совершенствование состава порошковых проволок системы $C - Si - Mn - Cr - W - V$ с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя// Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – т. 59. № 11. – С. 806-813.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Г.В. Галевский¹, В.В. Руднева¹, В.С. Александров²

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

²АО «РУСАЛ Новокузнецк», г. Новокузнецк

МИРОВОЕ И ОТЕЧЕСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ: ОЦЕНКА, ТЕНДЕНЦИИ, ПРОГНОЗЫ

Проведен анализ современного состояния мирового и отечественного производства и потребления алюминия, определены доминирующие тенденции, выполнен прогноз на близлежащую перспективу.

The analysis of the current state of world and domestic production and consumption of aluminum is carried out, the dominating tendencies are defined, the forecast for nearby prospect is executed.

Благодаря самой низкой стоимости среди цветных металлов и своим физико-химическим свойствам алюминий широко применяется в авиа- и автомобилестроении, транспорте, производстве бытовой техники, электротехнике и других отраслях. Нередко алюминий с успехом заменяет другие металлы – свинец, цинк, медь, а также конкурирует с изделиями из стали. Поэтому потребление и производство алюминия во всем мире увеличивается высокими темпами.

Производство алюминия

В 2016 году мировой объем производства алюминия вырос на 3,6 % по сравнению с 2015 годом и составил 59 млн. тонн [1]. Из них 37 млн. тонн составляет первичный алюминий, произведенный электролитическим способом, а 22 млн. тонн – вторичный алюминий, т.е. алюминиевые сплавы, полученные путем переработки лома и отходов. Производство вторичного алюминия является быстро развивающейся отраслью цветной металлургии передовых зарубежных стран. Япония полностью отказалась от производства первичного алюминия и перешла на производство вторичного алюминия, а США на данный момент обладают самыми большими объемами производства вторичного алюминия. Россия и расположенные на её территории заводы ОК «РУСАЛ» являются одним из крупнейших производителей алюминия, занимая в группе лидеров – компаний «Chalco», «Rio Tinto Alcan», «Alcoa» – второе место в мире (3,724 млн. тонн в 2016 г.) с долей 6,8 % после компаний Китая (доля 45,0 %) [2]. Россия и ОК «РУСАЛ» также являются крупнейшим экспортером алюминия, обеспечивая 15,3 % мирового экспорта. При этом на экспорт направляется 82,7 % производимой продукции, вследствие чего финансовое со-

стояние ОК «РУСАЛ» напрямую зависит от мировой конъюнктуры. Эти показатели также свидетельствуют о низкой емкости российского рынка алюминийсодержащей продукции.

Мировое производство алюминия в 2016 году по регионам представлено на рисунке 1 [1] и условно может быть разделено на 2 части: Китай и весь остальной мир.



Рисунок 1 – Производство алюминия в мире в 2016 году, млн. тонн

За последние 10 лет Китай продемонстрировал невероятные темпы экономического роста и стал крупнейшим производителем алюминия. По данным Международного института алюминия и аналитического агентства CRU, мировое производство первичного алюминия без учета Китая в 2016 году выросло на 2,2 % – до 26,7 млн. тонн [1]. По данным агентства Aladdiny, производство алюминия в Китае в 2016 году составило 32,3 млн. тонн, увеличившись на 5,5 % в результате запуска новых мощностей. Однако алюминиевые заводы Китая работают на тепловой электроэнергии, что приводит к сильному загрязнению окружающей среды и необходимости разумного увеличения объёмов производства [3]. Основные производители алюминия после Китая – это США и страны Европы, где спрос исторически велик благодаря высокому уровню технического и промышленного развития экономик этих стран. Также крупным потребителем алюминия является Япония, она импортирует весь необходимый ей первичный металл, ликвидировав собственные мощности по его производству. Причина этого – отсутствие на её территории мощных и доступных источников электроэнергии и значительное ужесточение национального экологического законодательства. Хороший прирост произ-

водства алюминия показывают активно развивающиеся страны Юго-Восточной Азии. Компании из Ближнего Востока обладают важным преимуществом: возможность использовать для производства относительно дешевую электроэнергию, получаемую при сжигании попутного газа нефтяных месторождений.

В планах перспективного развития многих алюминийпроизводящих корпораций предусматривается наращивание производства алюминия [3]. Так, Индия предусматривает прекращение экспорта глинозема и его переработку в полном объеме, что позволит увеличить выпуск алюминия с 460 тыс. тонн до 2 млн. тонн. Корпорация «Norse Hydro» (Норвегия) на заводах «Grevenbroich» и «Neuss» в Германии увеличивает выпуск автомобильного алюминиевого проката с 50 до 200 тыс. тонн и вводит производственные мощности по рециклингу 50 тыс. тонн / год использованных алюминиевых банок. ОК «РУСАЛ» продолжает работы по вводу в эксплуатацию производственных мощностей Богучанского алюминиевого завода с проектным объемом производства 750 тыс. тонн / год.

Цена на алюминий на Лондонской бирже металлов в феврале 2017 года достигла 1905 долларов США за тонну [1]. Это связано с дефицитом металла на рынке: в 2016 году он составил порядка 0,7 млн. тонн. На рисунке 2 представлена динамика цен на алюминий за 2010-2017 гг.

Потребление алюминия

Данные по мировому потреблению и производству алюминия в период 2010 – 2016 гг. представлены на рисунке 3 [5].

По оценкам [5] в 2017 г. емкость глобального алюминиевого рынка может увеличиться почти до 64 млн. тонн, в 2018 г. – до 66 млн. тонн, в 2023 г. – до 78 млн. тонн. Спрос на алюминий обеспечивает строительная (+4 млн. тонн), транспортная (+5 млн. тонн), электроэнергетика (+2 млн. тонн), упаковочная и машиностроительная отрасли (+1 млн. тонн).



Рисунок 2 – Динамика цен на алюминий



Рисунок 3 – Диаграмма мирового потребления и производства алюминия

Сложившаяся структура мирового потребления алюминия представлена на рисунке 4 [4, 5].



Рисунок 4 – Диаграмма мирового потребления алюминия по отраслям экономики

Среднедушевое потребление алюминия в мире по итогам 2015 года оценивается в 7,7 кг. Ожидается, что к 2020 году этот показатель вырастет почти до 9 кг. Наиболее высокий уровень потребления алюминия отмечается в настоящее время в странах с высокоразвитым автомобилестроением – Германии и Южной Корее, в которых уровень среднедушевого потребления превышает 26 кг в год. Далее идут США, Швеция, Япония, ОАЭ, Китай – 15-

16 кг в год [4]. Данные по мировому среднему потреблению алюминия представлены на рисунке 5.

Применение алюминия в транспортной и машиностроительной отраслях позволяет транспортным средствам экономить топливо и снижать выбросы вредных веществ. Из алюминиевых сплавов изготавливают части корпусов автомобилей и поездов, колесные диски, корпуса, бамперы, детали фюзеляжа самолетов, топливных систем, части моторов, морские суда, космические шаттлы и ракеты. Согласно расчетам, приведенным Ассоциацией автомобилестроителей, каждый килограмм алюминия, использованный при изготовлении автомобиля, ведет к уменьшению его массы на килограмм, а каждый процент экономии веса автомобиля приводит к снижению расхода топлива в среднем на 1,0 % [7, 8]. Это означает, что 100 кг алюминия в автомобиле экономят более 1000 л бензина на каждые 200 тысяч километров и снижают выбросы углекислого газа на 2500 кг. Сегодня автомобиль, произведенный в Северной Америке, содержит в среднем 116 кг алюминия, японский и южнокорейский – 93, западноевропейский – 90, а отечественный – 30-40 кг.

В современном самолете на долю алюминия в среднем приходится 80 % от общей массы, что с учетом размеров авиалайнеров составляет внушительную цифру. Так, например, в Боинге 747 используется 75 тонн алюминия, а в американских шаттлах доля алюминия доходит до 90 % [7, 8].

Алюминий также занял весьма прочные позиции в строительстве. Он применяется повсеместно: строительные каркасы, оконные и дверные панели, кровля, фасадные и несущие конструкции, элементы внешнего декора, сайдинги, лестницы, системы кондиционирования и отопления. При одинаковой несущей способности вес алюминиевой конструкции в два-три раза меньше веса стальной и до семи раз меньше веса железобетонной конструкции. Минимальный расчетный срок службы алюминиевых конструкций оценивают в

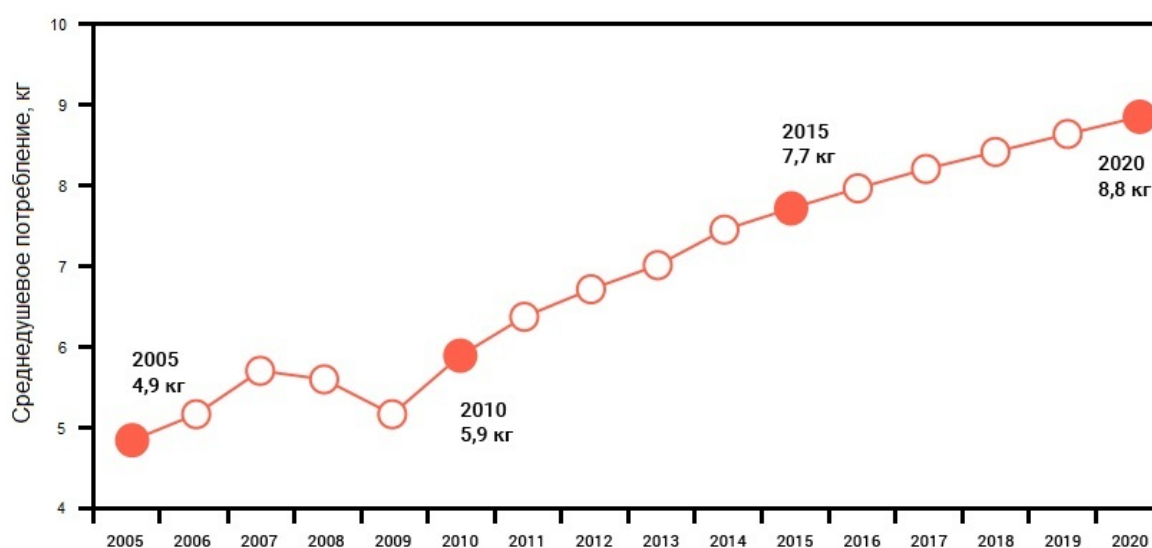


Рисунок 5 – График изменения мирового среднедушевого потребления алюминия

80 лет [9]. Они устойчивы к климатическим воздействиям и «работают» в широком диапазоне температур от -80°C до $+300^{\circ}\text{C}$. Потенциальным недостатком применения алюминия в строительстве является его высокая теплопроводность. Поэтому в алюминиевых конструкциях могут применяться промежуточные термовставки или терморазрывы из материалов с низкой теплопроводностью.

Упаковка и энергетика являются следующими по объему использования алюминия отраслями экономики. Алюминий обладает низкой плотностью, привлекательным внешним видом, совместимостью с продуктами и напитками, высокой теплопроводностью, что делает его востребованным материалом для различных видов упаковки. В этой сфере главные позиции занимают пищевая фольга и алюминиевая банка для напитков: ежегодно производится более 230 млрд банок [9].

Электротехническая промышленность – один из важнейших потребителей алюминия, который использует этот металл для производства проводниковой продукции, линий электропередач, телефонных проводов, конденсаторов, радиолокаторов, корпусов электродвигателей небольшой мощности [2, 9].

На алюминиевых и магниевых электролизерах, а также на мощных дуговых печах для производства кремния и некоторых ферросплавов, для передачи больших токов используют шины из различных алюминиевых сплавов или из алюминия марки А5Е. Сейчас сечение таких шин достигает значительных размеров, а стоимость составляет лишь одну треть от стоимости эквивалентных по проводимости медных шин. Поэтому использование алюминиевых шин ограничивают лишь геометрические размеры агрегатов [2].

Масштабы потребления алюминия для производства товаров народного потребления за последнее десятилетие резко возросли. Алюминиевые сплавы используют для производства изделий домашнего обихода, мебели, компонентов, деталей и корпусов бытовых товаров и техники. Алюминиевые сплавы обладают хорошей теплопроводностью и высокой прочностью, поэтому являются хорошим выбором для применения в системах обогрева, вентиляции и холодильных агрегатов. Алюминиевые сковороды и кастрюли, противни и чайники, жаровни и кашеварки практичны, дешевы, функциональны, легки и удобны в применении. К тому же алюминий обладает высокой теплопроводностью – она в 2,4 раза выше, чем у стали. Алюминиевая кастрюля поглощает только 7 % получаемого тепла (в четыре раза меньше стальной) [9].

Большой интерес представляют алюминиевые порошки и гранулы самых разнообразных размеров и форм [9]. Их применяют в металлургии в качестве легирующих добавок, для изготовления полуфабрикатов и деталей путем их прессования и спекания, для получения ряда химических соединений алюминия, для синтеза металлоорганических соединений и катализа, для повышения коррозионной стойкости стальных и чугунных изделий, особенно в конструкциях, подверженных атмосферному воздействию, в качестве пигмента в покрытиях и красках, применяемых для окраски оборудования, а также в полиграфии.

Порошковая металлургия дает возможность значительно снизить стоимость деталей и увеличить коэффициент использования металла, так как деталь, полученная прессованием порошка в штампе, почти не требует последующей механической обработки. Алюминиевые порошки обладают лучшей способностью к уплотнению, чем порошки на железной основе. Это позволяет повысить прочность изделия и расширить возможности получения различных полуфабрикатов при такой же мощности прессового оборудования. Спеченные алюминиевые сплавы имеют уникальные характеристики, благодаря чему область их применения постоянно расширяется, заменяя в ряде случаев титан и высокопрочные марки стали [9].

Россия, являясь одним из мировых лидеров по производству первичного алюминия, по применению его в готовой продукции значительно отстает от стран Европейского Союза, Северной Америки, Китая. В то же время российские компании экспортируют не только первичный алюминий и сплавы, но и высокотехнологичные алюминиевые полуфабрикаты, листы и прутки из специальных сплавов для машиностроения. Наряду с этим достаточно велик импорт готовой потребительской алюминиевой продукции – фольги, строительных конструкций, мебельных профилей и фурнитуры, радиаторов [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Aluminium – Primary Aluminium Production [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.world-aluminium.org/statistics/>, свободный. – Загл. с экрана.
2. РУСАЛ [Электрон. рес.]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.rusal.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А. Состояние и перспективы развития производства алюминия//Металлург. 2010. №7. С. 4-7.
4. Как устроен алюминиевый рынок [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: http://aluminiumleader.ru/economics/how_aluminium_market_works/, свободный. – Загл. с экрана.
5. Обзор рынка алюминия. Алюминиевая ассоциация [Электронный ресурс]. – <http://www.alumina.ru/upload/iblock/4ab/2016-aluminium-market-review.pdf> - 2016, свободный. – Загл. с экрана.
6. Руйга И.Р. Особенности инновационного развития алюминиевой отрасли Российской Федерации / И.Р. Руйга, Э.Ю. Хиревич. Концепт. – 2015. - № 8. – С. 35 – 42.
7. Галевский Г.В. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, М.Я. Минцис, Г.А. Сиразутдинов. – М.: Флинта: Наука, 2008. – 529 с.
8. Алюминий. Тринадцатый элемент. Энциклопедия. – М.: Библиотека РУСАЛа, 2007. – 240 с.

9. Конечная алюминиевая продукция [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://aluminium-guide.ru/primenenie-alyuminiya-v-promyshlennosti-stroitelstve-i-bytu/>, свободный. – Загл. с экрана.

10. Алюминиевая Ассоциация России: год плодотворной работы [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://aluminium-guide.ru/alyuminievaya-associaciya-rossii-god-plodotvornoj-raboty/>, свободный. – Загл. с экрана.

УДК 502.174:662.613.52

Т.А. Михайличенко, А.Г. Гальчун

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РАЗНЫХ СТРАНАХ

В работе проведен анализ подходов и методов оценки возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – биоэнергетических ресурсов и рассмотрены технические основы их использования в разных странах.

The article presents the analysis of approaches and methods to assess renewable energy sources (RES) – bio-energy and the technical basis for their use in different countries.

Актуальность выбранной темы обуславливается повышением цен на энергоносители и усилением загрязнения окружающей среды, что заставляет нас пересмотреть свое отношение к нерациональному использованию традиционных энергоресурсов и обратить внимание на альтернативные источники энергии. Будущее в области энергопотребления должно обеспечиваться оборудованием, работающим на возобновляемых источниках энергии.

Технологические основы биоэнергетики достаточно сложно сформулировать в краткой форме. Это в первую очередь связано с возможным разнообразием использования биологического материала в энергетике. Рассмотрим наиболее известные в настоящее время технологии.

Биомасса в жидкой форме обычно используется как топливо для двигателей внутреннего сгорания. Первое поколение жидкого биотоплива – это биодизель и биоэтанол. Биодизель – моторное топливо биологического происхождения, которое получают из растительного масла посредством добавления метанола и других присадок. Биодизель можно использовать в чистом

виде, но, как правило, его используют в смеси с нефтяным дизельным топливом в соотношении: до 20 % биодизеля и более 80 % нефтяного топлива. При такой смеси топливные системы не требуют адаптации, в противном случае необходима дезинфекция топливной системы, удаление поливинилхлоридных шлангов, а также замена некоторых датчиков, особо чувствительных к более агрессивной среде биодизельного топлива. Поливинилхлорид (ПВХ) в современных автомобилях не используется, поэтому достаточно провести дезинфекцию (кипячение) топливного бака, в противном случае биодизель становится желеобразным из-за активного размножения бактериальных организмов в питательной среде этого топлива. Для получения биодизеля используют любые масличные культуры: от рапса в средних широтах до пальм в тропических. Спирт получают из растений, богатых сахарами и крахмалом, и этот продукт также пригоден для использования в двигателях внутреннего сгорания. Автомобили, использующие в качестве топлива спирт, требуют специальной технологической адаптации и получили название Флекс (Flex Fuel Vehicles). Этанол можно смешивать с бензином и в случае, если этанола в смеси менее 5%. Бензиновые автомобили адаптации не требуют. Широкое распространение этанол получил в транспортных системах Бразилии, а с конца 2000х годов такое использование спирта активно развивается в США, Швеции и других странах. В силу того, что сахаристые растения лучше растут в тропических и субтропических широтах, этанол более целесообразен в районах с тёплым климатом. В Европе и России наиболее целесообразно использование биодизеля, получаемого из рапса. Активное использование биотоплива уже нанесло достаточно сильный ущерб окружающей среде, и, по видимому, дальнейшее расширение использования биотоплив первого поколения невозможно из-за нехватки сельскохозяйственных земель в мире. Особенно заметен ущерб от использования биотоплива в Бразилии и Юго-Восточной Азии, где для плантаций сахарного тростника и масличной пальмы вырубаются девственные тропические леса. Определённые опасения вызваны и расширенным использованием кукурузы в США для получения этанола. По мнению экспертов, это повысило цены на продукты питания. Большие надежды возлагаются на синтетические биотоплива следующего поколения, основанные на переработке целлюлозы в жидкое углеводородное топливо. Из-за возросшего спроса на масло молодые плантации масличной пальмы сменили тропические леса на значительных территориях на Малазийской части о. Борнео и в других районах Юго-Восточной Азии [1].

Биотопливо активно используется в твёрдой форме. Возможно неконтролируемое окисление биомассы для получения тепла и приготовление пищи, а также контролируемое окисление биомассы. При неконтролируемом сжигании биомассы редко достигается КПД более 15-20 %, а при контролируемом сжигании КПД можно довести до 70 % и более. В мире наиболее распространены низкотехнологичные способы сжигания биомассы. Для повышения КПД биомасса (отходы лесного и сельского хозяйства) спрессовывается в брикеты различного размера, которые называют пеллеты. Пеллеты

затем медленно сжигают при контролируемой подаче воздуха. В Европе получили распространение пеллетные системы для отопления помещений. Несколько раз в год пеллеты засыпаются в специальные хранилища в подвалах, далее система в автоматическом режиме засасывает пеллеты и сжигает их по мере необходимости. Существуют и крупномасштабные системы центрального отопления, использующие пеллеты. В России некоторые котельные в Северо-Западном федеральном округе переведены с угля на пеллеты [2].

Газификация биомассы и последующее сжигание биогаза для получения тепла, электроэнергии или приготовления пищи является ещё одним распространённым способом использования биомассы в энергетических целях. Биогаз – смесь метана и других газов – получают при анаэробном брожении биомассы. Часто в качестве сырья для генераторов биогаза используются отходы животноводства и птицеводства, также возможно использование твердых бытовых отходов (ТБО) и сточных вод городов. Биогаз также возможно улавливать на полигонах ТБО. Существуют разработки по производству специальной биомассы для газификации. В биогазовом генераторе применяются специальные бактерии, а отходы после газификации являются ценным сырьём для удобрения посевов. Во многих странах Азии (Индия, Китай и др.) и Африки для получения биогаза в частных хозяйствах используют отходы жизнедеятельности человека, небольшое количество этого газа применяют для приготовления пищи [3].

Рассмотрим перспективы и региональные особенности использования биоэнергетических ресурсов в Кемеровской области.

Тяжелая экологическая обстановка в регионе делает весьма актуальным внедрение в энергетику ВИЭ. Специфика области состоит в том, что районы в ее разных частях значительно отличаются по природным условиям. На территории области представлены горно-таежный, лесостепной и степной ландшафты. Наиболее велики в Кемеровской области биоэнергетические ресурсы – леса занимают около 2/3 всей площади. Здесь могут широко использоваться отходы деревопереработки, они составляют в среднем около 25 % от переработанной древесины. При этом целесообразно использовать их в виде пеллет, производство которых налажено на ряде предприятий в Кемерово и Новокузнецке. Показано, что используя объемы заготовки древесины по рубкам промежуточного пользования и прочим рубкам, можно получить около 900 тыс. т топлива с суммарной теплотой сгорания около 1200 ТДж/год [4]. Этот ресурс в первую очередь мог бы использоваться предприятиями лесопромышленного комплекса, но их энергоснабжение является централизованным, электроэнергия к производственным участкам подается по высоковольтным электрическим сетям энергетических систем общего пользования и, несмотря на рост тарифов, предприятия такая схема вполне устраивает. Отопление также осуществляется централизованно, поэтому большинство предприятий практически не пользуется предоставленной возможностью применять древесные отходы в целях производства тепловой энергии для собственных нужд. Другим значительным биоэнергетическим ресурсом в области являются отходы сель-

скохозяйственного производства для получения биогаза и попутно биоудобрений. Эффективность применения биогаза для местных условий можно оценить на примере животноводческого комплекса «Кузбасский колос». Ориентировочно в нем имеется около 12 тыс. тонн жидкого навоза в год. Примем, что концентрация метана в получаемом биогазе в среднем составляет около 65 %, CO_2 – 35 %, тогда $Q_{\text{н}}=23282,9 \text{ кДж/м}^3$. Будем считать, что навоз смешивается с соломой, количество получаемого биогаза равно $45 \text{ м}^3/\text{т}$. Количество навоза, получаемого в сутки, в среднем составляет 32,9 т, объем биогаза равен $61,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. При сжигании биогаза с учетом КПД котла, можно получить тепловую мощность 3600 кВт. На этой основе можно создать, например, систему автономного отопления коттеджной застройки общей площадью отапливаемых помещений 3300 м^2 , что особенно актуально при развитии малоэтажного строительства в сельской местности [5]. Другой пример – ООО СПК «Чистогорский» под Новокузнецком – сельскохозяйственное предприятие с поголовьем свиней равным 120 000. Расчеты показывают, что годовая выработка биогаза на этом предприятии может составить $5,09 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, а при монтаже когенерационной установки, работающей на нем, можно получить 35 970 кВт·ч/сутки электрической энергии для собственных нужд. Кроме того, выход твердой массы биоудобрений составит до 40 т/сут., которые могут реализовываться как самим предприятием для повышения урожайности сельхозкультур, идущих на производство кормов, так и на рынке. Срок окупаемости биогазовой установки около 5,5 лет.

Энергетика на ВИЭ пока не может полностью заменить традиционную энергетику России. Но выбирая для конкретного региона оптимальное сочетание традиционных и возобновляемых источников энергии, можно значительно улучшить социальную, экономическую и экологическую ситуацию в целом. А для этого необходима активная поддержка отрасли государством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернова Н.И., Киселева С.В., Попель О.С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // Теплоэнергетика № 6, 2014, с.14-22.
2. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 168с.
3. Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика № 6, 2014, с. 1-10.
4. Перспективы возобновляемой энергетики Кемеровской области. Кемерово, 2008. – 234с.
5. Сливной В.Н., Маврушин В.М. Перспективы применения биогаза в Кузбассе // Сибресурс-2010. Матер. XIII Межд. Науч.-практ. конф., Кемерово, 2010. – 286с.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Д.И. Оршанский, Е.Г. Оршанская

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

ЛИЧНОСТНО ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

Дана характеристика модели деятельности преподавателя с учетом его личностно значимых качеств. Рассмотрены ее компоненты и их признаки. Обоснована эффективной предлагаемой модели.

The characteristic to the model of lecturer's activity subject to his important personal qualities is given. Its components and descriptors are considered. The effectiveness of suggested model is grounded.

Профессиональная педагогическая деятельность преподавателя представляет собой многофункциональную систему, в которой он является источником информации, организует учебное взаимодействие со студентами, обеспечивает развивающее и воспитательное воздействие.

Достижение значимого результата, получаемого в процессе обучения, определяется целым рядом факторов, в том числе содержанием и методами представления изучаемого материала, деятельностью преподавателя, уровнем его подготовки, владением коммуникативно-речевыми умениями. Вполне понятно, что для педагогической характеристики преподавателя создаются и реализуются различные модели личности преподавателя, которые могут быть унифицированными и подходят для подготовки и совершенствования преподавателя без учета преподаваемых дисциплин, так и профессионально ориентированными, принимающими во внимание особенности педагогической деятельности преподавателя [1].

Российские исследователи выделяют два подхода к проектированию модели личности преподавателя – персонологический и профессиографический. Кратко охарактеризуем каждый из них.

В персонологическом подходе предпочтение отдается тем личностным качествам специалиста, которые связаны с общепсихологическими характеристиками личности и учитывают ее сложную структуру. К.К. Платонов, Б.Г. Ананьев считают, что данная модель включает нравственные, правовые и эстетические свойства личности преподавателя, высокий уровень общекультурного развития, индивидуальный опыт и стремление к самооценке, самоанализу, обширный кругозор, общительность.

Профессиографический подход обеспечивает выбор основных профессионально значимых качеств на основании требований, предъявляемых к педагогической деятельности, а также с учетом конкретных потребностей об-

щества на определенном этапе его развития. В.Н. Гоноболин, Ю.Н. Кулюткин делают акцент на профессионально значимых качествах и сопутствующих им свойствах, таких как организаторские способности, педагогический такт, рефлексивное управление, стремление к творческой работе.

Наиболее эффективной представляется модель деятельности преподавателя, создаваемая на основе сочетания двух рассмотренных подходов. С.Б. Елканов, А.И. Щербаков выделяют в модели общегражданские (любовь к детям, интерес к профессии, общительность), профессионально значимые (информированность, организованность, коммуникативность, стремление к самообразованию) и индивидуальные качества (эмоциональная отзывчивость, культура темперамента) [3].

Использование личностно ориентированной модели деятельности преподавателя позволяет создать обобщенное представление о структуре речевого общения и основных характеристиках поведения преподавателя. Разработка подобной модели дает представление о различных режимах взаимоотношений между преподавателем и студентами, помогает выделить их особенности, определить степень их значимости и целесообразности для конкретных видов, этапов и ситуаций учебных занятий [2, с. 42–43].

Разработанные подходы могут стать основой для создания личностно ориентированной модели деятельности современного преподавателя, которая должна включать не только личностно значимые качества, но и раскрывать структуру профессиональной педагогической деятельности. Рассмотрим компоненты данной модели и их характерные признаки.

Личностно ориентированная модель деятельности преподавателя включает пять компонентов:

- личностно значимые качества;
- ориентация деятельности преподавателя;
- характер взаимоотношений между преподавателем и студентами;
- речевая деятельность (контактоустанавливающая, организующая, объясняющая, стимулирующая, оценивающая);
- владение коммуникативно-речевыми умениями (использовать речевую вариативность и адаптацию, осуществлять коммуникативную целесообразность, демонстрировать коммуникативную эмоциональность, обеспечивать конгруэнтность речевого и невербального поведения).

К личностно значимым качествам относятся образованность, доброжелательность, ответственность, мобильность, толерантность, саморазвитие.

Деятельность преподавателя ориентирована на учет интересов и потребностей обучаемых, демонстрируется готовность к сотрудничеству, подчеркивается значимость каждого студента.

Взаимоотношения между преподавателем и студентами строятся на основе соблюдения общепринятых норм речевого поведения. Для речи преподавателя характерны поддержка, совет. Ему следует стремиться поощрять студентов, поддерживать их стремление и желание добиться лучших результатов в

учебе. Он не демонстрирует презрения и раздражения по отношению к обучаемым.

Что касается речевой деятельности преподавателя, то она включает в себя несколько компонентов: контактоустанавливающий, организующий, объясняющий, стимулирующий и оценивающий. Охарактеризуем в таблице 1 каждый из них с двух позиций – без использования на практике личностно ориентированной модели деятельности преподавателя и с ее использованием.

Анализ сведений, представленных в таблице 1, свидетельствует о том, что осуществление деятельности преподавателя на основе реализации личностно ориентированной модели его деятельности позволит ему повысить эффективность своей работы и достижений студентов, выделять наиболее значимую информацию из изучаемого материала, организовать успешное педагогическое взаимодействие с обучаемыми.

Что касается владения коммуникативно-речевыми умениями, то для данной модели отобраны такие умения, которые позволяют преподавателю сделать свою речь и вербальное поведение информационно и эмоционально насыщенными, расширить перечень используемых жанров и тематику, реализовать коммуникативное намерение и определять результативность коммуникативного взаимодействия с помощью обратной связи. Реализация личностно ориентированной модели деятельности преподавателя предполагает владение следующими умениями:

Таблица 1 – Речевая деятельность преподавателя

Речевая деятельность преподавателя без использования личностно ориентированной модели деятельности	Речевая деятельность преподавателя с использованием личностно ориентированной модели деятельности
Контактоустанавливающий компонент	
Основная функция – привлечение внимания обучаемых.	
Преподаватель ограничен употреблением повелительных конструкций, замечаний, порицаний. Ему требуются определенные усилия для установления и поддержания контактов со студентами, организации различных режимов педагогического взаимодействия в процессе проведения занятий.	Привлекает внимание обучаемых в процессе соблюдения норм речевого этикета, включающих правила приветствия, прощания, извинения и т.д. Выбирает уместные режимы педагогического коммуникативного взаимодействия в зависимости от вида занятий и формы работы.
Организирующий компонент	
Основная функция – создание условий, необходимых для эффективного осуществления учебной деятельности.	
Обеспечение соответствующий условий затруднено из-за отсутствия необходимой обстановки и настроения	Создает условия, необходимые для реализации учебного процесса (обеспечение соответствующей

Продолжение таблицы 1

Речевая деятельность преподавателя без использования личностно ориентированной модели деятельности	Речевая деятельность преподавателя с использованием личностно ориентированной модели деятельности
обучаемых, нарушения дисциплины. Степень концентрации внимания и познавательной активности студентов – невысокая из-за постоянного вторжения преподавателя в процесс работы, отвлечения замечаниями и вопросами от выполнения задания. Может отсутствовать ознакомление с формулировкой выполняемой задачи, не всегда раскрывается ее значимость и актуальность для процесса обучения.	обстановки, дисциплины). Способствует мобилизации внимания и познавательной активности обучаемых, их ориентации на достижение поставленной цели. Обеспечивает формулирование учебной задачи и определение способа ее решения в определенном режиме коммуникативно-речевого взаимодействия.
Объясняющий компонент	
Основная функция – разъяснение учебного материала.	
Не обеспечивает адаптивность при разъяснении нового материала. Наблюдаются нарушения языковой нормы при использовании в процессе объяснения русского языка. Осуществление объяснительной речи может быть затруднено быстрым темпом речи, нечеткостью артикуляции, отсутствием выразительности, эмоциональности, иллюстративного материала и другими факторами.	Доступно излагает сущность изучаемых понятий, правил. Использует речевую адаптацию с соблюдением нормативности речи на русском языке. Выбирает соответствующий темп речи, способ знакомства студентов с темой, достаточный уровень эмоциональности, демонстрирует четкость артикуляции, обращенность к аудитории.
Стимулирующий компонент	
Основная функция – поощрение деятельности студентов.	
Может отвлекать от выполнения задания замечаниями и вопросами. Призывы к соблюдению дисциплины и побуждения к выполнению учебных заданий чаще всего сводятся к категоричным высказываниям в повелительном наклонении. Использование невербального поведения бессистемно.	Призывает обучаемых к соблюдению дисциплины и выполнению заданий с помощью условных знаков, жестов, определенных поступков. Побуждает их к активным речевым действиям (например, повторить, прочитать, написать, сказать и т.д.). Просит их проиллюстрировать

Продолжение таблицы 1

Речевая деятельность преподавателя без использования личностно ориентированной модели деятельности	Речевая деятельность преподавателя с использованием личностно ориентированной модели деятельности
Проявляет минимальную формальную заинтересованность процессом обучения. Стимулирующая деятельность осуществляется периодически, от случая к случаю.	объясняемый материал с помощью конкретных примеров. Стимулирующая деятельность осуществляется в течение всего занятия.
Оценивающий компонент	
Основная функция – оценивание деятельности студентов, их учебных достижений.	
Отмечает правильность / неправильность выполняемых обучаемыми действий, их участие в работе вообще, не подчеркивает значимость их достижений. Сопоставляет достижения одних студентов с другими, не позволяя каждому увидеть изменение своего уровня знаний и умений. Обращает внимание обучаемых на то, что их успехи в учебе зависят только от усилий преподавателя.	Констатирует правильность или неправильность учебных действий, выполняемых студентами, определяет степень успешности их выполнения, выражает свое отношение к анализируемым действиям, аргументирует выставляемую оценку. Сравнивает прошлые и текущие достижения обучаемых, сообщает о значимости полученных ими результатов. Преподаватель связывает достижение нового более высокого уровня с затраченными усилиями студентов, считает, что успех может быть достигнут повторно.

- использовать речевую вариативность и адаптацию;
- осуществлять коммуникативную целесообразность;
- демонстрировать коммуникативную эмоциональность;
- обеспечивать конгруэнтность речевого и невербального поведения.

Рассмотрим деятельность преподавателя с двух позиций – без применения коммуникативно-речевых умений и с владением ими (таблица 2).

Изучение характеристики коммуникативно-речевых билингвальных умений, представленной в таблице 2, показывает отличия в речевой деятельности преподавателя, который не применяет перечисленные умения и который владеет этими умениями на достаточном уровне.

Таблица 2 – Характеристика коммуникативно-речевых умений преподавателя

Речевая деятельность преподавателя без использования коммуникативно-речевых умений	Речевая деятельность преподавателя, владеющего коммуникативно-речевыми умениями
Умение использовать речевую вариативность и адаптацию	
Выбор синонимичных выражений ограничен, вариативность выражена слабо. Возможности речевой адаптации практически не используются.	Речь вариативна, присутствуют различные повторы и дублирования. Преподаватель способен адаптировать свою речь в зависимости от конкретных условий учебной иноязычно-речевой деятельности.
Умение осуществлять коммуникативную целесообразность	
Речь не всегда коммуникативно целесообразна, может содержать ошибки, не соответствовать условиям общения.	Речь является коммуникативно-целесообразной, нормативной, содержание высказываний соответствует условиям общения.
Умение демонстрировать коммуникативную эмоциональность	
Оценочные высказывания имеют обобщенный характер, являются в основном однообразными и категоричными. Чаще всего демонстрируется порицание, недовольство. Использование средств поощрения и похвалы является минимальным.	Оценивает действия обучаемых с помощью проявления различных эмоций – как положительных, так и отрицательных (одобрения, похвалы, порицания, неудовольствия и т.д.).
Речевая деятельность преподавателя без использования коммуникативно-речевых умений	Речевая деятельность преподавателя, владеющего коммуникативно-речевыми умениями
Умение обеспечивать конгруэнтность речевого и невербального поведения	
Уровень управления собственным невербальным поведением – невысокий; часто жесты используются хаотично, не-осознанно.	Целенаправленно применяет жесты, типичные для невербального сопровождения речи на русском языке, которые адекватны ситуации общения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемая личностно значимая модель деятельности современного преподавателя не только демонстрирует значимость роли преподавателя как организатора учебного процесса, но и необходимость овладения коммуникативно-речевыми профессионально ориентированными умениями. Представляется, что рассмотренная модель может стать одной из эффективной форм организации учебного взаи-

модействия, реализация которой будет содействовать активизации учебного процесса, повышению качества обучения и результативности межличностного общения преподавателя и студентов в коммуникативно-речевых ситуациях занятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оршанский, Д.И. Роль преподавателя в организации учебного процесса / Д.И. Оршанский, Е.Г. Оршанская // Современное общество, образование и наука : сборник научных трудов по материалам Межд. научно-практич. конф. в 9-х частях. Ч. 5. – Тамбов : ООО «Кон-салтинговая компания ЮКОМ», 2014. – С. 107-109.
2. Оршанская, Е.Г. Современные подходы к моделированию профессиональной педагогической деятельности / Е.Г. Оршанская, Д.И. Оршанский // Наука в современном мире : теория и практика : материалы III Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2015 г. – С. 39-43.
3. Санникова, Н.Г. Модели социально-педагогической деятельности : учеб. пос. / Н.Г. Санникова. – Екатеринбург, 2005. – 172 с.

УДК 371.14

Т.Г. Моисеенко

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

ФОРМЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ УЧИТЕЛЕЙ

Основное содержание статьи заключается в освещении форм и методов повышения квалификации учителя. Критерием эффективности применяемых методов является усиление психолого-педагогической подготовки и личностное развитие учителя. Учитель рассматривается как профессионал, способный самостоятельно проводить научное исследование и решать разнообразные проблемы в своей работе, способный к непрерывному самообразованию.

The main content of the article is to cover the forms and methods of improving the teacher's skills. The criterion for the effectiveness of the methods used is the strengthening of psychological and pedagogical training and the personal development of the teacher. The teacher is regarded as a professional, capable of independently conducting scientific re-

search and solving various problems in his work, capable of continuous in-service education.

Социально-экономические изменения в нашей стране требуют перемен во всех сферах жизни и деятельности общества, в том числе и в образовании. Поиски эффективности работы как высшей, так и средней школы вызвали в современной педагогике интенсификацию исследований в области форм и методов повышения квалификации педагогов. Большую пользу в решении данной проблемы может принести изучение и критическое использование зарубежного опыта, в частности английского.

Изучение методов повышения квалификации педагогов в Англии свидетельствует о том, что они складывались под воздействием многообразных факторов, сформировавшихся под влиянием исторических традиций, философских концепций, потребностей экономики, обусловленных уровнем производительных сил страны, состояния образования.

Разработка методов повышения квалификации базируется на многих положениях. Но большое место занимает прагматическая теория, лежащая в основе английской педагогики и обуславливающая «обучение посредством делания». Такой подход к решению проблем повышения квалификации учителей оправдывается стремлением английских педагогов к повышению эффективности работы вуза и школы. При этом процесс обучения рассматривается педагогами-прагматистами как путь последовательного решения проблем. Критерием эффективности применяемых методов они считают профессиональные потребности учителей. Это обуславливает тот набор методов, которые используются в системе повышения квалификации педагога.

В английской педагогической литературе для обозначения понятия «метод» употребляются три взаимозаменяемых термина: «methodology», «technique», «method», обзор оригинальных источников по проблеме методов повышения квалификации учителя позволил нам прийти к выводу, что имеются некоторые различия в употреблении этих терминов. Термин «methodology» употребляется в значении «логики», последовательности употребления методов. Термин «technique» используется для обозначения конкретных способов, детализированной методики прикладного исследования. Термин «method» обозначает более широкое понятие, включающее и средство передачи знаний обучающимся, и форму организации учебной работы, и способ работы обучающего и обучаемых. В своей работе мы опираемся на три определения, так как считаем, что они взаимосвязаны и освещают понятие «метод» с разных сторон.

По проблеме методов повышения квалификации учителей в Англии проводится мало специальных исследований, а имеющиеся в наличии носят зачастую локальный характер, методы, используемые в повышении квалификации учителя, очень разнообразны и их трудно классифицировать. Это такие методы как лекции, беседы, дискуссии, групповые занятия, семинары-

тренинги, модульное обучение, «мозговая атака», деловые игры и многие другие.

Анализ английской периодической и монографической литературы позволяет классифицировать все модели повышения квалификации учителя на две группы: повышение квалификации, организуемое исключительно силами педагогического коллектива школы, и повышение квалификации с привлечением специалистов из университетов, педагогических колледжей, местных органов образования. Учительского центра.

В качестве примеров для первой группы моделей можно назвать:

1) однодневное посещение учителем уроков в соседней школе с целью выяснения какой-то определенной проблемы, например, пасторской заботы о детях в процессе обучения, с последующим сообщением о результатах наблюдения на собрании педагогического коллектива;

2) взаимообмен рабочими местами двух старших учителей из двух различных школ на срок не более недели в целях расширения опыта с последующим анализом и оценкой своей работы;

3) систематическое взаимопосещение уроков в течение триместра двумя учителями из разных школ с последующим их обсуждением;

4) научно-исследовательская работа при школе, по таким проблемам как разработка программы обучения, проблемы консультирования и др., завершающаяся отчетом перед школьным коллективом;

5) регулярные встречи представителей руководства школы с членами педагогического коллектива индивидуально для обмена опытом, мнениями, советами для решения общих проблем в атмосфере открытого диалога;

6) повышение квалификации благодаря совместному чтению в библиотеке школы литературы по педагогическим проблемам, копий лекций, читавшихся на курсах повышения квалификации при школе,

7) взаимообмен учителями на год, а также индивидуальные и групповые учебные визиты на несколько недель в другие страны, осуществляемые Организацией экономического сотрудничества и развития европейского сообщества.

Формы повышения квалификации для второй группы моделей могут быть следующими:

1) ежегодное освобождение на неделю педагогического коллектива школы, сотрудничающего с координатором Учительского центра по техническим средствам обучения в целях подготовки материалов для уроков;

2) приглашение группой учителей общеобразовательной школы директора Учительского центра и нескольких лекторов из сектора высшей школы для проведения курса по разработке новой интегрированной программы обучения;

3) приглашение в школу советников из местных органов образования для проведения курса повышения квалификации (например, по обучению математике в начальной школе), насчитывающего 8-10 еженедельных занятий и

закключающегося в посещении и наблюдении уроков с последующей дискуссией;

4) двухдневная школьная конференция на тему «Обучение в общеобразовательной школе» с приглашением главного советника из местных органов образования, директора из другой общеобразовательной школы и лектора университета, завершающаяся формированием нескольких рабочих групп, которые занимаются изучением определенных проблем в течение учебного года;

5) «Дни Бейкера» с привлечением специалистов, чаще из местных органов образования, либо из других организаций, осуществляющих повышение квалификации.

В современных условиях в новой модели повышения квалификации учителей наблюдается тенденция к снижению удельного веса специальных дисциплин, предметной подготовки в содержании обучения, к усилению психолого-педагогической подготовки и личностному развитию учителя. Учитель рассматривается как профессионал, способный самостоятельно проводить научное исследование и решать разнообразные проблемы в своей работе, способный к непрерывному самообразованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The British Educational Research Journal Volume 38, 2012.
2. Гаргай, В.Б. Повышение квалификации учителей в Великобритании / В.Б. Гаргай // Сибирский педагогический журнал. – 2007. – 2. – С. 208 – 217.
3. Гаргай, В.Б. Повышение квалификации работников образования в Великобритании // Тенденции современного образования: состояние и перспективы: Материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Изд-во: НИПКиПРО, 2006. – С. 64 – 68.
4. British Journal of Education Technology Volume 47, 2016.

Е.Г. Оршанская

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

МАСТЕР-КЛАСС КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ВЛАДЕНИЯ ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКОМ

Рассмотрено использование обучающих мастер-классов в процессе изучения иностранного языка. Перечислены их особенности. Дана характеристика отобранному материалу. Приведены примеры разработанных заданий. Выделены достоинства применения мастер-классов.

The usage of training Master Classes in the process of learning English is considered. Their peculiarities are enumerated. The characteristic to the selected material is given. The examples of developed tasks are presented. The advantages of Master Classes' application are marked out.

Типичной чертой современного образовательного процесса становится межпредметная интеграция, которая находит отражение в организации подготовки обучаемых и проявляется в отборе, способе предъявления, изучения и закрепления нового материала, перечне формируемых компетенций. Междисциплинарный характер обучения способствует становлению профессиональной личности. Включение в процесс изучения иностранного языка в вузе профессионально ориентированных компонентов, связанных с профессиональной подготовкой обучаемых, позволяет закреплять теоретические знания, получаемые ими при изучении учебных дисциплин на русском языке, расширять их представление об основах выбранного ими направления подготовки, дает возможность совершенствовать владение иностранным языком.

Одним из способов реализации межпредметной интеграции является проведение мастер-класса. В последнее время все большей популярностью пользуются мастер-классы различной тематики. Наиболее распространенными стали демонстрационные мастер-классы, позволяющие показать идеи, возможности и достижения в определенной сфере деятельности. Что касается образования, то представляется более целесообразным разработка и проведение т.н. обучающих мастер-классов, на которых участники не ограничиваются просмотром, а имеют возможность овладеть определенными знаниями, совершенствовать свои умения и попробовать применить их на практике. В данной статье рассмотрены возможности применения обучающих мастер-классов на примере преподавания учебных дисциплин «Иностранный язык в сфере профессиональной коммуникации» для магистров и «Иностранный язык» для аспирантов.

Отличительной особенностью обучающих мастер-классов является их профессиональная направленность, учет направления подготовки магистров и аспирантов. У.В. Гончарова отмечает, что проведение мастер-класса включает:

- работу в малых группах;
- обмен мнениями;
- создание условий для включения каждого обучаемого в активную коммуникативную деятельность;
- сотрудничество, проигрывание различных ситуаций [1, с. 3–4].

Вполне естественно, что содержание обучения иностранному языку отличается от содержания обучения профессионально ориентированным дисциплинам, которые ориентированы преимущественно на усвоение понятий, приобретение знаний, в то время как при изучении иностранного языка главной целью является формирование коммуникативных умений для овладения соответствующими компетенциями, обеспечивающими возможность практического использования языка как средства общения в учебно-профессиональной сфере деятельности.

Материал, отбираемый для проведения мастер-класса, должен включать в себя работу над следующими аспектами: фонетический, лексический, грамматический и терминологический. Обучаемые должны иметь возможность развивать и совершенствовать соответствующие умения, приобретать новые знания, повышать уровень своей профессиональной осведомленности, расширять владение средствами представления своей профессиональной деятельности на иностранном языке.

Использование профессионально ориентированных материалов позволяет овладевать обучаемым профессиональным иноязычным общением, осваивать профессионально значимую терминологию, повышает уровень интереса и востребованности изучения иностранного языка.

В качестве примеров рассмотрим материалы двух мастер-классов на английском языке – "Prominent British economists" и "Famous computer scientists". Изучение информации о выдающихся ученых данных отраслей науки, которые внесли значительный вклад в их становление и развитие, дает возможность повысить уровень осведомленности обучаемых об истории и современном состоянии выбранного ими направления подготовки, знакомит с соответствующей лексикой, демонстрирует употребление уместных грамматических конструкций.

Представленные тексты на английском языке о выдающих британских экономистах XVIII-XX веков и программистах XX века дополняют теоретические сведения, получаемые обучаемыми о становлении экономики как науки и учебного предмета, о развитии компьютеров и информационных технологий при изучении дисциплин, связанных с профессиональной деятельностью. Данные тексты представляют собой новый дидактический материал, поскольку в современной учебно-методической литературе, предназначенной для магистрантов и аспирантов соответствующих направлений подготовки, изучающих английский язык, практически отсутствуют сведения о выдаю-

щихся экономистах и программистах, достижения которых способствовали развитию экономики и информатики. Работа с текстами направлена на совершенствование умений обучаемых, обеспечивающих понимание прочитанной на иностранном языке информации и адекватное употребление грамматических явлений.

Кратко охарактеризуем структуру текстов, обсуждаемых в процессе проведения мастер-класса. В каждом тексте приведены отдельные факты о личной жизни и изложены сведения о профессиональной деятельности и достижениях одного ученого. Тексты расположены в хронологической последовательности в соответствии с датами рождения ученых. Каждый текст сопровождается заданием, в том числе в тестовой форме. Разработано два вида подобных заданий: для проверки степени усвоения грамматического материала и для проверки качества понимания содержания прочитанного текста. В заданиях предусмотрен выбор одного правильного ответа из четырех возможных.

В качестве примера приведен текст из мастер-класса "Famous computer scientists" и задание к нему [2, с. 25–28].

Tim Berners-Lee

Sir Timothy (Tim) Berners-Lee is a British [computer scientist](#). He was born in London. His parents worked on the first commercially-built computer, the [Ferranti Mark 1](#). A keen [trainspotter](#) as a child, he learnt about electronics from tinkering with a model railway. He studied at [The Queen's College](#) of the [University of Oxford](#) from 1973 to 1976, where he received a [first-class degree](#) in physics.

After graduation, T. Berners-Lee worked as an engineer for the telecommunications company [Plessey](#). He also worked as an [independent contractor](#) at [CERN](#) from June to December in 1980. While there, he proposed a project based on the concept of [hypertext](#), to facilitate sharing and updating information among researchers. To demonstrate it, he built a prototype system named [ENQUIRE](#).

After leaving CERN in 1980, he went to work at John Poole's Image Computer Systems. He ran the company's technical side for three years. The project he worked on was a "[real-time remote procedure call](#)" which gave him experience in [computer networking](#). In 1984, he returned to CERN. In 1989, T. Berners-Lee saw an opportunity to join hypertext to the Internet. The first website was built in August 1991. Its visitors could learn more about hypertext, technical details for creating their own webpage, and even an explanation on how to search the Web for information. Nowadays there are no screenshots of this original page. A later copy (1992) on the World Wide Web Consortium website can be found.

In 1994 T. Berners-Lee founded the World Wide Web Consortium (W3C). It comprised various companies that were willing to create standards and recommendations to improve the quality of the Web. T. Berners-Lee made his idea available freely, with no patent and no royalties due. W3C decided that its standards should be based on royalty-free technology, so that they could easily be adopted by anyone.

In 2004 he accepted a chair in Computer Science at the School of Electronics and Computer Science at [University of Southampton](#) in England and worked on the [Semantic Web](#).

Since 2012 T. Berners-Lee is the President of the [Open Data Institute](#). He also tries to decrease the Internet access prices to make the Internet access more affordable so that access is broadened in the developing world where only 31 % of people are online. He thinks that the Web is a medium for positive change.

In 1999, [Time Magazine](#) named T. Berners-Lee one of the [100 Most Important People of the 20th century](#). In 2011 he was one of the first three recipients of the [Mikhail Gorbachev](#) award for "The Man Who Changed the World".

1. What subject did T. Berners-Lee get a first-class degree in?
 - A) computer science
 - B) electronics
 - C) physics
 - D) modelling
2. What did he do from June to December in 1980?
 - A) He worked as an engineer at the telecommunication company.
 - B) He developed a project based on the concept of hypertext.
 - C) He worked independently.
 - D) He continued his studies.
3. Which work gave T. Berners-Lee experience in computer networking?
 - A) He developed a "real-time remote procedure call".
 - B) He joined hypertext to the Internet.
 - C) He tried to share and update information about hypertext.
 - D) He created the first website.
4. When was the first website built?
 - A) in 1984
 - B) in 1989
 - C) in 1991
 - D) in 1992
5. Can the Internet users look through the first website?
 - A) Yes, they can find it on the Internet.
 - B) They can if they know its address.
 - C) No, they can't. It doesn't exist.
 - D) No, they can't because it's prohibited.
6. Why is the WWW free?
 - A) T. Berners-Lee gets enough money according to his patent for the WWW.
 - B) He gets royalties.
 - C) It was the decision of the royal family.
 - D) T. Berners-Lee wants that the WWW should be easily use by everyone.
7. What does T. Berners-Lee think about the WWW?
 - A) The WWW is a medium to make the Internet more affordable.
 - B) The WWW is a means for positive change.
 - C) The WWW is a way to increase the number of people online.

D) The WWW is a method of decreasing the Internet access prices.
8. Why do you think T. Berners-Lee was called "The Man Who Changed the World"?

- A) He developed hypertext.
- B) He built a prototype system.
- C) He created the WWW.
- D) He made the WWW free for users.

Для активизации изученной информации профессионально ориентированного характера разработаны задания обобщающей направленности, предусматривающие:

- дополнение предложений по смыслу;
- ответы на вопросы,
- подбор и сопоставление фамилии ученого и соответствующего ему изобретения, достижения;
- название изобретения, достижения и составление его характеристики;
- подготовку и выступление с докладом о современном британском / российском экономисте / ученом, специализирующимся в области компьютерных наук.

В качестве примера ниже представлены некоторые задания обобщающей направленности.

Complete the following sentences:

1. An English demographer and political economist who became well-known for his views on population growth was _____.

2. The author of comparative advantage theory that makes the basis of modern trade is _____.

3. The textbook used in teaching economics until 1919 was "_____". It was written by _____.

4. An economist who brought together the theories of supply and demand, of marginal utility and the costs of production into a coherent whole was _____. He published them in the dominant economic textbook "_____".

5. The founder of modern macroeconomics is considered to be _____.

6. An economist who pioneered the use of the gross national product (GNP) as the basis for studying national economies was _____.

7. In 1984 _____ received the Nobel Prize in economics for creation the system of national accounts.

8. In 1979 _____ was awarded the Nobel Prize for his research of economic problems of developing countries.

9. _____ developed growth and distribution theory.

Answer the following questions:

1. What new information have you learnt about British economists and their contributions to economics?
2. Is it necessary to study and know the works of economists of last centuries? Why do you think so?
3. What information have you learnt about the development of economics as a science and a subject of studying?
4. What economic textbooks are used nowadays? Who are their authors? What do you know about them?
5. What economic theories mentioned in the texts are you familiar with? Tell the students of your group the main idea of one of them.
6. Do you know any other British economists who were awarded the Nobel Prize in economics? When and why did they receive that award?
7. How are all economists connected together? What helps them in their research work? [3, c. 34–35]

*Match computer scientists in column A with their inventions in column B.
What inventions do we use nowadays?*

A	B
1 W.A. Clark	a C, a general-purpose programming language
2 D. Engelbart	b UTF-8
3 D. Ritchi	c e-mail
4 D. Ritchi, K. Thompson	d the computer mouse
5 K. Thompson, R. Pike	e CP/M (Control Program / Microcomputer)
6 R. Tomlinson	f Laboratory Instrument Computer
7 G. Kildall	g " Systers ", the first e-mail network for women in technology
8 A. Borg	h the Unix operating system [2, c. 31]

Таким образом, разработанные задания способствуют овладению основами профессиональной лексики, позволяют повторять и тренировать наиболее употребительные грамматические конструкции, создавать высказывания на иностранном языке, обсуждать изученную информацию.

Использование мастер-классов имеет ряд достоинств, среди которых можно назвать следующие:

- формируется коммуникативная компетенция обучаемых в учебно-профессиональной сфере общения;
- обеспечивается расширение учебного материала;
- применяются модели предложений, базирующиеся на материале профессионального ориентированного иностранного языка, которые составляют основу занятий по грамматике;

– осуществляется гибкость, вариативность профессионально ориентированного обучения для аудиторной групповой и индивидуальной подготовки.

В процессе разработки и проведения мастер-классов реализуется принцип профессионализации обучения, который обеспечивает возможность учитывать цель, задачи и условия изучения иностранного языка в магистратуре и аспирантуре, формировать активный терминологический запас по определенному направлению подготовки.

Изложенное выше, позволяет сделать вывод о том, что использование обучающих мастер-классов при изучении иностранного языка является эффективным средством повышения качества его усвоения, способствует активизации учебно-коммуникативного взаимодействия между преподавателем и обучаемыми, придает обучению профессионально ориентированный характер. Выполняемые задания имеют коммуникативную основу и предусматривают овладение основами профессиональной лексики с учетом коммуникативных потребностей обучаемых, реализуемых в учебно-профессиональной сфере общения с учетом выбранного направления подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова, У.В. Мастер-класс. Теоретические аспекты : [Электронный ресурс] / У.В. Гончарова / Социальная сеть работников образования. – Режим доступа : <http://nsportal.ru/detskiy-sad/raznoe/2015/09/03/statya-na-temumaster-klass-teoreticheskie-aspekty>.
2. Computer scientists in personalities: Famous computer scientists : метод. указ. / сост. Е.Г. Оршанская ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2014. – 33 с.
3. Economics in personalities: Prominent British economists : метод. указ. / Сост. Е.Г. Оршанская ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : СибГИУ, 2010. – 36 с.

Ю.К. Осипов

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

АРХИТЕКТУРА, ОБРАЗОВАНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

Как известно архитектура – результат органичного сочетания различных дисциплин и ситуаций, ставший в настоящем более неполным и непостоянным, нежели в прошлом. Фрагментарность современной архитектуры становится всё более ощутимой, равно как и все больший распад форм.

Нередко архитектурная концепция подразумевает своего рода «урезание» традиционных конструкций: все сложнее становится дать определение архитектуры – синтез это или всего лишь часть сложной экспрессивной модели, связанной с художественным экспериментированием и скульптурой. Проблема затрагивает и вопрос архитектурной выразительности в современном мире, в котором всё требуется стандартизации.

В недавнюю эпоху модернизма отношения между искусством, технологией и строительной сферой были четко определены. И само понятие архитектуры было ясным и понятным, сформировавшимся за многие столетия. Теперь же это понятие требует коррективов. Художественный взгляд в наши дни вступает в противоречие с информационными технологиями и техническими достижениями.

Ле Корбюзье, французский архитектор швейцарского происхождения, теоретик новой архитектуры, живописец и дизайнер, был одним из основателей «всемирного стиля» в архитектуре. В одном из своих известных высказываний – «дом – это машина для жилья» – он выразил идею целесообразности архитектуры. Архитектор настаивал на том, чтобы проектирование здания осуществлялась также продумано, как конструирование техники. Многие исследователи разделяли его взгляды, и это привело к тому, что архитектура стала более механической и технологичной. Всё это стало прошлым, так как происходило в начале прошлого столетия. Но, тем не менее, это мировое наследие, от которого нельзя отмахнуться. Но следует извлекать уроки [1].

Прошлое оставило нам и свои прототипы, в числе которых есть и материалы, и форма, и стратегии, и даже идеалы, имеющиеся у каждого исторического периода. Яркие примеры воплощения характерных черт архитектуры, присущих определенному периоду в истории.

Достижения нашей эпохи позволяют реализовать и претворять в жизнь идеи, которые еще совсем недавно казались утопией. Движение к прозрачности, скорость и смещение линий – это те идеи, которые олицетворяют в наших глазах будущее, и которые воплощаются в новых зданиях. Пространство

– это то, что окружает всех нас, его можно видоизменять, и именно это делают архитекторы.

Постановка архитектурного образования в нашей стране и задачи высшей архитектурной школы определяются спецификой профессии архитектора и его творческой деятельностью. Социальная значимость профессии архитектора возрастает, когда проблемы архитектуры связываются с решением задачи организации материальной и архитектурно-пространственной жизненной среды человека. И это очевидно, так как архитектура настоящая та, для которой человек в центре внимания.

Архитектура, отражая жизнь эпохи, требует от архитектора глубокого знания социальных, технических, научных и художественных проблем. Этим определяется основная задача архитектурного образования – обучить и воспитать архитектора, способного охватить жизнь во всём ее многообразии. Высшее архитектурное образование призвано обеспечить подготовку архитектора, обладающего высоким уровнем культуры и сформировать его, как личность.

На современном этапе резко меняются подходы к подготовке специалистов. Архитектурный замысел и дальнейшее воплощение проекта в жизнь, как правило, продиктованы региональными, социально-экономическими факторами, национальными и историческими особенностями, экологической ситуацией. Реальность в архитектуре основана на стандартах и нормах. На практике проект проходит ряд инстанций для согласования, экспертиз – то, с чем студенты в период обучения не сталкиваются и могут предлагать самые различные решения [1]. Но уже сегодня в учебном процессе при подготовке специалистов возникают вопросы и противоречия: нужна ли специализация в архитектурном образовании; чему отдать предпочтение – компьютерному или традиционному (ручному) выполнению курсовых и дипломных проектов; что важнее – экономика проектных решений или выразительный образ и т.д.

Однозначных ответов нет, но очевидно каждая архитектурная школа, в первую очередь региональная, должна самостоятельно решать вопросы на уровне формирования учебных планов, авторских программ [2], что не всегда удается.

В архитектурном образовании возник целый ряд противоречий, имеющих системный характер. И для их решения необходимо провести комплекс действий по устранению создавшихся проблем. Существующие проблемы в архитектурном образовании можно условно разделить на два уровня. Первый уровень – это формирование нормативной документации по разработке образовательных программ. Второй уровень – непосредственная реализация образовательных программ на уровне вуза.

Первый уровень предполагает реформирование высшей архитектурной школы «сверху», что значительно превышает инициативу «снизу» и приводит к дезорганизации в процессе поиска новых способов выхода из сложившейся ситуации. При этом идея модернизации создает проблемную ситуацию, открывающую актуальность и допускающую процесс осознания новых возможно-

стей, и прежде всего, совместного творчества работодателей, высшей школы и студентов по моделированию результатов образования и образовательного процесса. Усугубляет ситуацию положения архитектурного направления в одной группе направлений и специальностей со строительными направлениями.

На уровне вуза пересмотра норм времени при расчете нагрузки приводит к тому, что уменьшается фактическое аудиторное время на одного студента.

При этом остро встает вопрос передачи знаний и опыта посредством новых подходов, методов и технологий обучения. Это заставляет преподавателей обращаться к педагогическим технологиям и пересматривать свои же подходы к подаче материала. Особенно это актуально для всеобъемлющей дисциплины «Архитектурное проектирование», в которой передача опыта и обучение по типу «мастер – ученик» не имеет альтернативы.

Существующие нормативные документы позволяют вузу самостоятельно формировать учебные планы и их содержательное наполнение. Однако возможность формировать свободный учебный план, ограниченный только количеством зачетных единиц и соотношением в них аудиторных и самостоятельных часов, создает проблему мобильности студентов, возможности освоения дисциплин в разных вузах из-за существенной разницы в учебных планах.

Тенденция к увеличению доли самостоятельной работы студента косвенно указывает на перенос ответственности за свое образование на студента.

На наш взгляд существует еще одна проблема, на которую следует обратить внимание. Это активное распространение цифровых технологий и методов компьютерного моделирования в учебном проектировании, что привело к вытеснению ручной графики. Компьютер используется довольно широко практически всеми студентами. При этом решаемые проектные задачи можно свести к нескольким позициям: разработка объемно-пространственных и планировочных решений; онлайн редактирование совместно с преподавателем; определение видовых точек перспектив и так далее.

По существу компьютер используется студентами дискретно. При этом прослеживается явное несовершенство виртуальных средств с точки зрения обеспечения конечных целей учебного проектирования: разрыв между техникой и творчеством.

Экран компьютера не способен охватить весь проект с должной степенью детализации. Фрагментарность обзора затрудняет целостное восприятие проектируемого объекта. Это психологически перегружает студента необходимостью постоянно проверять вносимые изменения и держать в голове массу непрерывно меняющихся деталей.

Ручная техника позволяет автору свободно следовать за своей формирующейся профессиональной интуицией, сосредотачиваясь на вопросах архитектуры, актуальных лишь для человека. В этом диалоге студента с архитектурным пространством, компьютер часто становится «третьим лишним».

Он, как правило, требует головоломных ответов с узкоспециализированным инструментарием: «как это сделать на компьютере?».

В итоге, вместо разработки архитектурно-пространственного решения, время и силы тратятся на второстепенную задачу разработки средств его отображения на компьютере, что не всегда оправданно. И дело скорее в том, что человек и компьютер видят и отображают архитектуру по-разному. Полученные на компьютере ортогональные проекции всё равно нуждаются в ручной доводке. В виртуальном пространстве можно моделировать «всё что угодно».

Компьютер бессмысленно использовать при разработке архитектурной формы, которая затем оказывается невыполнимой при изготовлении бумажного макета. В то же время ручной (бумажный) макет позволяет проверить рациональность формы с точки зрения технологичности конструктивных узлов.

Компьютерные программы на порядок увеличивают трудоемкость работы, затраты времени и финансовых средств, одновременно ослабляя связь между автором (студентом) и произведением, понижают мотивацию к творчеству. Практически весь учебный процесс компьютеризирован, соответственно резко возрастает психологическая и физиологическая нагрузка на студентов. По этой причине студенты обосновывают отказ от полного выполнения проекта на компьютере именно этим. В этом случае ручная графика становится отдыхом от компьютера и позволяет восстановить рабочей силы студента.

А вывод напрашивается такой – компьютер остается пусть и великолепным, но достаточно узкоспециализированным средством (станком) по изготовлению проектной документации. Он заостряет несущественные на стадии эскизного и учебного проектирования ошибки и недочеты – его точность и однозначность становится помехой для творчества и обучения ему. Но это не методологическая ошибка обучающихся, а оправданная тенденция сделать процесс разнообразным и гибким, закономерное стремление учиться главному – профессии архитектора.

В целом существующая ситуация такова, что в условиях проблем в архитектурном образовании неизбежным станет пересмотр учебных планов по подготовке бакалавров-архитекторов. Это должно привести, в свою очередь, к пересмотру концепции подготовки архитектора и возможности использования индивидуальных авторских программ обучения архитектуре в авторских школах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов Ю.К. Архитектура – результат органичного сочетания различных дисциплин и ситуаций, ставших в настоящем более неполными и непостоянными, нежели в прошлом : Вестник СибГИУ № 3, 2016. – с. 26 – 30.
2. Кудряшов А.П. Архитектурное образование и молодые архитекторы. // Информационный бюллетень Российской Академии архитектуры и строительных наук. – М.: РААСН, 1999. – С. 25 – 32.
3. Гусейнов Ф.М. Региональный подход к архитектурному проектированию // Ученые записки. – Баку. ААСУ, 2004 – С. 84 – 86.

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ

Г.Г. Волокитин*

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА» (АВТОРЫ ГАЛЕВСКИЙ Г.В., МИНЦИС М.Я., РУДНЕВА В.В. – М. : НАУКА : ФЛИНТА, 2017 – 265 С.)

Производство алюминия – это важнейшая сфера цветной металлургии, обеспечивающая авиационную и ракетокосмическую технику, наземный высокоскоростной транспорт и строительные конструкции алюминиями и сплавами на его основе. Среди цветных металлов алюминий всегда занимал лидирующие позиции по объему производства и динамике его прироста, по экспорту металлопродукции. Это обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования производства алюминия, используемого оборудования, а также подготовки высококвалифицированного персонала.

В системе отечественного высшего металлургического образования в течение последних 10 лет произошли существенные изменения, обусловленные в первую очередь переходом от реализации традиционной 5-летней программы подготовки инженеров в рамках конкретных специальностей – «Металлургия черных металлов», «Металлургия цветных металлов», «Обработка металлов давлением» и др. – к 4-х-летней программе так называемого прикладного бакалавриата, ориентированной на направление «Металлургия», поглотившее в форме профилей весь спектр узнаваемых ранее металлургических специальностей. Наряду с этим во многих вузах произошло перераспределение объемов аудиторно-лабораторной работы и самостоятельной работы, составивших в рамках рабочей недели 18 и 36 часов соответственно. Эти перемены поставили достаточно остро вопрос о разработке и издании новых учебно-информационных ресурсов, адекватно учитывающих реальное состояние учебного процесса.

Представляется, что рецензируемое учебное пособие «Оборудование и технология алюминиевого производства» с полным основанием может быть отнесено к новому поколению востребованных временем учебных изданий. Его авторы Галевский Г.В., Минцис М.Я., Руднева В.В. – доктора технических наук, профессора кафедры металлургии цветных металлов и химический технологии Сибирского государственного индустриального университета – имеют значительный опыт создания учебно-методических ресурсов, соответствующих времени. По своей структуре учебное пособие включает 12 разделов, каждый из которых содержит список рекомендуемой литературы, и изложено на 265 страницах: раздел 1 «Свойства алюминия»; раздел 2 «Сырье

для производства алюминия»; раздел 3 «Основы электролиза алюминия»; раздел 4 «Свойства электролита»; раздел 5 «Конструкции электролизеров»; раздел 6 «Монтаж и ремонт электролизеров»; раздел 7 «Обжиг и пуск электролизеров»; раздел 8 «Технологическое обслуживание электролизеров»; раздел 9 «Серия электролиза»; раздел 10 «Электроснабжение серий электролиза»; раздел 11 «Транспорт и подача глинозема в электролит»; раздел 12 «Самостоятельная работа студентов». Несомненным достоинством учебного пособия является представленный в нем обширный материал для самостоятельной работы обучающихся, включающий контрольные вопросы, примеры выполнения востребованных в производстве алюминия технологических расчетов, а также задачи для самостоятельного анализа и решения. Таким образом, учебное пособие знакомит обучающихся с оборудованием и технологией производства алюминия - важнейшего цветного металла, обеспечивает формирование у них устойчивых навыков и умений выполнения необходимых технологических расчетов.

Общее построение учебного пособия, его оформление соответствуют требованиям, предъявляемым к учебно-методической литературе для высших учебных заведений. Графический материал подобран методически правильно, отражает сущность текста и помогает освоению материала. Терминология и стиль изложения соответствуют общепринятым нормам и действующим стандартам.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов, преподавателей вузов, специализирующихся в области металлургии, а также может быть полезно широкому кругу инженерно-технических работников профильных металлургических предприятий.

*Волокитин Геннадий Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Г.Г. Волокитин*

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ» (АВТОРЫ ГАЛЕВСКИЙ Г.В., МИНЦИС М.Я., РУДНЕВА В.В. – М. : ФЛИНТА : НАУКА, 2017. – 218 С.)

Алюминиевая промышленность является наиболее крупной отраслью цветной металлургии. Объем производства алюминия намного опережает выпуск всех остальных цветных металлов и уступает только производству стали. Высокие темпы прироста производства алюминия обусловлены его уникальными физико-химическими свойствами, благодаря которым он нашел широкое применение в электротехнике, авиа- и автостроении, транспорте, производстве бытовой техники, строительстве, упаковке пищевых продуктов и пр.

Алюминиевая промышленность России занимает доминирующее положение в производстве цветных металлов в стране и по выпуску первичного алюминия находится в группе мировых лидеров. В условиях ориентации российских производителей алюминия на мировой рынок и транснационального характера их производственной и экономической деятельности, прогнозируемого в среднесрочной перспективе роста цен на сырье и электроэнергию, актуальными становятся вопросы снижения себестоимости его производства для сохранения существующей в отрасли нормы прибыли. Для сохранения конкурентоспособности российским производителям необходимо предпринять срочные усилия по модернизации основных производственных мощностей и совершенствованию технологии, строительству и пуску новых современных высокоавтоматизированных и механизированных предприятий, что позволит значительно поднять экономическую эффективность и экологическую безопасность производства алюминия. Действительно, инвестиционные планы объединенной компании «РУСАЛ» предусматривают модернизацию и расширение производственных мощностей алюминиевых предприятий Сибири, пуск предприятия мирового уровня – энергометаллургического комплекса – Богучанской ГЭС и алюминиевого завода, строительство Тайшетского и Усть-Илимского заводов.

Для решения задач, стоящих перед алюминиевой отраслью металлургии России, сегодня необходимы современные знания специалистам управляющих компаний, высокий вузовский уровень подготовки персонала, развитие корпоративной системы дополнительного, в том числе дистанционного, образования и переподготовки. Это требует разработки и внедрения инновационных высокоэффективных технологий обучения, создания и использования со-

временных учебно-информационных ресурсов, ориентированных на разные квалификационные уровни производственного персонала.

В связи с этим кафедрой металлургии цветных металлов Сибирского государственного индустриального университета в течение 20 последних лет подготовлено и издано 17 учебных пособий и 3 справочника, охватывающих различные аспекты производства алюминия и ориентированных на подготовку инженеров-металлургов. Для реализации программы прикладного бакалавриата «Технологии материалов (Металлургия)» запланировано издание серии учебных пособий, из которых два – «Производство цветных металлов» (2016 г.), «Оборудование и технология алюминиевого производства» (2017 г.) уже используются в вузовской практике. Настоящее учебное пособие «Технологические и конструктивные измерения и расчеты в производстве алюминия» продолжает эту серию и включает следующие разделы: «Измерение технологических параметров электролиза», «Измерение электрических параметров электролиза», «Расчет основных показателей и параметров электролиза», «Расчет конструктивных параметров электролизера», «Расчет ошиновки электролизеров и серий», «Материальный баланс электролизера», «Электрический баланс электролизера», «Тепловые потери и энергетический баланс электролизера», «Расчет показателей серий», «Вопросы и задачи для самостоятельной работы». Таким образом, учебное пособие знакомит обучающихся с очень важными для управления и контроля электролитическим производством алюминия вопросами измерения технологических и электрических параметров электролиза, выполнения важных для решения задач энерго- и ресурсосбережения технологических и конструкторских расчетов, формирует необходимые профессиональные компетенции.

По структуре, содержанию, объему, научно-технической новизне, оформлению текстовых и графических материалов учебное пособие отвечает всем установленным требованиям и действующим стандартам. Содержание учебного пособия полностью соответствует принятым при написании пособий технологической направленности дидактическим принципам: физико-химические основы – сырье – оборудование – технология – контроль и управление производством – инновации. Учебное пособие также отличается логичностью и ясностью построения, наглядностью. Материалы изложены в доступной для понимания форме. Текст учебного пособия полностью соответствует нормам русского языка и стилю учебных текстов.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов, преподавателей вузов, специализирующихся в области металлургии, а также может быть полезно широкому кругу инженерно-технических работников профильных металлургических предприятий.

* Волокитин Геннадий Георгиевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Н.В. Немчинова*

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет», г. Иркутск

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «ПРИМЕНЕНИЕ
БУРОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА В ПРОЦЕССАХ
МЕТАЛЛИЗАЦИИ И КАРБИДИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ» (АВТОРЫ АНИКИН А.Е.,
ГАЛЕВСКИЙ Г.В. – НОВОКУЗНЕЦК : ИЗД. ЦЕНТР СИБГИУ, 2017. –
156 С.)

В условиях усиливающегося в XXI столетии дефицита традиционных углеродистых восстановителей, в первую очередь, каменноугольного кокса, естественным представляется продолжение проведенных ранее исследований, но уже в направлении организации промышленного производства альтернативных углеродистых восстановителей и определения приоритетных сфер их применения в металлургических, электротермических и других технологиях. В связи с этим целью описанных в монографии исследований явилась разработка научных и технологических основ применения буроугольного полукокса в процессах металлизации и карбидизации оксидсодержащего техногенного сырья.

Работа выполнялась в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации от 2011 г. – «Рациональное природопользование», основными задачами Государственной программы «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы при грантовой поддержке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (НИР № ГР 01201151326).

По своей структуре монография состоит из введения, четырех разделов, заключения.

Во введении обоснована актуальность и сформулированы цель и задачи проведенных исследований, научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены сведения о ее структуре и апробации.

В первом разделе «Твердые углеродистые материалы в современной металлургии: назначение, виды, свойства, основные области применения» проведен анализ научно-технической литературы и изучено современное состояние производства и применения в технологических процессах различного назначения твердых углеродистых материалов и предложена их классификация. На основе критического анализа технической и научной литературы сформулированы требующие решения задачи, обеспечивающие достижение поставленной в работе цели – разработки научных и технологических основ

применения буроугольного полукокса в процессах металлизации и карбидизации оксидсодержащего техногенного сырья.

Во втором разделе «Исследование физико-химических характеристик используемого углеродного и техногенного сырья» приведены результаты исследования физико-химических характеристик используемого углеродистого и оксидсодержащего техногенного сырья: полукокса из бурого угля Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна (БПК), коксовой мелочи АО «Кокс» (КМ), пыли сухого тушения кокса (КП), прокатной окалины, шламов газоочистки кислородно-конвертерного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК», микрокремнезема производств кремния АО «Кремний» (МК-Кр) и ферросилиция марки ФС75 АО «Кузнецкие ферросплавы» (МК-ФС).

В третьем разделе «Разработка научных и технологических основ применения буроугольного полукокса в процессе металлизации» представлены результаты экспериментальных исследований и определения оптимальных параметров брикетирования композиций окалина, шлам - полукокс, коксовые мелочь, пыль с добавлением 10 % водорастворимого связующего – мелассы, изучения характеристик получаемых безобжиговых брикетов, термодинамического моделирования процесса металлизации исследуемого сырья, экспериментальных исследований и определения оптимальных режимов металлизации шихт составов оксидсодержащие компоненты (окалина, шлам) – (буро- и каменноугольный полукокс, коксовые мелочь и пыль), исследования физико-химических характеристик получаемых продуктов, технологического опробования исследуемого процесса, а также техническое предложение по промышленному использованию результатов исследования, включающее технологию производства металлизированных брикетов.

В четвертом разделе «Разработка научных и технологических основ применения буроугольного полукокса в процессе карбидизации» представлены результаты экспериментальных исследований и определения оптимальных параметров брикетирования композиций микрокремнезем – полукокс, коксовые мелочь, пыль с добавлением 10 % водорастворимого связующего – мелассы, изучения характеристик получаемых без-обжиговых брикетов, термодинамического моделирования процесса карбидизации исследуемого сырья, экспериментальных исследований и определения оптимальных режимов карбидизации шихт составов оксидсодержащий компонент (кремнезем) – (буро- и каменноугольный полукокс, коксовые мелочь и пыль, нефтекокс), исследования физико-химических характеристик получаемых продуктов, технологического опробования исследуемого процесса, а также техническое предложение по промышленному использованию результатов исследования, включающее технологию производства безразмольного микропорошка карбида кремния.

Результаты исследования имеют высокую практическую значимость. Так, в условиях ООО «Полимет» проведено технологическое опробование исследуемых процессов и получены из брикетированных шихт окалина – буро-угольный полукокс, микрокремнезем производства кремния – буроуголь-

ный полукокс партии (по 0,5 т) металлизированных брикетов и безразмольного микропорошка карбида кремния с использованием комплекса оборудования на основе камерной электропечи сопротивления. Определены технико-экономические показатели получения безразмольного микропорошка карбида кремния: объем производства 84 т/год на 1 электропечь, удельный расход электроэнергии 1,1 тыс. кВт·ч/т, себестоимость 36000 руб./т. Подтверждена технологическая и экономическая эффективность замены безразмольным микропорошком карбида кремния его абразивного особо тонкого микропорошка и частично алмазного порошка в составе карбидоалмазного наполнителя абразивного инструмента на основе полиэфирной смолы. Экономическая эффективность от замены составляет 68 тыс. руб./кг абразивного наполнителя. Также разработаны технические предложения для ОАО «Амурметалл» и ЗАО «Кремний», включающие технологии производства металлизированных брикетов и безразмольного микропорошка карбида кремния с использованием собственных прокатной окалины, микрокремнезема и полукокса, получаемого из бурых углей месторождений Амурской и Иркутской областей.

Результаты исследований описаны логически грамотно, оформление выполнено на высоком уровне и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к литературе для высших учебных заведений. Текстовый, библиографический и иллюстрационный материал представлен достаточно полно, терминологический аппарат соответствует действующей нормативно-технической документации.

Монография рекомендуется к изданию и может быть полезна для студентов, аспирантов и преподавателей, а также специалистов предприятий химико-металлургического комплекса, специализирующихся в области металлургии и электротермии неорганических материалов.

* Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

В.В. Лавров*

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» АВТОРЫ (М.В. ФИЛИППОВА, В.Н. ПЕРЕТЯТКО, М.В. ТЕМЛЯНЦЕВ. – НОВОСИБИРСК : ИЗДАТЕЛЬСТВО СО РАН, 2016. – 269 С.)

Разработка технологии производства нового изделия методами обработки металлов давлением представляет собой многоплановую задачу, в которой необходимо учитывать конфигурацию изделия, форму и размеры заготовки, марку стали, используемое оборудование, температурно-скоростные условия деформации, напряженно-деформированное состояние металла и др. Задача разработки новой технологии, в принципе, не может иметь единственного решения. Необходимо иметь несколько вариантов, из которых можно выбрать оптимальный. Применение компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов позволяет значительную часть работы по исследованию заполнения металлом калибра (гравюры штампа), анализу напряженно-деформированного состояния металла, энергосиловых условий прокатки, перенести в область численного эксперимента.

В монографии представлены результаты многолетних научных исследований авторского коллектива в области разработки энерго- и ресурсосберегающих технологий безоблойной штамповки осесимметричных поковок и поковок типа тел вращения с боковыми отростками. Материалы охватывают широкий спектр вопросов нагрева металла, включая окалинообразование, исследование прочностных и пластических свойств стали, определение оптимальной температуры нагрева под обработку давлением, моделирование и разработку технологий производства шаровых заготовок посредством прокатки и последующей штамповки изделий из шаровых заготовок. Авторы использовали различные методы и методики исследований: теоретическую проработку научной проблемы, математическое моделирование, физическое натурное моделирование и промышленные эксперименты. Разработки доведены до практической реализации в связи с этим монография имеет ценность не только в научном, но и практическом плане.

Безусловной ценностью и актуальностью материалов представленных в монографии является ориентация на энерго- и ресурсосбережение, фактически металлосбережение и снижение энергоемкости производства. Представленные технологии позволяют повысить конкурентоспособность металлопродукции – повысить качество и значительно снизить затраты на производство.

Монография изложена на 269 страницах печатного текста и состоит из введения, 7 глав и списка литературы по каждой главе.

В первой главе кратко приведены данные по влиянию температуры на сопротивление металла деформации, пластические свойства и процессы окисления при нагреве металла. Отмечена перспективность применения полугорячей штамповки.

Во второй главе приведены экспериментально-математические решения по определению оптимальной температуры нагрева металла перед штамповкой на основе обобщенной функции желательности.

Третья глава посвящена компьютерному моделированию процессов обработки металлов давлением. Современные системы автоматизированного моделирования процессов обработки металлов давлением «QForm», «SuperForge», «DEFORM» и др. получили широкое применение для решения технологических задач процессовковки, штамповки, прокатки и др. Приведен анализ основных программных продуктов для компьютерного моделирования в обработке металлов давлением.

В четвертой и пятой главе приведены результаты компьютерного и физического моделирования напряженно-деформированного состояния металла при полугорячей штамповке поковок круглых в плане и поковок круглых в плане с отостками в закрытых штампах. Отмечено преимущества полугорячей штамповки из шаровой заготовки. Разработаны и внедрены в производство энерго- и ресурсосберегающие технологии штамповки.

В шестой и седьмой главе приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния металла в прокатном производстве.

Результаты проведенных исследований представляют интерес для студентов вузов, аспирантов, научных сотрудников и инженерно-технических работников занимающихся вопросами обработки металлов давлением.

*Лавров Владислав Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

В.В. Дорофеев*

АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ
МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ» АВТОРЫ (М.В. ФИЛИППОВА,
В.Н. ПЕРЕТЯТЬКО, М.В. ТЕМЛЯНЦЕВ. – НОВОСИБИРСК :
ИЗДАТЕЛЬСТВО СО РАН, 2016. – 269 С.)

В процесс разработки новой технологии производства изделий методами обработки металлов давлением необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов, таких как: конфигурация изделия, форма и размеры заготовки, марка стали, используемое оборудование, температурно-скоростные условия деформации, напряженно-деформированное состояние металла и др. Для решения такой сложной многофакторной задачи актуально применение компьютерного моделирования, позволяющего отслеживать заполнение калибра (штампа), изменение напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процесса. Применение виртуальных моделей на предварительном этапе разработки технологии помогает избежать дорогостоящих экспериментов на промышленном оборудовании.

Монография написана по результатам научно-исследовательских работ, выполненных авторским коллективом, и состоит из семи глав, объединенных разработкой и исследованием новых технологических процессов в области обработки металлов давлением. В каждой главе приведена разработка виртуального объекта моделирования, результаты моделирования напряженно-деформированного состояния металла, энергосиловых параметров и качества готового изделия. Большое достоинство работы заключается в том, что результаты исследований внедрены в производство.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана и внедрена новая технология безоблойной полугорячей штамповки точных поковок высокого качества типа «шестерня» из шаровой заготовки. (Глава 4). В главе 5 разработана и внедрена новая технология полугорячего выдавливания прецизионных поковок типа «крестовина» в закрытых штампах из шаровой заготовки при двухстороннем приложении силы.

В главе 6 приведены теоретические и экспериментальные данные по разработке новой технологии прокатки шаров большого диаметра. Компьютерное моделирование прокатки шаровой заготовки показало, что все компоненты тензора напряжений в деформируемом металле сжимающее, что гарантирует отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Шары, прокатанные по предложенной калибровке, отличаются высокой точностью по массе, хо-

рошим качеством поверхности, отсутствием трещин и рыхлостей внутри шара.

В 7 главе приведены теоретические и экспериментальные данные по совершенствованию технологического процесса «прокатки-разделения». С использованием компьютерного моделирования рассмотрены вопросы разделения металла в сдвоенных круглых и сдвоенных квадратных калибрах. Показана эффективность разделения металла отдельными роликами.

Работа предназначена для инженерно-технических и научных работников металлургического производства по специальности «Обработка металлов давлением». Она может быть использована в качестве учебного пособия студентами, магистрами и аспирантами при изучении курса «Моделирование процессов и объектов в металлургии», «Теория процессов обработки металлов давлением», «Технология сортовой прокатки», «Технология кузнечно-штамповочного производства».

* Дорофеев Владимир Викторович, доктор технических наук, главный калибровщик рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Ф.И. Иванов*

НФИ КемГУ, г. Новокузнецк

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ», АВТОРОВ В.Е. ГРОМОВА, С.В. КОНОВАЛОВА, К.В. АКСЕНОВОЙ, Т.Ю. КОБЗАРЕВОЙ

В последние десятилетия наибольшую актуальность получили исследования, посвященные улучшению существующих и созданию новых свойств материалов, главным образом методом синтеза покрытий или модификации поверхности путем высокоэнергетических воздействий. К наиболее перспективным способом модификации поверхностного слоя широкого класса материалов следует отнести применение электровзрывного легирования и импульсных электронных пучков сравнительно большой длительности воздействия (сотни микросекунд). Главным преимуществом этих способов является возможность в формировании модифицированных слоев толщиной до 0,1 мм, имеющих дисперсную гомогенную структуру, в течение непродолжительного воздействия. В плане практического применения поиск возможностей модификации структуры поверхностного слоя алюминиевых и титановых сплавов, широко используемых в ведущих отраслях отечественной промышленности, с целью повышения их усталостного ресурса является актуальной задачей.

Рецензируемая работа условно может быть разделена на две части, первая из которых посвящена изучению особенностей формирования модифицированного поверхностного слоя алюминий-кремниевых сплавов АК12, подвергнутого электронно-пучковой обработке и многоциклового усталостному нагружению до разрушения. Для решения этой задачи авторы профессионально используют современные методы исследования, включающие оптическую металлографию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, рентгеновскую дифрактометрию, Оже-электронную спектроскопию и другие методы сбора научной информации, что позволило комплексно и всесторонне изучить и выявить закономерности структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях силумина после обработок электронными пучками. Во второй части монографии авторами представлены обширные экспериментальные исследования, позволившие изучить процессы формирования строения, структурно-фазовых состояний и свойств поверхностной зоны электровзрывного легирования титанового сплава ВТ6 с последующей электронно-пучковой обработкой.

Кроме несомненной научной ценности, результаты монографии представляют несомненную практическую ценность, позволяя установить и обосновать оптимальные технологические схемы поверхностного упрочнения ти-

тановых и алюминиевых сплавов. Эти результаты хорошо представлены в профильной научной периодике.

Появление этой монографии является своевременным, поскольку авторы работают в Сибирском государственном индустриальном университете, где с 2013 года открыта новая специализация «Нanomатериалы и нанотехнологии», студентам и аспирантам которой и предназначено это издание. Монография написана грамотным языком, легко читается. В библиографическом списке содержится полная информация о последних работах российских и зарубежных авторов по тематике монографии.

* Иванов Федор Иванович, д.х.н., профессор кафедры техносферной безопасности, Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»

А.В. Маркидонов*

НФ КузГТУ, г. Новокузнецк

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ», АВТОРОВ В.Е. ГРОМОВА, С.В. КОНОВАЛОВА, К.В. АКСЕНОВОЙ, Т.Ю. КОБЗАРЕВОЙ

В настоящее время легкие сплавы на основе алюминия и титана находят все большее применение в различных отраслях промышленности при изготовлении деталей ответственного назначения, работающих в условиях циклических нагрузок (сплавы алюминия и кремния) и интенсивного износа (титановые сплавы). Низкая прочность силуминов и высокая износостойкость титановых сплавов сужают область их применения. Поэтому необходима разработка новых технологий упрочнения данных сплавов. Одними из таких способов являются электронно-пучковая обработка и воздействие гетерогенными плазменными потоками, созданными электрическим взрывом проводников. Однако без знаний закономерностей формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры титановых и алюминиевых сплавов при этих видах энергетических воздействий, решение задачи создания и внедрения технологий комбинированной обработки затруднительно. В этой связи исследования, проведенные в рецензируемой работе, являются актуальными.

Авторами на различных структурно-масштабных уровнях установлено, что электронно-пучковая обработка силумина в различных режимах позволяет увеличить усталостную долговечность до 3,5 раз. Выявлены и подвергнуты анализу основные факторы и механизмы, определяющие усталостную долговечность в исходном состоянии и после обработки низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком. Установлено, что увеличение усталостной долговечности силумина, подвергнутого предварительной электронно-пучковой обработки, обусловлено формированием мультимодальной многофазной субмикро- и наноразмерной структуры приповерхностного слоя. Для титановых сплавов установлено, что воздействие гетерогенных плазменных потоков с порошковыми навесками диборида титана, карбида бора и карбида кремния поверхности титанового сплава ВТ6 приводит к формированию зоны упрочнения с высокоразвитым рельефом толщиной до 50 мкм, неоднородного по толщине, элементному составу и структурно-фазовому состоянию. Обработка электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 50, 60 Дж/см² зоны легирования приводит к уменьшению шероховатости поверхности и более однородному распределению легирующих элементов. Толщина зоны упрочнения возрастает до 60 мкм. Ценными результатами, с точки зре-

ния физики конденсированного состояния, являются результаты рентгеноспектрального анализа. Они позволили выявить распределение легирующих элементов по глубине. На основании этого можно сделать вывод, что основным механизмом массопереноса является бездиффузионный.

Полученные результаты имеют высокую научную ценность, так как они позволяют углубить знания о физических процессах формирования структурно-фазовых состояний при внешних энергетических воздействиях.

Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой решенных задач, использованием современных средств металлографического анализа материалов, соответствием полученных результатов современным представлениям о природе процессов, происходящих при облучении металлов и сплавов низкоэнергетическими высокоточными электронными пучками и при воздействии гетерогенных плазменных потоков.

Исходя из вышеизложенного, следует заключить, что появление монографии, в которой содержится обобщение результатов исследования воздействия плазмы электрического взрыва проводников и низкоэнергетических высокоточных пучков на легкие сплавы, является своевременным. Она будет полезна как специалистам производства, так и научным работникам, аспирантам и студентам соответствующих направлений подготовки.

* Маркидонов Артем Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, Филиал ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в г. Новокузнецке

А.Н. Смирнов*

ООО «Кузбасский региональный инженерный консультационный центр», г. Кемерово

РЕЦЕНЗИЯ НА СЕРИЮ МОНОГРАФИЙ ИЗ ДВУХ КНИГ «ВОДОРОД И ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ Al - 1÷50% Si» И «МЕТАЛЛОГРАФИЯ ЧУГУНА» АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА ПОД РУКОВОДСТВОМ ПРОФЕССОРА В.К. АФАНАСЬЕВА

В 2016 году издательством Политехнического университета, г. Санкт-Петербург, опубликованы две монографии под научной редакцией проф. В.К. Афанасьева: «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» и «Металлография чугуна». Обе книги представляют колоссальный интерес для специалистов, занимающихся созданием и эксплуатацией металлических материалов.

В настоящих монографиях затронут ряд вопросов той степени новизны, которая до сих пор неохотно признается, частично или полностью игнорируется в современных изданиях.

Издание выделяется глубиной проработки материала, четкостью и простотой изложения сложнейших научных вопросов. Указывается взаимосвязь процессов и явлений, относящихся к, казалось бы, совершенно не соприкасающимся областям знаний: приведены достижения современной геологии, химии, океанологии и других естественных наук, а под ними – философская платформа, наиболее подробно описанная в статьях профессора В.К. Афанасьева как «Водородная платформа периодической системы химических элементов». Связующим звеном в ней указывается HCNO – общность, формирующая структуру и свойства всех материалов.

Большое внимание уделяется практическому использованию полученных результатов в сфере металлургии, машиностроения и других областей, где есть жесткая потребность в материалах с регламентируемыми свойствами для ответственных деталей и узлов.

В качестве одного из результатов практического применения предлагаемых положений, изложенных в «Металлографии чугуна», приведены сведения о белом нелегированном чугуне как новом материале многоцелевого назначения.

Монография «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» будет особенно полезна специалистам, задействованным в приборостроении, авиационной и ракетно-космической отраслях.

*Смирнов Александр Николаевич, д.т.н., профессор, Генеральный директор ООО «Кузбасский региональный инженерный консультационный центр»

В.А. Москинов*

г. Кемерово

РЕЦЕНЗИЯ НА СЕРИЮ МОНОГРАФИЙ ИЗ ДВУХ КНИГ «ВОДОРОД И ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ AL - 1÷50% SI» И «МЕТАЛЛОГРАФИЯ ЧУГУНА» АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА ПОД РУКОВОДСТВОМ ПРОФЕССОРА В.К. АФАНАСЬЕВА

Публикацию монографий под научной редакцией проф. В.К. Афанасьева можно считать событием в мире знаний о материи и важнейшей для практических действий ее составляющей – металлах.

Монографии включают в себя наиболее значимые сведения о сплавах системы Fe – Fe₃C и Al – Si, имеющих в вооружении человека в настоящий момент, обсуждаются итоги и перспективы металлургии, предлагается оригинальный вариант диаграмм фазового равновесия, построенных с позиций водородного материаловедения.

В монографии «Металлография чугуна» особый интерес представляет седьмая глава, где впервые предлагается учесть философские аспекты формирования микроструктуры и введены представления о «темном» и «светлом» в структуре металлов и сплавов.

Особо следует отметить, что чугун с ледебуритной структурой создан проф. В.К. Афанасьевым из доменного без применения легирования, что имеет практическую значимость и новизну мирового уровня.

В работе «Водород и деформируемые сплавы Al - 1÷50% Si» предложен новый взгляд на формирование свойств алюминиевых сплавов, который базируется на представлениях о ведущей роли водорода в формировании всех физических, химических и механических свойств, а также технологических и служебных.

В качестве одного из результатов практического применения положений водородного материаловедения представлен поршень тяжело нагруженного двигателя, изготовленный в условиях Ступинского металлургического комбината из сплава на основе Al – 20 % Si.

Даны рекомендации по разработке новых деформируемых Al – Si сплавов, содержащих в качестве основных компонентов, наряду с водородом, фосфор и фтор.

Подробно рассмотрен вопрос разработки легких сплавов с малым тепловым расширением для нужд приборостроения и ракетно-космической отрасли.

Чугуны и алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния в прочно занимают одно из важнейших мест в современной технике. Однако их

использование неполно, что связано с высокой хрупкостью, исключающей возможность применения деформации.

Отсюда вытекает целый ряд задач для создания технологий обработки расплава, кристаллизации и термической обработки. Именно решением этих задач успешно занимаются авторы.

Новизна представлений, богатейший фактический материал, оригинальность изложения и прекрасные иллюстрации металлографического исследования делают настоящие монографии несомненно полезной в работе и обучении для исследователей и специалистов.

* Москинов Виталий Алексеевич, д.т.н., профессор, Лауреат Государственной премии

Е.П. Волынкина*

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

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ Л.Б. ПАВЛОВИЧ,
А.В. САЛТАНОВА, Н.Ю. СОЛОВЬЕВОЙ «УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ
В КОКСОХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ»

Работа, выполненная авторами, посвящена созданию научных основ комплексного использования природного и технологического сырья - утилизации, и квалифицированного использования техногенных и бытовых углеродсодержащих отходов – экологически опасных и одновременно обладающих высоким энергохимическим потенциалом в коксохимической отрасли промышленности. Работа актуальна, имеет научную новизну и практическую ценность.

Из всех существующих технологических приемов утилизации отработанных ресурсно-технических изделий, полимеров, бытовых отходов, углеродсодержащих отходов КХП. отходов (сжигание, гидрогенизация, биохимическое разложение, пиролиз и т.п.) авторами выбран пиролиз, существующей технологии коксования, как наиболее перспективный и квалифицированный, при осуществлении которого в полной мере решается задача ресурсосбережения: процесс не требует расхода кислорода, позволяет использовать высокий энергохимический потенциал отходов. Для осуществления пиролиза предложена наиболее отработанная к настоящему времени коксохимическая технология, позволяющая осуществить рациональный и экологически безопасный способ переработки большинства углеродсодержащих отходов в смеси с углем и неутилизованными отходами КХП.

Научная новизна работы заключается в изучении физико-химических свойств отходов: коксохимического производства, резинотехнических изделий, полимерных бытовых отходов, металлургических шламов и определены пути их утилизации.

Изучены: физико-химические закономерности совместного пиролиза угольной шихты и отработанных резино-технических изделий, полимерных отходов, отходов коксохимического производства в шихте на коксование с целью повышения выхода и качества кокса, закономерности процессов получения порошковых полимерных красок, покрытий и разработаны рецептуры: технологии производства красок на базе промышленных и бытовых отходов из полиэтилентерефталата; технология производства алкидных лаков и грунтовочных составов на базе кубовых остатков производства фталевого ангидрида. Изучены практические аспекты и разработана простая и экологически безопасная технология синтеза металлофталоцианиновых пигментов и ката-

лизаторов. Разработана технология синтеза фталонитрила методом нитрирования на базе отходов производства фталевого ангидрида с утилизацией отходящих газов синтеза в цикле улавливания и переработки химических продуктов коксования.

Практическая значимость представленной работы заключается в создании рециклинга материалов – эффективной, экологически безопасной технологии утилизации шламов обогащения углей, кубовых остатков производств фталевого ангидрида, вязкотекучих химических отходов с отработанными резино-техническими изделиями или бытовыми полимерными отходами, в обосновании возможности переработки в металлургических агрегатах твердых бытовых отходов.

В промышленных условиях отработана технология утилизации отходов коксохимии в строительстве автомобильных дорог. Практическое значение монографии экспериментально обоснованы и освоены в опытно-промышленных условиях технологии получения новых ценных продуктов: модификаторов асфальтобетонных смесей, дорожных вяжущих материалов.

Разработанная схема рециклинга углеродсодержащих отходов соответствует основным критериям «устойчивого развития» и позволяет решить ряд экологических, экономических и социальных проблем.

Достоверность основных результатов и выводов монографии не вызывает сомнений, обеспечена использованием надежных аналитических методик представительными испытаниями получаемых продуктов подтверждена опытно-промышленными испытаниями и внедрением на ОАО «ЗСМК», ОАО «КМК», АО «Универсал». Работа, выполненная авторами, имеет хорошие перспективы для реализации и на других коксохимических производствах Кузбасса и России.

Представленная монография имеет научную новизну и широкую область читательских интересов, доступное популярное изложение различных аспектов проблемы утилизации отходов коксохимического производства, резино-технических и полимерных отходов. Монография может быть полезной инженерно-техническим работникам промышленных предприятий, научным работникам, занимающимся вопросами охраны окружающей среды.

*Волынкина Екатерина Петровна, д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии черных металлов, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

УДК 711.4

Б.И. Ермаченко*

г. Новокузнецк

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «НОВОКУЗНЕЦК. ИСТОРИЯ
СОЗДАНИЯ ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ГОРОДА». АВТОР: В.И.
МАГЕЛЬ – ЗАСЛУЖЕННЫЙ АРХИТЕКТОР РФ, ПРОФЕССОР
КАФЕДРЫ АРХИТЕКТУРЫ СИБГИУ

Написанная автором монография «Новокузнецк. История создания генерального плана города» является интересной и полезной работой по изучению и сохранению фактов и деталей проектов генерального плана города Новокузнецка и служит удовлетворению многосторонних интересов к его истории. Она состоит из предисловия, семи глав, библиографического списка и заключения, отражающих в хронологической последовательности основные этапы в истории создания генерального плана города.

История градостроительства города Новокузнецка охватывает весь период его развития, начиная со строительства Кузнецкого металлургического завода и до наших дней. Это позволяет читателю лучше понять и оценить взаимосвязь отдельных проектов и периодов в истории города, региона и страны между собой и их влияния друг на друга.

Большое количество иллюстративного материала, включающего архивные чертежи, фотографии, макеты, позволяет читателю включиться в процесс исторического развития от относительно небольшого рабочего поселка до современного крупного города.

Автор прослеживает формирование города на протяжении всего периода его существования, следуя за постепенно складывающейся структурой районов, улиц, площадей.

Очень интересны описания строительства отдельных зданий и сооружений, являющихся знаковыми как в городской структуре, так и в их значимости для жителей города: кинотеатр «Коммунар», Театр Металлургов, драматический театр, университет, отдельные жилые здания. Эти объекты, построенные по индивидуальным проектам, сформировали общий облик города.

Хочу отметить, что текст не перегружен профессиональными терминами, легко читается и может быть интересен и понятен не только специалистам, но и читателям, интересующимся историей города и области. Он сопровождается большим количеством документальных проектных материалов и построек и авторским анализом градостроительных ситуаций, складывавшихся на различных этапах создания генерального плана города Новокузнецка.

Интересны высказанные автором мнение по наиболее важным, на сегодняшний день задачам градостроительного развития Новокузнецка, и предложения по их решению в соответствии с потребностями и финансовыми

возможностями города. Это позволяет рекомендовать автору при дальнейшей работе над рассматриваемой темой расширить рамки этой главы и дополнить её аналитическими материалами по планировке и застройке Новокузнецка, осуществляемыми на современном этапе.

В рецензии хочу высказать особую признательность В.И. Магелю за подготовленную работу и СибГИУ за издание монографии. Публикация рассматриваемой работы полезна не только студентам архитектурно-строительного института СибГИУ, изучающим историю градостроительства Новокузнецка, но и самому широкому кругу читателей. Монография позволит им познакомиться с особенностями истории градостроительного развития крупнейшего промышленного и исторического города Кемеровской области.

Будучи уроженцем города Новокузнецка, его жителем, архитектором, работавшим над его развитием и становлением, хочу особо отметить актуальность научно-исследовательской работы и издания в преддверии 400-летия города Новокузнецка. В связи с этим хотелось бы увеличить тираж издания и улучшить качество печати.

* Ермаченко Борис Иванович, Заслуженный архитектор РФ

УДК 711.4

Г.И. Стороженко*

ООО «Баскей», г. Новосибирск

РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «НОВОКУЗНЕЦК. ИСТОРИЯ
СОЗДАНИЯ ГЕНЕРАЛЬНОГО ПЛАНА ГОРОДА». АВТОР: В.И.
МАГЕЛЬ

Монография изложена на 386 страницах, включает авторское предисловие, семь глав, заключение и библиографический список.

Актуальность работы обусловлена не только преддверием 400-летнего юбилея города Новокузнецка, но и тем, что за последнее столетие небольшой рабочий поселок Кузнецк вырос до крупного современного города со сложившейся градостроительной структурой, крупнейшей промышленной базой, культурными традициями и своеобразным архитектурным обликом. В связи с этим данная работа представляет несомненный интерес не только для новокузнецчан, но и для значительного количества жителей страны, помнящих Кузнецкстрой и стихи В.В. Маяковского, посвященные будущему «городу-саду» и людям Кузнецка.

Рассматриваемая работа охватывает весь период строительства города – от первых замыслов создания металлургического комбината в Кузбассе – предистории Новокузнецка – до современного этапа его развития.

Достаточно интересным является тот факт, что Новокузнецк – один из немногих российских городов, построенных по генеральному плану. Динамика развития генеральных планов города, их «перетекание» из одного в другой позволило построить красивый современный город в достаточно неблагоприятных природно-климатических и техногенных условиях. В книге подробно представлены все генеральные планы застройки города с начала XX века до сегодняшнего дня. Автор увязал их в единый непрерывный процесс градостроительного развития города Новокузнецка.

Практически впервые история города Новокузнецка изложена в одном сочинении, при этом рассмотрена история градостроительного развития самого города в точной хронологической последовательности (прежние публикации в основном рассматривали этапы строительства и развития Кузнецкого металлургического завода). Автор прослеживает формирование структуры каждого района, основных магистральных улиц, центральных площадей города.

Книга позволяет удовлетворить профессионального интерес к истории города и в части строительства отдельных зданий. Развитие города невозможно без создания общественных центров, каковыми становились многие

культурно-просветительские и образовательные учреждения. Здания «первого звукового» кинотеатра «Коммунар», первого в области высшего учебного заведения – Сибирского института черной металлургии (СИЧМ, СМИ, СибГГ-МА и в настоящее время СибГИУ – Сибирский государственный индустриальный университет), Дворец культуры Металлургов, почтамт и другие подобные здания сформировали облик города.

Огромное количество иллюстраций, выполненных с оригинальных архивных документов, графических материалов проектов, фотографий макетов и натурных фото позволяют наглядно увидеть детали рассматриваемых вопросов, особенности и динамику градостроительного и территориального развития города, его отдельных территорий и архитектурных объектов.

Хотелось бы рекомендовать автору продолжить работу над историей градостроительства города Новокузнецка, расширить рамки исследований и дополнить их еще большими подробностями и количеством иллюстраций.

Монография, являясь научно-исследовательским изданием, отличается точностью изложения исторических фактов, хорошим языком, позволяющим легко воспринимать профессиональное изложение материала, который несомненно интересен и понятен широкому кругу читателей. Книга будет полезна не только студентам архитектурно-строительного института СибГИУ при изучении профессионально ориентированных дисциплин, но и будет интересна всем, кого интересуют вопросы истории и развития города Новокузнецка.

*Стороженко Геннадий Иванович, д.т.н., доцент, директор ООО «Баскей», г. Новосибирск

УДК 662.62

А.А. Бабенко*

Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ «ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА» АВТОРЫ ШКОЛЛЕР М.Б., ПРОТОПОПОВ Е.В., ЮРЬЕВ А.Б.

Работа посвящена описанию современного состояния некоторых процессов энерготехнологии – новой дисциплины, находящейся на стыке энергетики, технологии переработки горючих ископаемых, науки о горении и теплотехники.

Учебное пособие содержит 247 страниц текста, состоит из 8 глав, содержит более семи десятков рисунков и более 70 страниц.

В первой главе учебного пособия даны современные представления и структуре и генезисе образования различных видов твердых горючих ископаемых, а также сведения о химической природе и свойствах исходных веществ – углеобразователей.

Во второй главе рассмотрены показатели углей: петрографическая характеристика углей, физико-химические и технические показатели свойств твердых горючих ископаемых. Описаны современные методы определения и принципы классификации различных видов твердых горючих ископаемых. Также, в работе рассмотрено современное состояние ресурсов и потребление твердых горючих ископаемых, как в России, так и за рубежом.

В третьей главе детально рассмотрена деструкция топлив различной стадии метаморфизма, как в восстановительной, так и в окислительной атмосфере реактора. Представлен анализ зависимости выхода и качества продуктов твердых, жидких и газообразных продуктов пиролиза от различных технологических факторов.

В четвертой главе рассмотрены вопросы подготовки угольного сырья к глубокой переработке.

В пятой, шестой и седьмой главах уделено внимание технологическим подходам к организации энерготехнологических процессов на основе газификации, коксования и полуккоксования.

Достоинством работы является технологические расчеты, связанные с парокислородной газификацией каменного угля в доменных печах и термохимическим окускованием мелкодисперсных продуктов.

В восьмой главе учебного пособия даны сведения о принципах создания безотходных технологий переработки твердых топлив и рассмотрена экологическая характеристика наиболее перспективных направлений развития коксохимической технологии.

Учебное пособие представляет широкий интерес не только у обучающихся, но у научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами переработки твердых горючих ископаемых.

* Бабенко Анатолий Алексеевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов Института металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург



К 65-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ И 40-ЛЕТИЮ НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГАЛЕВСКОГО ГЕННАДИЯ ВЛАДИСЛАВОВИЧА

4 марта 2017 г. исполнилось 65 лет со дня рождения и 40 лет научной и педагогической деятельности известного ученого в области металлургии и химической технологии, Заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора Геннадия Владиславовича Галевского.

Галевский Геннадий Владиславович родился в г. Барабинске Новосибирской области. В 1974 г. окончил Сибирский металлургический институт по специальности «Металлургия черных металлов», в 1977 г. – аспиран-

туру при Институте физико-химических основ переработки минерального сырья СО АН СССР. В 1979 г. ему присуждена ученая степень кандидата технических наук по специальности 05.17.11 «Технология силикатных и тугоплавких неорганических материалов», в 1991 г. – доктора технических наук по специальности 05.17.01 «Технология неорганических веществ». Имеет ученое звание профессора (1991 г.).

Вся трудовая и научная деятельность Геннадия Владиславовича, начиная с 1977 г. связана с Сибирским государственным индустриальным университетом (СибГИУ, ранее СМи, СибГГМА): доцент, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии (с 1991 г. до сегодняшнего дня), проректор по учебной работе (1993 – 2008 гг.), директор Института металлургии и материаловедения (с 2013 г. по настоящее время).

При непосредственном участии профессора Галевского Г.В. разработана и реализована комплексная программа превращения узкопрофильного металлургического института сначала в Сибирскую горно-металлургическую академию (1995 г.), а затем – в Сибирский государственный индустриальный университет (1998 г.) с развитой инфраструктурой, современными образовательными и научными платформами, высокоэффективными системами менеджмента качества подготовки специалистов и содействия их трудоустройству.

За многолетнюю плодотворную педагогическую и административную деятельность и большой личный вклад в подготовку специалистов с высшим

образованием в 2000 г. Галевскому Г.В. присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации».

Под руководством профессора Галевского Г.В. сформировалась и в течение 35-ти лет успешно функционирует научная школа «Создание и применение наноматериалов в металлургии, химической технологии и машиностроении», в рамках которой решены такие крупные научные и прикладные задачи, как освоение плазмотермических технологий производства многофункциональных наноматериалов для композиционного материаловедения; создание научных основ проектирования и конструирования необходимого плазмотермического оборудования; введение в обращение обширной по номенклатуре группы наноматериалов в отечественной металлургической практике. Научно-технологические разработки защищены 30 патентами и удостоены золотой, серебряной и бронзовой медалей ВДНХ и ВВЦ. За заслуги в разработке приоритетного направления науки и техники, создании научной школы, воспитании и подготовке научных кадров в 1999 г. профессору Г.В. Галевскому присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», а в 2004 г. за высокие достижения в развитии экономического и научного потенциала России он награжден орденом Дружбы и нагрудным знаком «Почетный металлург Российской Федерации», ему присвоено звание «Лауреат премии Кузбасса». В 1996 г. Отделение металлургии Российской академии естественных наук избирает его своим академиком.

В творческом наследии профессора Г.В. Галевского – более 950 трудов, в том числе 25 монографий и научно-справочных изданий, 650 опубликованных научных статей, 35 учебников, 55 сборников научных трудов, 145 учебно-методических работ, 40 патентов и свидетельств. Он награжден орденом «За заслуги в науке о металлах», учрежденным отечественным лидером металлургического образования и науки – Московским институтом стали и сплавов (НИТУ).

Коллеги и ученики сердечно поздравляют профессора Галевского Геннадия Владиславовича с 65-летием. Здоровья, долгих лет жизни, творческих успехов!



К 65-ЛЕТИЮ АНДРЕЯ РОСТИСЛАВОВИЧА ФАСТЫКОВСКОГО

26 апреля 2017 исполнилось 65 лет профессору, заведующему кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», почетному работнику высшего профессионального образования РФ Андрею Ростиславовичу Фастыковскому.

После окончания Сибирского металлургического института в 1974 году, получив специальность инженера по обработке металлов давлением, А.Р. Фастыковский активно занимался научной и педагогической деятельностью. Прошел путь от инженера-исследователя до доктора технических наук, заведующего выпускающей кафедры.

А.Р. Фастыковский – известный специалист в области обработки металлов давлением. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные им, дали возможность заложить научные основы практического применения совмещенных методов обработки металлов давлением, с использованием которых разработаны новые технические и технологические решения, внедренные на металлургических предприятиях с большим экономическим эффектом.

А.Р. Фастыковский – автор более 200 научных и учебных работ, в их числе монография, пять учебных пособий, рекомендованных министерством образования для преподавания в вузах страны, 17 авторских свидетельств и патентов. Высокий уровень учебных пособий подтвержден многочисленными дипломами авторитетных выставок и золотой медалью Парижской книжной выставки. За достижения в научной области он избран член-корреспондентом Российской академии естествознания (РАЕ).

А.Р. Фастыковский обладает большим опытом педагогической деятельности, которую он начал в 1980 г. он постоянно совершенствует свое мастерство, используя передовые методы преподавания. Его знания и опыт по достоинству оценены коллегами. Он является членом двух диссертационных советов.

За многолетний добросовестный труд по подготовке специалистов высокой квалификации А.Р. Фастыковский удостоен звания «Почетный работ-

ник высшего профессионального образования РФ», награжден орденом «LABORE ET SCIENTIA» (ТРУДОМ И ЗНАНИЕМ), медалями «Ветеран труда России», «70 лет Кемеровской области», «А. Нобеля». Заслуги А.Р. Фастыковского высоко оценены администрацией области: он награждался дипломами, почетными грамотами и денежными премиями.

Профессионал высокого уровня, доброжелательный, подтянутый и собранный А.Р. Фастыковский пользуется заслуженным уважением и авторитетом у коллег и студентов.

Коллектив университета поздравляет Андрея Ростиславовича с юбилеем, желает ему творческих успехов, энергии и здоровья.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Сборник научных трудов «Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» подготавливается к печати Сибирским государственным индустриальным университетом совместно с отделением металлургии горно-металлургической секции РАЕН.

В сборник могут быть представлены работы по направлениям:

- металлургия черных и цветных металлов и сплавов;
- порошковая металлургия, композиционные материалы и покрытия;
- физика металлов и металловедение;
- экономика, управление и экология на предприятиях;
- проблемы высшего образования;
- отклики, рецензии и биографии.

Рукописи статей, оформленные в соответствии с нижеизложенными требованиями, направляются в Сибирский государственный индустриальный университет.

К рукописи прилагаются:

- разрешение ректора или проректора вуза на опубликование результатов работ;
- рекомендация соответствующей кафедры высшего учебного заведения или научного семинара академических институтов или отраслевых НИИ;
- рецензия, подготовленная специалистом, имеющим ученую степень, заверенная по месту работы рецензента,
- акт экспертизы, подтверждающей возможность опубликования работы в открытой печати;
- сведения об авторах (Ф.И.О. полностью, уч. степень, звание, вуз, служебный и домашний адрес, телефон).

Рукописи направляются в редакцию в одном экземпляре. Текст рукописи должен быть отпечатан на одной стороне стандартного листа белой бумаги формата А4 с полями 25 мм с каждой стороны. Объем статьи (включая аннотацию, иллюстрации, таблицы, библиографический список) не должен превышать 6-8 страниц машинописного текста, напечатанного через 1,5 интервала, размер шрифта 14 пт. Последнюю страницу рекомендуется занимать полностью.

Текст аннотации на русском и английском языке объемом порядка 1/4 страницы печатается через 1 интервал и помещается после заглавия статьи. Текст аннотации должен содержать только краткое описание публикуемого материала.

Иллюстрации представляются в одном экземпляре; они должны быть выполнены тушью на белой бумаге или кальке и скомпонованы на одном или двух стандартных листах формата А4 (с полным их заполнением). Размер иллюстрации (иллюстраций) вместе с наименованием, поясняющей надписью и номером не должен превышать 250×170 мм. Страницы, занятые иллюстрациями, включают в общую нумерацию страниц.

Цифровой материал оформляется в виде таблиц, имеющих заголовки и размещаемых в тексте по мере упоминания. Не рекомендуется делить головки таблиц по диагонали и включать графу «№ п/п».

Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-84: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, название статьи, полное название журнала, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборника – фамилии и инициалы авторов, название статьи, название сборника, место издания, издательство, год издания, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, библиографическом списке фамилии авторов, название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

В начале статьи указывается индекс УДК (ББК). Название организации приводится полностью и размещается после фамилии авторов. Первая страница рукописи подписывается внизу всеми авторами статьи. Число авторов не должно превышать пяти; количество публикаций одного автора – не более двух в одном выпуске.

Для создания современного облика настоящего сборника, улучшения качества печати предусмотрен компьютерный набор. Поэтому, наряду с вышеуказанными документами и отпечатанными на бумаге статьями, в адрес редколлегии необходимо выслать дискету с текстом статьи, включая таблицы и 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 «Научные издания».

Срок представления материалов для следующего выпуска «Вестника горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии» – до 30 ноября 2017 г. Статьи направлять главному редактору по адресу: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, г. Новокузнецк, Кемеровской обл., ул. Кирова, 42.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.
Отделение металлургии**

Сборник научных трудов

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 22.09.2017 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 13,5 Уч.-изд.л. 14,4 Тираж 300 экз. Заказ № 447

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ