

Научный журнал

# ВЕСТНИК

Сибирского  
государственного  
индустриального  
университета

№ 3 (9), 2014

Основан в 2012 году  
Выходит 4 раза в год

## Учредитель:

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

## Редакционная коллегия

Е.В. Протопопов  
(главный редактор)

М.В. Темлянецв  
(зам. главного редактора)

С.В. Коновалов  
(отв. секретарь)

П.П. Баранов  
Е.П. Волынкина  
Т.П. Воскресенская  
Г.В. Галевский  
В.Ф. Горюшкин  
В.Е. Громов  
Л.Т. Дворников  
С.М. Кулаков  
С.И. Павленко  
Т.В. Петрова  
Л.Б. Подгорных  
Е.В. Пугачев  
В.Ф. Соколова  
А.К. Соловьев  
А.В. Феоктистов  
В.Н. Фрянов  
В.П. Цымбал

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Коротков С.Г., Волынкина Е.П., Темлянецв М.В., Галевский Г.В.** Кафедра теплоэнергетики и экологии СибГИУ – 80 лет ...3
- Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В.** Исследование и оптимизация технологии производства рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката и технико-экономических показателей его производства .....11
- Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянецв М.В., Атконова О.П., Юнусов А.М., Сюсюкин А.Ю.** Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов .....17
- Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Голик А.А., Пономарева И.А., Арисова В.Н.** Исследование с помощью компьютерного моделирования контактного упрочнения алюминиевой прослойки при растяжении магниево-алюминиевых композитов .....23
- Павловец В.М.** Принципы структурообразования за счет расширения функциональных возможностей технологии получения окатышей .....28
- Соловьев А.К., Пуликов П.С., Михеев В.О.** Очистка дымовых газов от оксидов серы .....33
- Вострецов Г.Н., Бич Т.А., Башенко Л.П.** Порошковая проволока для плазменной наплавки прокатных валков в среде азота.....36
- Сюсюкин А.Ю.** Потери металла с окалиной после реконструкции печи с шагающими балками .....41

### ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Стерлигов В.В., Плюснина Е.А.** Условия стагнации воздушного слоя для теплоизоляции.....44

### ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Применение нанокарбонитрида хрома в композиционных гальванических покрытиях на основе никеля .....48
- Аникин А.Е., Галевский Г.В.** Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна: производство, свойства, применение.....52

### ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Водолеев А.С., Черданцева Е.С., Куренский И.А.** Опыт использования осадков сточных вод для проведения биологической рекультивации шламохранилища ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»..60
- Волынкина Е.П., Домнин К.И.** Математическая модель для прогнозных расчетов образования и извлечения свалочного газа на закрытых свалках ТБО .....62
- Ливенец В.И.** Получаемые из тонкодисперсных углеродистых материалов и других отходов брикеты и гранулы для технологических целей .....71
- Павлович Л.Б., Краутер А.А.** Каталитическая очистка выбросов участка кристаллизации нафталиновой фракции .....73

## ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Козлов В.П., Жигadlo И.Ю.** Проблемы формирования модифицированного мнения аудитора в современных условиях ....76

## ОБРАЗОВАНИЕ И ПЕДАГОГИКА

**Михайличенко Т.А., Стерлигов В.В.** Опыт организации методической работы студентов на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ .....84

**Рефераты** .....87  
**К сведению авторов** .....95

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

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

### Адрес редакции:

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

### Адрес издателя:

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

### Адрес типографии:

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

### Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Подписано в печать  
30.09.2014 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 5,4.

Уч.-изд.л. 6,0.

Тираж 300 экз.

Заказ № 581.

Цена свободная.

*С.Г. Коротков, Е.П. Волынкина, М.В. Темлянец, Г.В. Галевский*

Сибирский государственный индустриальный университет

## КАФЕДРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ СИБГИУ – 80 ЛЕТ

В 30-е годы прошлого столетия правительством СССР был принят курс на создание угольно-металлургического комплекса за Уралом, где ранее промышленность практически отсутствовала. Это привело к индустриальному развитию обширных территорий на Урале, в Западной и Восточной Сибири.

Строительство Кузнецкого металлургического комбината (КМК) привлекло тысячи рабочих, однако нехватка технического персонала среднего и высшего звена значительно сдерживала темпы возведения, пуск и эффективную эксплуатацию горно-металлургических предприятий.

По инициативе выдающегося ученого, главного инженера Кузнецкстроя Ивана Павловича Бардина, решением Совета народных комиссаров и Центрального исполнительного комитета СССР от 23 июня 1930 г. принято решение о создании Сибирского института черных металлов (СИЧМ), который позже был преобразован в Сибирский металлургический институт (СМИ), затем в Сибирскую государственную горно-металлургическую академию (СибГГМА), а позднее в Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Кафедра теплоэнергетики и экологии (ранее: кафедра металлургических печей, кафедра металлургических печей и теплогазоснабжения, теплотехники печей и газоочистки, а затем кафедра теплофизики и промышленной экологии) была создана в августе 1934 г., спустя четыре года после открытия в 1930 г. Сибирского института черных металлов.

Первым заведующим кафедрой металлургических печей стал доцент М.С. Спиридонов (1934 – 1939 гг). В те годы кафедра была общетехнической, за ней были закреплены дисциплины «Металлургические печи», «Топливо и огнеупоры», «Общая теплотехника», «Гидравлика», впоследствии к ним добавили курс «Контрольно-измерительные приборы». При кафедре функционировали учебно-исследовательские лаборатории по топливу и огнеупорам, в которых при участии работников кафедр металлургии чугуна и физической химии проводились

исследования свойств кузнецких углей и других шихтовых материалов, а также местного сырья для огнеупорного цеха КМК и заводов строительной промышленности [1 – 3].

Новое развитие кафедра получила с 1940 г., когда к руководству пришел к.т.н. доцент Иван Савельевич Назаров, возглавлявший ее до 1962 г. Благодаря его таланту ученого, педагога и администратора удалось сформировать на кафедре мощный научный потенциал, педагогические традиции, определившие ее высокий авторитет не только в СМИ, но и на всей территории Советского Союза.

В 1941 г. выходит одна из главных его работ – книга «Основы теории промышленных печей», которая приобрела большую популярность у студентов, ученых и инженерно-технических работников предприятий.

Во время Великой отечественной войны И.С. Назаров вошел в группу ученых СМИ, которая решала задачи, связанные с переводом КМК на оборонные заказы, проектированием и выбором печей для обжига бронелиста в термическом цехе, повышением производительности обжиговых печей для увеличения объемов производства динаса и шамота [4].

В 1951 г. в свет выходит уникальное издание того времени – учебник «Металлургические печи», авторский коллектив которого в составе В.А. Баума, Д.В. Будрина, А.И. Ващенко, М.А. Глинкова, Б.Л. Грановского, Б.И. Китаева, М.А. Кузьмина, А.Я. Михайленко, И.С. Назарова, Л.А. Плотникова, И.Д. Семикина, Н.Ю. Тайца, С.Г. Тройба был сформирован из ученых ведущих научных центров металлургической теплотехники: Московского института стали и сплавов, Уральского политехнического института, Днепропетровского металлургического института, Московского института цветных металлов и золота, Ленинградского политехнического института, Сибирского металлургического института и Государственного научно-исследовательского института цветных металлов. Учебник включал в себя все последние достижения теории печей, печестроения и являлся фактически

общесоюзным изданием, которое вышло в свет благодаря организаторским способностям его научного редактора профессора М.А. Глинкова. И.С. Назаровым в этом учебнике в соавторстве с профессорами М.А. Глинковым и Б.И. Китаевым был написан раздел «Общие принципы конструирования печей».

С 1953 по 1955 г. И.С. Назаров работал в Китае по организации высшего металлургического образования, а в 1955 г. им был организован первый набор студентов по специальности «Металлургические печи». С этого момента кафедра стала специальной, выпускающей. В 1960 г. состоялся первый выпуск 14 инженеров-теплотехников, четверо из них – Э.Р. Брувер, Ю.Ф. Бердюгин, Я.П. Калугин, В.С. Стариков защитили впоследствии кандидатские и докторские диссертации.

В 1957 г. И.С. Назаров возглавил работу по организации редакции и типографии для выпуска нового журнала «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия», став первым его главным редактором. Сотрудники кафедры принимали активное участие в редактировании и оформлении статей, научной пропаганде нового журнала [5].

Под руководством и при непосредственном участии И.С. Назарова на кафедре металлургических печей был создан мощный парк полупромышленных камерных печей скоростного нагрева, на базе которого были проведены масштабные эксперименты в активно развивающемся в то время научном направлении – скоростном нагреве стали. Уникальные эксперименты по исследованию трещинообразования, окисления и обезуглероживания стали при скоростном нагреве послужили основой кандидатских и докторских диссертационных исследований сотрудников кафедры В.С. Старикова, Е.И. Корочкина и др. И.С. Назаровым были предложены и осуществлены на практике конструкции электрических безынерционных печей.

И.С. Назарову удалось реализовать себя как крупного ученого-теплотехника, фактически основателя Сибирской научно-педагогической школы металлургической теплотехники. Научной общественности И.С. Назаров известен как специалист в области теории и практики тепловой работы металлургических агрегатов.

В 1959 г. кафедра металлургических печей выделила из своего состава часть преподавателей для подготовки специалистов по автоматизации металлургического производства, которую возглавил, образовав новую кафедру автоматизации металлургического производства, д.т.н., профессор П.М. Масловский.

С 1962 по 1974 г. кафедрой заведовал доцент Евгений Иванович Корочкин. Под его руководством были реконструированы и переоснащены лаборатории механики газов, теплопередачи и др., закончено строительство и оборудование лаборатории металлургических печей. По его инициативе были созданы условия для специализации части студентов-теплотехников на проблемах очистки промышленных газов. Рост объемов производства металлургических предприятий, необходимость борьбы с загрязнениями атмосферы предопределили актуальность и востребованность специалистов данного профиля, поэтому в 1982 г. была открыта новая специальность «Улавливание и утилизация пылей и газов».

Профессиональный и педагогический опыт Е.В. Корочкина был направлен на развитие образовательного процесса, решение проблем педагогики высшей школы, внедрение ЭВМ и информатизации в учебном процессе. В этот период подготовлено 334 специалиста-теплотехника.

В 1974 г. кафедре было поручено организовать подготовку инженеров по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция».

В 1982 г. кафедра теплогазоснабжения и вентиляции стала самостоятельной и впоследствии вошла в состав строительного факультета со своими лабораториями и с хорошим методическим обеспечением. На новую кафедру перешли работать опытные специалисты Л.И. Ускова, О.Я. Логунова, А.И. Кореньков, З.В. Нойкас, В.И. Иванов.

С 1974 по 2002 г. кафедрой заведовал профессор Геннадий Иосифович Черныш, вернувшийся из Арабской Республики Египет, куда в 1972 г. был командирован в качестве преподавателя в Эль-Таббинский металлургический институт для подготовки магистров наук.

В 70 – 80-е годы резко возросла потребность в подготовке высококвалифицированных педагогических кадров для собственных нужд. Кафедра стремительно развивалась, увеличивался штат профессорско-преподавательского состава, требовались «остепененные» металлурги-теплотехники – специалисты в области теории и конструкций металлургических печей.

Для решения этой задачи Г.И. Чернышом в аспирантуру, на родственную кафедру Уральского политехнического института, которой в то время заведовал профессор Ю.Г. Ярошенко, были направлены выпускники СМИ Н.А. Драничников, В.П. Зайцев, Н.И. Трофимов, В.М. Павловец, А.К. Соловьев, М.Н. Башкова. Под чутким руководством Юрия Гавриловича СМИчи успешно защитили кандидатские дис-



сертации и, вернувшись в родные стены, составили основной костяк кафедры.

Во время руководства кафедрой Г.И. Чернышом пришелся один из самых нелегких для высшего профессионального образования и России в целом период 90-х годов. Несмотря на сложные социально-экономические изменения в стране, отток кадров из высшей школы, Геннадия Иосифовичу удалось сохранить высокий кадровый потенциал кафедры, многолетние традиции, преумножить ее достижения.

В 1995 г. доцентом кафедры В.С. Стариковым в диссертационном совете Уральского государственного технического университета была успешно защищена докторская диссертация на тему «Форсированные энергосберегающие технологии нагрева стальных заготовок в металлургических печах».

В 2000 г. профессором кафедры К.А. Черепановым в диссертационном совете при Иркутском государственном техническом университете была защищена докторская диссертация на тему «Разработка научных и практических основ ресурсосберегающих технологий переработки и утилизации твердых дисперсных отходов горнорудной и металлургической промышленности (на примере Кузбасса)».

С 2002 г. по настоящее время кафедрой заведует к.т.н. доцент Сергей Георгиевич Коротков. Кафедра продолжает готовить инженеров по специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей» (специализации: «Теплофизические основы конструирования и эксплуатация промышленных печей» и «Промышленная экология»). В 2003 г. произведен первый набор, а в 2008 г. первый выпуск инженеров по новой специальности «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», специализация «Переработка комплексного и техногенного сырья».

В 2011 г. организована подготовка бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», профили «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей» и «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», начат прием студентов на заочную форму обучения. В 2011 г. также начата подготовка бакалавров по направлению «Техносферная безопасность», профиль «Инженерная защита окружающей среды». В 2012 г. открыта подготовка бакалавров по направлениям: «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика» (по очной, заочной и очно-заочной формам подготовки); «Экология и природопользование», профиль «Экология». Открыта магистратура по направлению: «Эко-

логия и природопользование», программа «Ресурсосбережение и утилизация отходов».

На кафедре функционирует аспирантура по специальностям 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов, 05.17.01 – Технология неорганических веществ, 15.16.07 – Металлургия техногенных и вторичных ресурсов.

В 2007 г. доцентом Е.П. Вольнкиной защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Государственном технологическом университете «Московский институт стали и сплавов» на тему «Развитие концепции управления отходами и разработка методологии ее реализации на металлургическом предприятии». В этом же году доцентом кафедры М.В. Темлянцева защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Сибирском государственном индустриальном университете на тему «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали».

Кафедра «Теплоэнергетика и экология» – одна из крупнейших выпускающих кафедр университета. В настоящее время в ее составе: 5 профессоров, 10 доцентов, 3 старших преподавателя, 4 доктора и 11 кандидатов наук.

Хорошая лабораторная база – во многом заслуга коллектива учебно-вспомогательного персонала, заведующего лабораториями, учебных мастеров и лаборантов. Кафедра располагает современными лабораториями: механики жидкости и газов; топлива; тепломассообмена; тепловых агрегатов; газоочистных установок; исследования теплофизических процессов; энергосбережения; техногенных и вторичных ресурсов; рециклинга материалов; экологии и природопользования.

Всего на кафедре по направлениям подготовки обучаются 210 – 230 студентов, кроме того, ежегодно кафедра обучает 350 – 400 студентов других институтов и специальностей. Учебный процесс реализуется по 16 учебным планам, включающих в совокупности более 200 рабочих программ дисциплин, по которым работает кафедра.

Для обеспечения качественной профессиональной подготовки специалистов и бакалавров за последние 5 лет подготовлено и издано: 3 монографии, 2 учебника, 35 учебных пособий, 76 учебно-методических разработок. Среди них «Окисление и обезуглероживание стали в процессе нагрева под обработку давлением», «Трещинообразование в процессах нагрева и охлаждения стали и сплавов», «Металлургические электропечи», «Расчеты методических печей», «Расчеты камерных печей», «Окатыши

в технологии экстракции металлов и руд», «Оборудование для очистки газов», «Рекуператоры для промышленных печей», «Огнеупорные материалы», «Экологические проблемы горно-металлургического региона: Кузбасс», «Природоохранная деятельность предприятия», «Металлургические технологии переработки промышленных и бытовых отходов», «Проектирование полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов» и др.

Обучение ведется квалифицированными преподавателями и специалистами городских энергетических и экологических служб. Процесс обучения построен таким образом, чтобы полученные знания и практические навыки обеспечили как можно более широкие возможности для последующего трудоустройства на предприятиях любого профиля в качестве теплотехников, экологов и теплоэнергетиков: на специализированных предприятиях, осуществляющих сбор, транспортировку, переработку, обезвреживание и захоронение отходов; в консалтинговых экологических компаниях; в природоохранных контролируемых организациях; в теплотехнических лабораториях и лабораториях экологического мониторинга; в проектных и научно-исследовательских организациях. Кроме этого, даются знания, необходимые для будущего предпринимателя в сфере энергетики и переработки отходов, что открывает возможности для открытия своего дела еще в стенах вуза.

Программа обучения предусматривает прохождение всех видов практики на металлургических, энергетических и специализированных предприятиях по переработке, обезвреживанию и захоронению отходов. Среди них ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»; ОАО «Челябинский МК»; ОАО «Кузнецкие ферросплавы»; ОАО «Кузнецкая ТЭЦ»; Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка; ЦОФ «Щедрухинская»; ОАО «СУЭК-Кузбасс»; ЗАО «Водоканал»; Кузбасская Ассоциация переработки отходов; ОАО «Эколэнд»; ООО «Экологический региональный центр»; ОАО «РУСАЛ Новокузнецк»; ООО «Недра Сибири»; ОАО «Северсталь»; Шорский национальный парк; Управления Росприроднадзора, Ростехнадзора, Роспотребнадзора и др.

На старших курсах студенты активно занимаются научно-исследовательской работой (НИРС), которая является составной частью учебных планов по всем направлениям подготовки. Ряд НИРС в дальнейшем развитии становятся выпускными квалификационными ра-

ботами. Перечень укрупненных тем НИРС следующий:

1. Влияние технологических факторов металлургических процессов на образование вредных выбросов.
  2. Исследование образования оксидов азота при сжигании топлива.
  3. Влияние энергопотребления на экологическую ситуацию в городе.
  4. Каталитическая очистка выбросов металлургического производства.
  5. Разработка катализаторов очистки выбросов на базе металлургических шлаков.
  6. Использование отходов коксохимического производства для разработки материалов коррозионной защиты.
  7. Оценка экологических рисков производственной деятельности черной металлургии.
  8. Анализ промышленных отходов в г. Новокузнецке и возможности их вторичного использования.
  9. Очистка газообразных выбросов в атмосферу биохимически очищенной водой коксохимического производства.
  10. Снижение экологических рисков в теплоэнергетике.
  11. Система очистки отходящих газов при термической утилизации твердых бытовых отходов.
  12. Уменьшение потерь тепла через окна при использовании поглощающих газов.
  13. Исследование процесса слоевой сушки окатышей струями сжатого воздуха.
  14. Исследование процесса окисления сталей различных марок.
  15. Разработка технологии производства брикетов из железосодержащих мелкодисперсных отходов.
  16. Исследование возможности прямого получения железа из тонкодисперсных железосодержащих отходов твердофазным восстановлением.
  17. Разработка технологии извлечения и обезвреживания биогаза свалки твердых бытовых отходов г. Новокузнецка.
  18. Разработка технологии разделения и утилизации твердых бытовых отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах.
- Результаты практически всех НИРС по их завершении публикуются в ежегодных сборниках «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых». Наиболее активные студенты выезжают на Всероссийские научно-практические конференции, семинары и форумы в города Санкт-Петербург, Екатеринбург, Иркутск, Новоси-

бирск, Кемерово и др., являются стипендиатами Экологического Фонда им В.И. Вернадского, губернаторских стипендий, дипломантами конференций с международным участием.

Научно-исследовательские дипломные работы составляют 15 – 35 % от общего количества выполняемых выпускных квалификационных работ.

Дипломные проекты направлены на решение актуальных практических проблем действующих предприятий Кузбасса. Как правило, темы проектов согласуются непосредственно с предприятиями, и выпускники после защиты дипломов имеют возможность трудоустройства на эти предприятия в качестве специалистов экологических и теплотехнических служб. Государственные аттестационные комиссии представлены ведущими учеными и специалистами в области металлургической теплотехники, экологии и металлургии техногенных и вторичных ресурсов.

Лучшие выпускники вместе с дипломами получают рекомендательные письма от членов ГАК, помогающие им найти работу по специальности.

За прошедшие годы количество выпускников кафедры превысило 2200 человек, 232 человека из них закончили ВУЗ с отличием.

Благодаря высокому качеству обучения, приобретенным в университете практическим знаниям, тесному сотрудничеству кафедры с металлургическими, энергетическими и другими промышленными предприятиями, Кузбасской ассоциацией переработчиков отходов, экологическими службами, федеральными и муниципальными природоохранными организациями, выпускники имеют широкие возможности для трудоустройства по специальности.

Преподаватели кафедры участвовали в подготовке национальных инженерных и научных кадров в Китайской Народной Республике (И.С. Назаров), Арабской Республике Египет (Г.И. Черныш, В.В. Стерлигов), Алжирской Народно-демократической Республике (Н.А. Драничников).

Научная деятельность является одним из приоритетов кафедры. За 80-летнюю историю коллективу приходилось решать весьма широкий спектр научных задач и проблем для многих промышленных предприятий г. Новокузнецка, Кузбасса, России и др. государств.

Основные научные направления кафедры:

1) горение, аэромеханика и массоперенос в металлургических агрегатах;

2) развитие теплотехнологий в производстве железорудного сырья с целью повышения

его качества и производительности технологического оборудования;

3) развитие ресурсосберегающих технологий тепловой обработки стали;

4) энергосбережение в промышленности, в бюджетной и жилищной сферах;

5) снижение вредных выбросов в атмосферу от энергетических и промышленных объектов;

6) разработка энергогенерирующих технологий и комплексов;

7) разработка технологии получения безобжиговых теплоизоляционных и огнеупорных изделий на основе отходов металлургии и теплоэнергетики;

8) исследование процессов твердо- и газофазного восстановления в составе железосодержащих брикетов;

9) разработка технологии получения самовосстанавливающихся брикетов на основе железосодержащих и органических отходов;

10) разработка новых видов синтетических шлакообразующих материалов на основе отходов алюминиевого производства;

11) разработка новых видов альтернативного топлива на основе органических отходов;

12) разработка технологии утилизации накопленных отходов горно-металлургического комплекса;

13) исследование закономерностей формирования техногенного месторождения на территории шламохранилища металлургического предприятия и способов его переработки.

Профессором П.М. Масловским проводились исследования тепловой работы мартеновских печей на основе теории подобия; на Кузнецком заводе ферросплавов доцентом В.Д. Мароном и профессором Г.В. Самохваловым проводились исследования, направленные на улучшение работы ферросплавных печей в условиях ограничения электропотребления; В.В. Юшкиным был исследован температурный режим лещадей доменных печей КМК в процессе их износа. При освоении новых мощностей ЗСМК выполнены исследовательские работы на нагревательных колодцах и по изучению окисления стали в цикле производства, определению стоимости нагрева по переделам (доценты Е.И. Корочкин, Е.Л. Медикритский, Ю.Е. Михайленко). Совместно с институтом «Теплопроект» разработаны и внедрены новые конструкции компактных радиационных рекуператоров для нагревательных печей металлургического и машиностроительного производства (Е.Л. Медикритский). По данным, полученным кафедрой совместно с работниками теплотехнической лаборатории КМК, институтом «Стальпроект» была разработана

серия плоскопламенных горелок для газовых смесей на основе коксового и доменного газов. Горелки этого типа были установлены на нагревательных печах КМК и ЗСМК, на зажигательных горнах аглоизвесткового производства ЗСМК, где они успешно работают и в настоящее время, обеспечивая качественное зажигание шихты и значительную экономию топлива.

Вопросам скоростного нагрева, окисления и обезуглероживания стали посвящены исследования профессоров И.С. Назарова, Г.В. Самохвалова, В.В. Стерлигова, В.С. Старикова, М.В. Темлянцева, доцентов Е.И. Корочкина, Ю.Е. Михайленко. Разработке новых топливосжигающих устройств – автогенных, плоскопламенных, высокоскоростных топливокислородных горелок – посвящены работы профессоров И.С. Назарова, Г.В. Самохвалова, Г.И. Черныша, В.В. Стерлигова, доцента С.Г. Короткова.

Под руководством Г.И. Черныша сотрудниками кафедры проводились: исследования теплового способа бурения крепких горных пород в Кузбассе; исследование реактивных горелок и фурм для промышленных установок Кузнецкого и Западно-Сибирского металлургических комбинатов, Кузнецкого завода ферросплавов, Красноуральского, Чимкентского и Алмалыкского заводов цветной металлургии; исследование пылегазовых выбросов Новокузнецкого стекольного завода, Кузнецкой ТЭЦ, ТЭЦ Западно-Сибирского металлургического комбината, заводов «Сантехлит» и «Новокузнецсельмаш», предприятий Барнаула, Рубцовска и др. Результаты большинства исследований переданы для внедрения и использования на Магнитогорский и Нижне-Тагильский металлургические комбинаты, заводы «Красный Октябрь» (Волгоград), «Большевик» (Ленинград), Макеевский, Енакиевский, Серовский и Бекабадский металлургические заводы. По ряду из них составлены технико-экономические обоснования для проектирования систем газоочистки в городах Новокузнецк, Барнаул, Рубцовск.

Проблемами экологии и использования вторичных ресурсов занимаются профессора К.А. Черепанов, Е.П. Волынкина, Л.Б. Павлович.

Л.Б. Павлович исследованы и разработаны технологии: гидрогенизационной очистки коксохимического нафталина; каталитической очистки выбросов ряда цехов коксохимического производства; производства катализаторов глубокого окисления органических выбросов и оксида углерода на базе шлаков черной металлургии; утилизации техногенных и химиче-

ских отходов коксохимического производства (КХП) и других отраслей промышленности в шихте на коксование; утилизации химических отходов КХП в виде модифицирующих добавок в дорожном строительстве, в производстве технического углерода и др.; производства новых материалов противокоррозионной защиты на базе отходов фталиевого ангидрида – порошковые краски, полиэферы, алкидные грунтовки и другие; утилизация сточных вод КХП; исследование состава выбросов технологических источников КХП; оценка экологических рисков в металлургическом производстве.

Основная тема научных исследований К.А. Черепанова – решение проблемы устойчивого развития посредством замены природных ресурсов промышленными отходами в области металлургии, строительной индустрии и теплоэнергетики.

Профессором Е.П. Волынкиной решен комплекс теоретических, прикладных и экспериментальных задач по развитию теории управления отходами и разработке методов ее реализации на металлургическом предприятии, включая методы оптимизации доменного и конвертерного процессов в направлении снижения потребления природных ресурсов и образования отходов; технологии переработки отходов металлургического производства и смежных отраслей; способов обезвреживания и безопасного захоронения отходов; разработке принципов устойчивого развития техногенных систем; создания новых видов сырья, топлива и восстановителей для металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевых заводов и твердых бытовых отходов; разработке технологии глубокого обезвреживания токсичных отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах; разработке и реализации инновационного проекта по созданию производства новых видов синтетических флюсов для металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевых заводов.

Разработка и совершенствование ресурсо- и энергосберегающих технологий в производстве высококачественного железорудного сырья для металлургической промышленности является основным направлением научной деятельности доцента В.М. Павловца.

Под руководством д.т.н., профессора, проректора по научной работе и инновациям М.В. Темлянцева продолжают работы по направлению «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали». Много творческой энергии и души он вкладывает в подготовку научно-педагогических кадров.

По результатам научно-исследовательских работ коллективом кафедры получено более 200 авторских свидетельств и патентов. За последние 5 лет организованы и проведены 3 Международных научно-практических конференции, получено 34 патента, опубликовано 260 научных работ в ведущих изданиях РФ, защищено 5 диссертаций кандидатов технических наук.

У кафедры сложились творческие связи со многими педагогическими и научными коллективами: Московским институтом стали и сплавов (Национальным исследовательским технологическим университетом); Южно-Уральским государственным университетом; Магнитогорским государственным техническим университетом; Днепропетровским металлургическим институтом; Национальным минерально-сырьевым университетом «Горный»; Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом; Научно-исследовательским институтом металлургической теплотехники – ВНИИМТ; Сибэнергочерметом и др.

Кафедра активно сотрудничает с зарубежными природоохранными и научно-исследовательскими организациями. В 2006 г. при поддержке Агентства охраны окружающей среды США (EPA) и международного партнерства «Метан на рынки» («Methane-toMarkets») под руководством Е.П. Волынкиной выполнен проект «Инвентаризация полигонов ТБО в России и оценка их метанового потенциала». Впервые в России создана база данных, включающая подробную информацию о 866 свалках и полигонах ТБО на территории России. Выполнена предварительная оценка образования свалочного метана по каждой свалке. Изучена практика создания систем дегазации и утилизации свалочного газа. Это привело к началу исследований и проработке возможности организации извлечения и утилизации свалочного метана со свалок ТБО в городах Новокузнецке и Кемерово.

С 2005 г. организуются и проводятся Международные научно-практические конференции «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе» с участием ученых из Польши, Украины, США, на которых представляются разработки в области эколого-экономических, нормативно-правовых, санитарно-гигиенических, социальных аспектов обращения с отходами, технические разработки в области сбора, транспортировки, разделения, обезвреживания, переработки отходов.

В рамках конференции в 2010 г. совместно с Агентством охраны окружающей среды США (EPA) организовано проведение тренингового семинара «Организация извлечения и утилизации метана со свалок ТБО» для персонала полигонов ТБО Кемеровской области и местных администраций.

Сотрудники кафедры и студенты ведут активную общественную деятельность в области экологического просвещения и энергосбережения. Ведется пропаганда грамотного потребления энергии, управления отходами. Разработаны, изданы и распространяются популярные брошюры «Скажем мусорным свалкам нет», «Инструкция по управлению отходами на предприятиях и в организациях», буклеты «10 правил обращения с бытовыми отходами», календари, плакаты, листовки.

Студенты-экологи всех курсов — с первого по пятый — объединены в студенческий экологический отряд «ЭКОС». «ЭКОС» – это общественное объединение будущих экологов с целью осуществления уже в период студенчества просветительской и практической деятельности в сфере управления отходами и охраны окружающей среды.

Деятельность «ЭКОСа» широко известна не только в г. Новокузнецке и Кемеровской области, но и в других регионах России. Студенты пропагандируют раздельный сбор бытовых отходов, организывают сбор макулатуры в университете, выпускают собственную газету «ЭКОТАЙМ», ставят экологические спектакли по собственным сценариям (наиболее известен спектакль «Экосити — город будущего»), которые демонстрируют в вузах, школах, на предприятиях города, проводят экологические акции в городе, экологические уроки в школах. Активисты экологического отряда "ЭКОС" принимают активное участие в ежегодном Российском студенческом экологическом семинаре в г. Екатеринбурге, где выступают с докладами на Всероссийской студенческой научно-практической конференции. За активную природоохранную деятельность отряд «ЭКОС» и его участники были неоднократно отмечены почетными грамотами, благодарственными письмами и грантами Губернатора Кемеровской области.

На кафедре действовал студенческий клуб энергосбережения EnNet. Главные задачи объединения – изучение, пропаганда и реализация правовых организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и

на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии. В настоящее время в связи с истощением ресурсного и энергетического потенциала, задача энерго-сбережения – сохранение природных ресурсов.

Кафедра гордится своими выпускниками – видными учеными и организаторами производства, директорами, главными инженерами и ведущими специалистами крупных заводов, общественными деятелями, успешными бизнесменами, творческими личностями, профессорами, доцентами, докторами и кандидатами технических наук, всеми, кто верой и правдой посвящает свою жизнь служению выбранной профессии, и просто достойными людьми. Среди них генеральный директор ЗАО «Калугин» д.т.н. Я.П. Калугин [6], заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН им. Кутателадзе в.н.с, д.т.н. В.И. Попов, генеральный директор ОАО «Амурсталь» С.И. Сафонов, генеральный директор ОАО «Кузбассшахтострой» Ю.А. Коробкин, генеральный директор ООО «Сибирские товары» С.Г. Сидельников, директор по персоналу ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» А.Г. Абраменко, руководитель спасательного центра по югу Кузбасса, президент городской ассоциации туристов Р.Э. Брувер, председатель комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка И.Н. Савина, руководитель Роспотребнадзора по Кемеровской области И.А. Климовская, главный теплотехник ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» Е.А. Колотов, главный специалист по теплоэнергетике СЭНЛ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» В.В. Семахин, начальник цеха обжига извести аглоизвесткового производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», член Союза писателей России С.Н. Стрельников, главный технолог прокатного производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» В.Г. Перекопский, главный эколог ООО Сибстройпроект А.Г. Миролюбов, главный эколог «ЕВРАЗ ЗСМК», почетный металлург РФ, председатель экологической комиссии Совета народных депутатов г. Новокузнецка А.А. Попов, ведущий специалист комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка А.П. Панэ, эколог разреза «Ерунаковский» ОАО «Кузбассразрезуголь» А.А. Микрюкова и др. [7].

В теплотехнических службах ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» трудятся выпускники: К.В. Размахнин, Г.В. Булычев, А.С. Козлов, А.Г. Голишев, А.С. Горбунов, А.Ю. Сюсюкин, Д.Г. Голишев, М.В. Матвеев.

В специализированной энергетической лаборатории ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» трудятся выпускники: А.А. Кузьмин, А.А. Арапов, Г.В. Золотарев, Н.А. Полежаева, С.В. Пашинская (Романова), Н.С. Казанцева, О.А. Уварова (Кислицина), З.Н. Фейлер (Мосейкина), И.П. Кукалев, Л.А. Куергашева, Ю.Ю. Фрешер (Шнитко), Т.В. Казиминова (Азанова), И.В. Семахина, Н.А. Мельникова, И.В. Мирный.

Славная 80-летняя история становления и развития кафедры теплоэнергетики и экологии – это добросовестный, повседневный труд ее сотрудников, тех, кто трудится сейчас и кто работал на ней в прежнее время. Это: Абрамович О.С., Аникин А.Е., Афанасьев Ф.Н., Башкова М.Н., Бащенко Л.П., Брувер Р.Э., Вознесенский А.А., Воложин Я.С., Волынкина Е.П., Водолеев А.С., Воронцов В.Г., Гайко В.П., Гладких И.В., Динельт В.М., Драничников Н.А., Зайцев В.П., Иванов В.В., Каган С.М., Кореньков А.И., Коровкина Г.М., Коротков С.Г., Корочкин Е.И., Кузнецов В.В., Курганова Н.В., Легаева В.В., Ливенец В.И., Лобочева Т.Л., Логунова О.Я., Григорьева С.А., Марон В.Д., Масленников М.И., Масловский П.М., Медведская Е.В., Меджибожский М.Я., Медокритский Е.Л., Мизгирева Е.М., Митрофанов А.Н., Михайленко А.С., Михайленко Ю.Е., Михайлец С.Н., Михайличенко Т.А., Назаров И.С., Нойкас З.В., Осипов В.Т., Павловец В.М., Павлович Л.Б., Панов Б.П., Руденков А.П., Руль Г.А., Салита В.А., Самохвалов Г.В., Семенов С.А., Сельский Б.И., Сергеев Г.В., Соловьев А.К., Спиридонов М.С., Стариков В.С., Стерлигов В.В., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В., Темлянцева Е.Н., Титова О.О., Трофимов Н.И., Труфанов В.П., Ускова Л.И., Федосеев В.С., Фишман Б.Д., Хисамутдинов Н.Е., Хузеев В.В., Черепанов К.А., Черныш Г.И., Чубейко М.В., Шадринцева Д.А., Шляров В.И., Юшкин В.В. и др.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Кафедра теплофизики и промышленной экологии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2000. № 8. С. 5, 6.
2. Самохвалов Г.В., Коротков С.Г. Кафедре теплофизики и промышленной экологии СибГИУ – 70 лет // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2004. Вып.13. С. 9 – 12.
3. СМИ – СибГИУ. 75 лет. Хроника. Люди. События: очерки истории СибГИУ / Н.М.

- Кулагин, С.М. Кулаков, В.А. Воскресенский и др. – Кемерово: Кузбасс, 2005. – 304 с.
4. Берлин А.Б. Сибирский металлургический институт. Дела и люди. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1992. – 224 с.
  5. Сибирский государственный индустриальный университет: Страницы истории. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 160 с.
  6. Якову Прокопьевичу Калугину – 70 лет // Сталь. 2007. № 6. С. 12.
  7. Кафедра теплофизики и промышленной экологии СибГИУ. 75 лет в образовании и науке / СибГИУ; под. ред. М.В. Темлянцев, С.Г. Короткова, В.В. Стерлигова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. – 163 с.

© 2014 г. С.Г. Коротков, Е.П. Волюнкина,  
М.В. Темляцев, Г.В. Галевский  
Поступила 17 сентября 2014 г.

УДК 669.187:621.771

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

Сибирский государственный индустриальный университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЛЬСОВОГО ПРОКАТА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА**

В настоящее время проблема повышения эксплуатационной стойкости рельсов является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед металлургическими предприятиями – производителями рельсового проката. Результаты проведенных в последние годы исследований свидетельствуют, что наиболее значимое влияние на эксплуатационную стойкость рельсов оказывает загрязненность стали оксидными неметаллическими включениями [1 – 3]. При этом особая роль отводится так называемым хрупкообразующим оксидным включениям, представляющим наибольшую опасность с точки зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов.

Указанный факт также подтверждается тем, что действующей нормативной документацией, которая распространяется на производство рельсового проката из стали марок Э76Ф (категория «В»), НЭ76Ф (низкотемпературной надежности), Э90АФ (рельсов повышенной износостойкости категории ИК), предусмотрена жесткая регламентация не только общего содержания кислорода в стали, но и кислорода, связанного в хрупкообразующие оксидные включения (не более 10 ppm).

Таким образом, проблема снижения концентрации хрупкообразующих оксидных

включений в рельсовом металле является на сегодняшний день актуальной.

Концентрация оксидных включений (в том числе хрупкообразующих) в рельсах напрямую определяется общим содержанием кислорода в стали. Установлено, что выполнение вышеуказанного требования стандартов по концентрации кислорода, связанного в хрупкообразующие оксидные включения (не более 10 ppm), возможно при содержании общего кислорода на уровне не более 12 – 13 ppm. При этом действующая в настоящее время технология обеспечивает среднее содержание общего кислорода на уровне 14 ppm; порядка 20 % плавок имеют данный показатель выше требуемого уровня.

Ранее проведенными в условиях электроплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) исследованиями [4, 5] установлено, что морфология образующихся оксидных включений в значительной степени определяется концентрацией кислорода. Так, при содержании кислорода в готовых рельсах менее 25 ppm встречаются в основном строчки хрупкообразующих алюминатов кальция ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), максимальная длина включений не превышает 10 мкм.

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

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

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

Анализировали влияние следующих технологических параметров:

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

Использовали парный регрессионный анализ. Уравнение прямой регрессии, выражающее взаимосвязь переменных, имеет общий вид

$$Y = aX + b, \quad (1)$$

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

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по следующим формулам:

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

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

Парный коэффициент корреляции определяется по выражению

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

где  $n$  – количество наблюдений в выборке.

При нелинейной взаимосвязи между переменными в зависимости от вида нелинейной функции используют различные методы расчета коэффициентов уравнения регрессии. Для полинома второго порядка  $Y = b + a_1X + a_2X^2$  расчет коэффициентов уравнения регрессии производится путем решения системы уравнений

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

Для решения приведенной системы уравнений используют метод Крамера, согласно которому

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

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

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

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

При анализе установлено значимое влияние на содержание общего кислорода в металле продолжительности продувки металла на АКП (рис. 1) и расхода силикомарганца при раскислении стали на выпуске из печи (рис. 2).



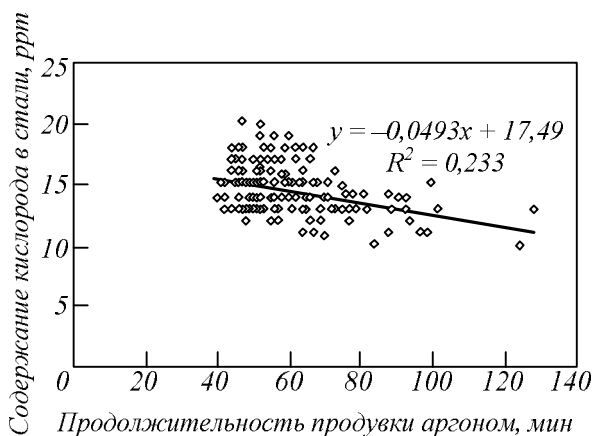


Рис. 1. Влияние продолжительности продувки аргоном на АКП на содержание кислорода в рельсовой стали

По полученным данным остальные анализируемые параметры не оказывают значимого влияния на параметр оптимизации.

При увеличении длительности продувки стали на АКП наблюдается снижение концентрации общего кислорода в металле. Поскольку общее содержание кислорода в стали складывается из растворенного в металле кислорода и кислорода, связанного в неметаллические включения, то, очевидно, полученная зависимость (рис. 1) обусловлена снижением именно количества оксидных неметаллических включений.

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

С точки зрения термодинамики процесса перехода неметаллических включений из металла в шлак лимитирующим звеном, определяющим эффективность очистки стали от включений, является стадия отрыва их от границы металл – шлак. Переход неметаллических включений с межфазной границы в шлак сопровождается повышением энергии Гиббса в системе металл – включение – шлак и поэтому является термодинамически невозможным. Однако в реальных условиях этот процесс протекает за счет действия различных факторов кинетического характера. Поэтому для повышения эффективности удаления неметалли-

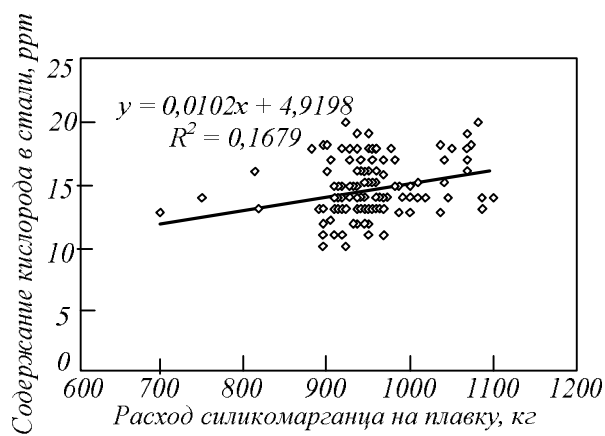


Рис. 2. Влияние расхода силикомарганца на выпуске из печи на содержание кислорода в рельсовой стали

ческих включений из стали необходимо осуществлять интенсивное обновление слоев шлака, приграничных к металлу, за счет кинетических факторов, в частности, перемешивания, продувки металла инертным газом.

Отсутствие взаимосвязи между содержанием кислорода в стали и параметрами, характеризующими окисленность расплава (содержание углерода на выпуске из печи и содержание кремния в первой ковшевой пробе на АКП) обусловлено изменением порядка присадки раскислителей (в настоящее время присадку коксовой мелочи осуществляют после присадки силикомарганца, то есть в раскисленный металл). Доказательством этого предположения является тот факт, что увеличение в процессе выпуска металла из печи количества присадок силикомарганца приводит к увеличению содержания кислорода в готовой стали (рис. 1).

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

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

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

По полученным данным (табл. 1) увеличение средней продолжительности продувки ме-

**Сравнительный анализ показателей плавки при различной продолжительности обработки на АКП**

| Показатель   | Значение показателя           |        |               |                                      |        |               |
|--|-------------------------------|--------|---------------|--------------------------------------|--------|---------------|
|  | опытной плавки<br>(15 плавки) |        |               | текущего производства<br>(19 плавки) |        |               |
|  | min                           | max    | среднее       | min                                  | max    | среднее       |
| Продолжительность продувки аргоном на АКП, мин .....   | 103,0                         | 146,0  | <b>122,4</b>  | 52,0                                 | 72,0   | <b>63,0</b>   |
| Продолжительность продувки азотом на АКП, мин .....    | 0                             | 25,0   | <b>5,5</b>    | 0                                    | 0      | <b>0</b>      |
| Суммарная продолжительность продувки на АКП, мин ..... | 103,0                         | 146,0  | <b>126,4</b>  | 52,0                                 | 72,0   | <b>63,0</b>   |
| Расход аргона на продувку:                             |                               |        |               |                                      |        |               |
| м <sup>3</sup> /ч .....                                | 15,9                          | 43,2   | <b>27,9</b>   | 16,7                                 | 30,8   | <b>26,1</b>   |
| м <sup>3</sup> /т .....                                | 0,27                          | 0,72   | <b>0,46</b>   | 0,13                                 | 0,32   | <b>0,24</b>   |
| Расход азота на продувку:                              |                               |        |               |                                      |        |               |
| м <sup>3</sup> /ч .....                                | 0                             | 38,61  | <b>7,37</b>   | 0                                    | 0      | <b>0</b>      |
| м <sup>3</sup> /т .....                                | 0,070                         | 0,142  | <b>0,100</b>  | 0                                    | 0      | <b>0</b>      |
| Температура, °С;                                       |                               |        |               |                                      |        |               |
| в начале обработки на АКП .....                        | 1512,0                        | 1599,0 | <b>1549,1</b> | 1496,0                               | 1611,0 | <b>1545,2</b> |
| в конце обработки на АКП .....                         | 1614,0                        | 1623,0 | <b>1619,5</b> | 1616,0                               | 1630,0 | <b>1620,4</b> |
| Удельный расход электроэнергии на АКП, кВт·ч/т .....   | 77,10                         | 106,00 | <b>92,20</b>  | 55,10                                | 73,70  | <b>64,94</b>  |
| Расход феррованадия азотированного, кг/т .....         | 1,32                          | 1,50   | <b>1,44</b>   | 1,37                                 | 1,53   | <b>1,44</b>   |

талла на АКП с 63 до 122 мин привело к увеличению удельного расхода электроэнергии в среднем на 27,3 кВт·ч/т (с 64,9 до 92,2 кВт·ч/т стали) или на 42 %. Удельный расход аргона при этом увеличился на 0,32 м<sup>3</sup>/т (с 0,24 до 0,46 м<sup>3</sup>/т) или на 92 %.

Качество рельсового проката опытных плавки удовлетворяет требованиям Регламента и нормативной документации по следующим параметрам:

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

На втором этапе исследований проведена серия опытно-промышленных плавки, при раскислении которых использовали силикомарганец марки FeMnSi30HP производства ОАО «СГМК Ферросплав» взамен традицион-

но используемого силикомарганца марки MnC18. Химический состав ферросплавов согласно требований ГОСТ 4756 – 91 представлен в табл. 2.

С использованием указанного ферросплава проведено пять плавки рельсовой стали марки Э76Ф (категория Т1). Выплавку, внепечную обработку и разливку металла опытных плавки проводили в соответствии с требованиями действующей нормативной документации. Для сравнения были выбраны технологические параметры 27 плавки, выплавленных непосредственно до и после проведения опытных плавки.

По результатам проведенного промышленного эксперимента установлено следующее.

1. Среднее содержание кремния в металле опытных плавки перед обработкой на вакууматоре составило 0,319 % (0,316 % на плавках сравнения).

**Химический состав ферросплавов**

| Марка      | Массовая доля, %, элементов    |                                |               |               |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|---------------|
|            | Mn                             | Si                             | C             | P             |
| MnC18      | более 65<br>до 75 включительно | более 15<br>до 20 включительно | не более 0,35 | не более 0,03 |
| FeMnSi30HP | более 57<br>до 67 включительно | более 28<br>до 35 включительно | не более 0,10 | не более 0,20 |

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

3. Среднее содержание алюминия в металле опытных и сравнительных плавков составило 0,0022 и 0,0029 % соответственно.

Далее с целью подтверждения полученных результатов и комплексной оценки технико-экономической эффективности использования ферросплава FeMnSi30HP проведена серия опытно-промышленных плавков, в том числе 62 плавки стали марки Э76Ф (категория Т1) и 19 плавков стали марки Э76Ф (шифр НЭ).

Оценка механических свойств и макроструктуры рельсов, полученных при использо-

вании опытной технологии, показала, что служебные характеристики металла соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 и ТУ 0921-118-01124328 – 2003 и находятся на уровне плавков текущего производства (табл. 3, 4).

Расчет экономической эффективности провели, исходя из фактически полученного расхода ферросплавов на опытных плавках при текущем уровне цен на ферросплавы. Расход ферросплавов при использовании опытной и существующей технологий раскисления рельсовой стали представлен в табл. 5.

Пониженный расход ферросилиция на опытных плавках получен в связи с тем, что содержание кремния в ферросплаве FeMnSi30HP выше по сравнению с содержанием его в силикомарганце MnC18. Также следует отметить, что применение незначительного (0,10 – 0,11 кг/т) количества силикомарганца марки MnC18 на опытных плавках было вызвано необходимостью корректировки массовой доли марганца в металле в процессе обработки на установке вакуумирования.

Т а б л и ц а 3

**Механические свойства горячекатаных рельсов**

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

Т а б л и ц а 4

**Механические свойства термоупрочненных рельсов**

| Параметр   | $\sigma_r$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\delta_s$ , % | $\Psi$ , % |
|--|--------------------------------|--------------------------------|----------------|------------|
| Средние значения на опытных плавках (категория Т1) | 942,5                          | 1270,0                         | 11,25          | 32,0       |
| Средние значения за 2012 г. (категория Т1)         | 920,4                          | 1271,3                         | 12,60          | 35,8       |
| Средние значения на опытных плавках (категория НЭ) | 920,0                          | 1270,0                         | 11,00          | 30,0       |
| Средние значения за 2012 г. (категория НЭ)         | 911,6                          | 1271,3                         | 12,80          | 39,4       |
| Требования ГОСТ Р 51685 – 2000                     | 800                            | не менее<br>1180               | 8              | 25         |

## Расход ферросплавов при производстве стали Э76Ф

| Ферросплав          | Расход ферросплавов, кг/т |                         | Отклонение, кг/т |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
|                     | опытная технология        | существующая технология |                  |
| <i>категория Т1</i> |                           |                         |                  |
| МnC18               | 0,11                      | 10,13                   | -10,02           |
| ФC65                | 0,30                      | 2,55                    | -2,25            |
| FeMnSi30HP          | 12,16                     | 0                       | +12,16           |
| <i>категория НЭ</i> |                           |                         |                  |
| МnC18               | 0,10                      | 10,28                   | -10,18           |
| ФC65                | 0,29                      | 2,48                    | -2,19            |
| FeMnSi30HP          | 11,76                     | 0                       | +11,76           |

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

**Выводы.** В условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования влияния технологических параметров производства рельсовой стали на содержание кислорода в расплаве. Установлено, что увеличение продолжительности продувки стали инертным газом при обработке на АКП с 63 до 122 мин способствует уменьшению количества оксидных неметаллических включений, при этом остальные контролируемые параметры качества готовых рельсов не ухудшаются. Проведен анализ технико-экономической эффективности использования новой технологии раскисления рельсовой стали с использованием силикомарганца марки FeMnSi30HP взамен МnC18. По результатам проведенного промышленного эксперимента подтверждено повышение степени сквозного усвоения углерода и кремния (на 4 и 13 % соответственно). Оценка механических свойств и макроструктуры рельсов, полученных при использовании опытной технологии, показала, что они находятся на уровне плавок текущего производства. По полученным расчетным данным экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP составила 13,99 и 32,64 руб./т рельсов категорий Т1 и НЭ соответственно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дерябин А.А., Добужская А.В. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали // *Сталь*. 2000. № 11. С. 38 – 43.
2. Дерябин А.А., Рабовский В.А., Шур Е.А. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте // *Сталь*. 2000. № 11. С. 82 – 85.
3. Линчевский Б.В., Вартпатрикова С.Н., Дашевский В.Я., Кашин В.И., Макарова Н.Н. Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2002. № 5. С. 14 – 18.
4. Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Бойков Д.В. Новая технология производства рельсовой стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 2. С. 25 – 29.
5. Козырев Н.А., Бойков Д.В. Возможности улучшения качества рельсовой стали // *Электрометаллургия*. 2012. № 1. С. 30 – 33.
6. Кузнецов И.С., Прахов А.Е., Уманский А.А., Рубцов Ю.Т. Влияние технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных сталей // *Сталь*. 2008. № 4. С. 43 – 45.
7. Айзатулов Р.С., Уманский А.А., Чернышева Н.А. Статистический анализ влияния состава металлической шихты на основные технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха ОАО «НКМК» // *Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. Сборник научных трудов*. – Москва-Новокузнецк, 2009. Вып. 23. С. 39 – 46.

© 2014 г. Н.А. Козырев, А.А. Уманский,  
Д.В. Бойков  
Поступила 26 июня 2014 г.

УДК 621.785

*К.В. Волков<sup>1</sup>, Е.В. Полевой<sup>1</sup>, М.В. Темлянец<sup>2</sup>, О.П. Атконова<sup>1</sup>, А.М. Юнусов<sup>1</sup>,  
А.Ю. Сюсюкин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ОАО ЕВРАЗ «ЗСМК»

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОСТРУЙНОЙ ЗАКАЛКИ С ПЕЧНОГО НАГРЕВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Железнодорожные рельсы являются одним из наиболее важных элементов верхнего строения пути, от которого в значительной степени зависит безопасность грузовых и пассажирских перевозок. Кроме того, рельсы составляют наиболее затратную часть основных фондов инфраструктуры железных дорог. Эти факторы являются главной причиной ужесточения требований к качеству рельсов со стороны их основного потребителя – ОАО «Российские железные дороги».

Для надежной и безопасной эксплуатации современные рельсы должны обладать высоким металлургическим качеством [1], иметь соответствующий комплекс механических свойств: твердость, износостойкость, сопротивление хрупкому разрушению, смятию и возникновению контактно-усталостных дефектов, живучесть, долговечность и трещиностойкость [2]. Развитие сети высокоскоростного движения выдвигает свои, повышенные требования к прямолинейности рельсов. При этом рельсы должны иметь низкий уровень остаточных напряжений, а процесс их изготовления должен быть как можно более экологичным и ресурсосберегающим.

Используемая в отечественном производстве с конца 70-х годов прошлого века практика термического упрочнения рельсов методом объемной закалки в масле, несмотря на такие бесспорные достоинства, как стабильность процесса, высокий комплекс механических свойств и ударной вязкости, к настоящему моменту имеет также и существенные недостатки. Прежде всего с использованием этой технологии получают низкие технико-экономические показатели, связанные с затратами, понесенными при потреблении природного газа, необходимого для нагрева рельсов под закалку, и применение большого количества индустриального масла. В процессе объемной термической обработки рельсов происходит их коробление, что при правке приводит к наведению высокого уровня остаточных напряжений. Такая технология не позволяет про-

водить закалку длинномерных рельсов, а также рельсов из легированных марок сталей [3].

В связи с этим во избежание указанных недостатков на зарубежных предприятиях внедрены технологии дифференцированной термической обработки рельсов, при которых охлаждение головки и подошвы рельсов происходит с различными скоростями таким образом, чтобы произвести закалку головки рельсов с достижением требуемого комплекса свойств [4]. Подошва же охлаждается лишь настолько, насколько это необходимо для минимизации коробления рельсов. Для повышения экономической целесообразности и производительности наблюдаются тенденции по отказу от традиционного повторного нагрева под закалку в пользу термической обработки с использованием тепла «прокатного» нагрева [3, 5].

В мировой практике производства рельсов существуют несколько вариантов закалки, обеспечивающих различный уровень свойств по сечению рельса, среди которых можно выделить два. Примером одного из них может служить технология, применяемая на Австрийском предприятии Voest Alpiene Schienen, – закалка рельсов длиной до 120 м проводится в положении «головкой вниз» в водном растворе полимера как с прокатного, так и со специального нагрева. Указанное предприятие производит рельсы длиной до 120 м. Примером другого, принципиально иного, подхода могут являться предприятия Японской промышленности – Nippon Steel Corporation & Sumitomo Metal или Nippon Kokan, а также американское предприятие EVRAZ Pueblo. На этих предприятиях термическая обработка рельсов производится с использованием тепла прокатного нагрева, а в качестве охлаждающей среды выступает воздух, который по сравнению с полимером обладает лучшей контролируемостью и большей экологичностью. Несмотря на более высокие технико-экономические показатели, этот способ не лишен крайне важного для нашей страны недостатка. Как показали исследования, выполненные в

работе [6], по сравнению с отечественными объемно-закаленными, рельсы, закаленные с прокатного нагрева, имеют существенно более низкие показатели ударной вязкости, что приводит в случае возникновения трещины к ее катастрофическому распространению. С другой стороны, рельсы имеют довольно высокие показатели трещиностойкости, что свидетельствует о низкой вероятности возникновения трещины в период гарантийной наработки, заявленной на уровне 1 млрд. тонн брутто.

Таким образом, наиболее перспективной с точки зрения энергозатрат и ресурсосбережения является технология закалки рельсов воздухом с прокатного нагрева.

В настоящей работе проведена серия экспериментов по термической обработке рельсовых проб сжатым воздухом с отдельного печного нагрева, целью которых является определение перспективных режимов термической обработки и химических составов рельсовой стали в рамках подготовки к освоению технологии промышленного производства дифференцированно термически упрочненных рельсов.

Объектом исследования являются 400-мм пробы, отобранные от горячекатаных железнодорожных рельсов типа Р65 из стали марки Э76Ф текущего производства, изготовленных по ГОСТ Р 51685 – 2000, а также рельсов опытных плавов Л1 – Л4 из стали марки Э78ХСФ, дополнительно микролегированных ниобием в количестве до 0,06 %. Содержание основных элементов в металле опытных плавов представлено ниже:

| Плав- | Массовая доля химических элементов, % |      |      |      |      |       |
|-------|---------------------------------------|------|------|------|------|-------|
|       | С                                     | Mn   | Si   | Cr   | V    | Nb    |
| Л1    | 0,79                                  | 1,09 | 0,43 | 0,57 | 0,04 | 0,035 |
| Л2    | 0,79                                  | 1,12 | 0,43 | 0,58 | 0,04 | 0,042 |
| Л3    | 0,79                                  | 1,10 | 0,42 | 0,59 | 0,04 | 0,048 |
| Л4    | 0,75                                  | 0,83 | 0,55 | 0,42 | 0,04 | 0,060 |

Как видно из представленных данных металл плавов Л1 – Л3 по содержанию основных химических элементов имеет сопоставимый химический состав и в основном отличается по содержанию ниобия. Металл плавки Л4 отличается от плавов Л1 – Л3 самым высоким содержанием ниобия и кремния, а также более низкими содержаниями углерода, марганца и хрома.

Дифференцированную термическую обработку проводили после нагрева проб в газовой печи до температуры 850 – 930 °С, выдержки при этой температуре в течение 20 – 30 мин, подстуживания до температуры начала закалки, которая варьировалась от 800 до 880 °С, и

охлаждения сжатым воздухом при постоянном давлении от 1000 до 2500 мм вод. ст. в течение 90 – 200 с. По окончании термической обработки рельсы остывали до комнатной температуры в условиях естественной конвекции.

Температуру в процессе проведения экспериментов фиксировали ручным инфракрасным пирометром типа Raynger МХ.

Внешний вид установки для термической обработки рельсов представлен на рис. 1. Установка состоит из трех перфорированных коробов, расположенных над поверхностью головки рельса. В конструкции коробов предусмотрено крепление для манометров. К каждому коробу подведен шланг от распределительного устройства с отдельным регулирующим краном. К распределительному устройству подведен сжатый магистральный воздух с каналом большего сечения.

К перфорированной области коробов прикреплена пластина с соосными перфорациями отверстиями. Система перфорации короба и отверстий в прикрепленной пластине образуют совокупность сопел.

Установка позволяет регулировать в процессе проведения эксперимента расстояние между плоскостью сопел и охлаждаемой поверхностью проб, что дает возможность добиться наиболее эффективного и равномерного охлаждения.

Регулировка давления в каждом коробе ведется индивидуальным шарнирным клапаном. Подача воздуха осуществляется общим запорным клапаном.

После проведения экспериментов от каждой пробы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2000 были отобраны: темплет для измерения твердости на поверхности катания и по сечению головки и шейки рельса, образец для определения механических свойств при растяжении; образец для проведения испытания на ударный изгиб при температурах комнатной и –60 °С, а также образец для



Рис. 1. Опытная установка дифференцированной термической обработки рельсов типа Р65 сжатым воздухом

контроля микроструктуры, вырезанный в верхней части головки.

Испытание на твердость проводили методом Бринелля на твердомере типа ТШ-2М шариком диам. 10 мм при нагрузке 3000 кгс (или  $3 \cdot 10^4$  Н) в соответствии с требованиями ГОСТ 9012 – 59.

Механические свойства при растяжении определяли на разрывной испытательной машине EU-40 с усилием в 10 т на разрывных цилиндрических образцах диам. 6 мм и начальной расчетной длиной рабочей части 30 мм, приготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685 – 2000 и ГОСТ 1497.

Испытание на ударный изгиб осуществляли на маятниковом копре МК-15 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454 на стандартных образцах размером  $10 \times 10 \times 55$  мм с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм.

Микроструктуру металла выявляли методом электролитического полирования поверхности микрошлифа в 5 %-ном уксусном растворе хлорной кислоты и травлением в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Измерение скорости охлаждения по сечению рельсовой пробы проводили при помощи специально подготовленного полнопрофильного темплета, отобранного от рельса типа Р65, с высверленными на глубине 5, 10 и 20 мм отверстиями. После нагрева темплета и выдержки до заданной температуры ( $\sim 900$  °С) предварительно подогретый конец термопары совмещали с отверстием в пробе и проводили ускоренное охлаждение по различным режимам.

### Определение скоростей охлаждения по сечению головки рельса

На рис. 2 представлено изменение средних скоростей охлаждения опытного металла на различном расстоянии от поверхности катания в зависимости от давления сжатого воздуха при

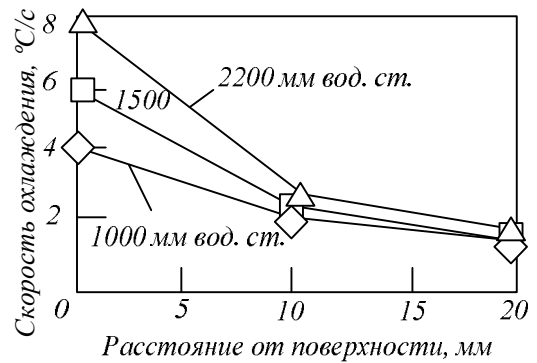


Рис. 2. Изменение средних скоростей охлаждения опытного металла на различном расстоянии от поверхности катания в зависимости от давления сжатого воздуха при охлаждении в интервале температур 770 – 670 °С

охлаждению в интервале температур 770 – 670 °С. Видно, что средняя скорость охлаждения в интервале перлитного превращения составляет порядка 4 – 8 °С/с на поверхности катания, 2,0 – 2,5 °С/с – на глубине 10 мм и 1,0 – 1,6 °С/с – на глубине 20 мм.

Температура конца охлаждения в зависимости от температуры нагрева и продолжительности охлаждения составила от 450 до 680 °С.

По завершении охлаждения в течение примерно 60 – 95 с происходит разогрев поверхности проб за счет теплоотдачи внутренних слоев. После выравнивания температуры скорость охлаждения внутренних и поверхностных слоев одинаковая и находится на уровне примерно 0,13 – 0,5 °С/с (рис. 3).

### Термическая обработка рельсовых проб из стали марки Э78ХСФ

Для проведения опытов по закалке на опытной установке отобрали пробы длиной 400 мм от рельсов типа Р65 из стали марки Э78ХСФ

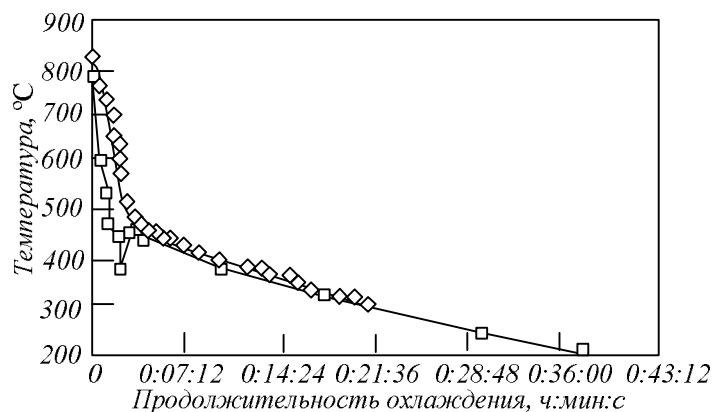


Рис. 3. Температура рельсов на поверхности (□) и на глубине 20 мм (◇) при охлаждении в течение 210 с при давлении сжатого воздуха 1000 мм вод. ст.

четырёх плавов, микролегированных ниобием, условно замаркированных как Л1 – Л4.

Закалку рельсовых проб длиной до 400 мм проводили после нагрева до температуры около 900 °С, выдержки при этой температуре в течение 30 мин, подстуживания до температуры начала охлаждения 770 – 870 °С. Охлаждение проводили при давлении 1000, 1500 и 2200 мм вод. ст. в течение 90 – 280 с. Режимы термической обработки и результаты механических испытаний представлены в табл. 1, откуда видно, что при охлаждении с давлением 1000 мм вод. ст. при температурах начала заковки менее 825 °С и продолжительности охлаждения менее 150 с опытный металл не удовлетворяет требованиям нового рельсового стандарта для рельсов категории ДТ350 в основном из-за низких прочностных свойств и твердости. Температура самоотпуска для металла, показавшего удовлетворительные значения свойств, не превышала 580 °С.

Микроструктура рельсового металла плавов Л1 – Л3 при указанных условиях охлаждения с поверхности на глубину до 2 и до 5 мм с поверхности выкружки имеет недопустимые участки бейнитной структуры. Далее по глубине микроструктура опытного металла состоит из тонкопластинчатого перлита, степень дисперсности которого уменьшается по мере удаления от поверхности. В микроструктуре металла плавки Л4 бейнит не выявлен.

С повышением давления до 1500 – 2000 мм вод. ст. значительно увеличиваются прочностные свойства и твердость опытного металла. Необходимый уровень свойств достигается при охлаждении в течение 110 с. При этом существенно увеличивается глубина бейнитного слоя с поверхности рельсовых проб, отобранных от рельсов с более высоким содержанием марганца и хрома. В микроструктуре металла плавки Л4 при указанном давлении бейнит не обнаружен.

Таким образом, по соотношению уровня механических свойств, твердости, ударной вязкости и микроструктуре оптимальным комплексом свойств обладает металл плавки Л4.

#### **Закалка проб рельсов текущего производства категории Т1 из стали марки Э76Ф**

В качестве сравнения с опытным металлом подвергли закалке четыре пробы, отобранные от рельсов из стали марки Э76Ф текущего производства категории Т1. Температура начала охлаждения составила 845 °С, продолжительность 130 – 180 с, давление воздуха 1500 и 2100 мм вод. ст.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что металл текущего производства категории Т1 из стали Э76Ф удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350 по уровню пластических свойств при растяжении и ударной вязкости, но имеет достаточно нестабильный уровень твердости на поверхности катания и по сечению, а также достаточно низкие значения временного сопротивления разрыву.

По сравнению с опытным металлом рельсы текущего производства имеют несколько пониженный уровень механических свойств и твердости, что обусловлено более низким содержанием в них элементов, повышающих устойчивость переохлажденного аустенита, и несколько более высокий уровень ударной вязкости, что может быть обусловлено влиянием ниобия.

Микроструктура металла рельсов текущего производства, закаленных на опытной установке, представляет собой тонкопластинчатый перлит без выделений зернограничного феррита.

**Выводы.** Оптимальный уровень свойств для рельсов типа Р65 категории ДТ350, соответствующий требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 из стали марки Э78ХСФ, достигается закалкой с отдельного нагрева от температур свыше 825 °С в течение не менее 150 с; при давлении 1500 – 2200 мм вод. ст. – в течение не менее 110 с. Повышение содержания элементов, увеличивающих устойчивость аустенита (хрома, марганца свыше 0,45 и 0,83 % соответственно), нецелесообразно, так как это приводит к появлению в микроструктуре нежелательной бейнитной структуры и повышенному уровню твердости на поверхности катания и по сечению. Рельсы текущего производства, закаленные на опытной установке с прокатного нагрева, показали удовлетворительные значения механических свойств и низкие показатели твердости, что обусловлено недостаточной охлаждающей способностью воздуха по сравнению с закалкой в масле для этой марки стали.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Дефекты и качество рельсовой стали / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев, Л.В. Корнева, Т.Н. Осколкова, В.В. Гаврилов. – М.: Теплотехник, 2006. – 218 с.
2. Ш у р Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
3. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов / В.В. Павлов, М.В. Темлянцев,



## Режимы термической обработки и свойства образцов рельсов типа Р65 опытного металла

| Плавка   | Проба | Температура, °С   |                   |                   | P, мм<br>вод. ст. | τ, с     | σ <sub>т</sub> ,<br>кгс/мм <sup>2</sup> | σ <sub>в</sub> ,<br>кгс/мм <sup>2</sup> | δ, % | ψ, % | КСУ <sub>20/-60</sub><br>Дж/см <sup>2</sup> | НВ <sub>пкг</sub> | НВ <sub>10</sub> | НВ <sub>22</sub> | НВ <sub>выкр 10</sub> |          | НВ <sub>ш</sub> | НВ <sub>подшва</sub> |     |
|--|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|---|---|------|------|---|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------|-----------------|----------------------|-----|
|  |       | T <sub>н.о.</sub> | T <sub>к.о.</sub> | T <sub>п.в.</sub> |                   |          |   |   |      |      |   |                   |                  |                  |                       |          |                 |                      |     |
| Л1   | 1     | 820               | 680               | 690               | 1000              | 90       | 56                                      | 103                                     | 19,5 | 58   | 66/-  | 297               | 295              | 286              | 288                   | 300      | 278             | 280                  | 277 |
|  | 2     | 860               | 600               | 615               | 1000              | 150      | 77                                      | 125                                     | 14,5 | 37   | 32/14                                       | 398               | 385              | 356              | 368                   | 388      | 335             | 347                  | 339 |
|  | 3     | 845               | 430               | 505               | 1000              | 210      | 87                                      | 132                                     | 14,0 | 48   | 17/11                                       | 401               | 388              | 359              | 385                   | 383      | 339             | 333                  | 326 |
|  | 4     | 780               | 365               | 460               | 1500              | 150      | 72                                      | 117                                     | 20,0 | 56   | 43/13                                       | 356               | 345              | 321              | 337                   | 333      | 302             | 290                  | 292 |
|  | 5     | 825               | 400               | 485               | 2100              | 150      | 100                                     | 136                                     | 11,0 | 50   | 20/3,7                                      | 398               | 380              | 345              | 368                   | 368      | 333             | 323                  | 321 |
| Л2   | 1     | 815               | 560               | 660               | 1000              | 90       | 55                                      | 103                                     | 18,0 | 56   | 66/12                                       | 315               | 306              | 292              | 300                   | 311      | 278             | 272                  | 275 |
|  | 2     | 845               | н/д               | 580               | 1000              | 150      | 80                                      | 128                                     | 13,0 | 45   | 35/25                                       | 375               | 370              | 354              | 363                   | 370      | 321             | 315                  | 319 |
|  | 3     | 800               | 385               | 466               | 1000              | 150      | 71                                      | 115                                     | 15,5 | 58   | 55/15                                       | 350               | 345              | 326              | 335                   | 333      | 306             | 298                  | 293 |
|  | 4     | 830               | 410               | 495               | 2200              | 150      | 65                                      | 114                                     | 17,0 | 48   | 27/11                                       | 401               | 388              | 354              | 375                   | 375      | 337             | 335                  | 329 |
|  | 5     | 845               | 430               | 540               | 1500              | 150      | 103                                     | 142                                     | 16,5 | 55   | 30/11                                       | 444               | 385              | 370              | 415                   | 415      | 359             | 368                  | 368 |
| Л3   | 1     | 845               | 430               | 545               | 1000              | 150      | 85                                      | 130                                     | 12,0 | 48   | 35/8,5                                      | 393               | 380              | 356              | 378                   | 378      | 333             | 329                  | 331 |
|  | 2     | 825               | 440               | 510               | 1000              | 180      | 86                                      | 128                                     | 13,0 | 48   | 31/11                                       | 398               | 383              | 352              | 380                   | 380      | 325             | 326                  | 323 |
|  | 3     | 780               | 375               | 460               | 2100              | 150      | 75                                      | 116                                     | 15,0 | 55   | 52/8,6                                      | 345               | 341              | 323              | 339                   | 337      | 298             | 288                  | 300 |
|  | 4     | 845               | 420               | 525               | 1500              | 160      | 99                                      | 137                                     | 15,0 | 52   | 23/9  | 432               | 395              | 378              | 398                   | 395      | 345             | 352                  | 354 |
|  | 5     | 845               | 300               | 386               | 1500              | 280      | 95                                      | 133                                     | 14,0 | 51   | 25/8,6                                      | 451               | 390              | 383              | 429                   | 415      | 343             | 356                  | 356 |
| Л4   | 1     | 815               |                   | 600               | 1000              | 150      | 62                                      | 112                                     | 15,5 | 47   | 43/-  | 341               | 341              | 325              | 335                   | 331      | 300             | 302                  | 302 |
|  | 2     | 845               | 490               | 530               | 1000              | 180      | 85                                      | 126                                     | 15,5 | 51   | 25/7,2                                      | 366               | 366              | 354              | 368                   | 368      | 315             | 323                  | 321 |
|  | 3     | 840               | 400               | 520               | 2100              | 150      | 87                                      | 130                                     | 17,5 | 52   | 17/11                                       | 378               | 380              | 352              | 383                   | 380      | 329             | 337                  | 335 |
|  | 4     | 830               | 446               | 600               | 1500              | 110      | 89                                      | 128                                     | 16,5 | 51   | 26/8,4                                      | 378               | 383              | 361              | 385                   | 388      | 341             | 343                  | 343 |
|  | 5     | 830               | 425               | 535               | 2100              | 135      | 88                                      | 130                                     | 16,0 | 51   | 16/9,7                                      | 380               | 380              | 356              | 388                   | 385      | 341             | 350                  | 345 |
| Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350 |       |                   |                   |                   |                   | Не менее |   |   |      |      | 352-401                                     | Не менее          |                  |                  |                       | Не более |                 |                      |     |
|  |       |                   |                   |                   |                   | 82       | 126                                     | 9,0                                     | 25,0 | 15   |   | 341               | 321              | 341              | 341                   | 363      |                 |                      |     |

Примечание. Здесь и в табл. 2 T<sub>н.о.</sub>, T<sub>к.о.</sub> и T<sub>п.в.</sub> – температуры начала, конца охлаждения и после выравнивания; P – давление сжатого воздуха; τ – продолжительность охлаждения; КСУ<sub>20/-60</sub> – испытание на ударный изгиб при температурах 20 и –60 °С.

**Режимы воздушно-струйной термической обработки и свойства образцов рельсов типа Р65 из металла текущего химического состава стали марки Э76Ф**

| Проба  | Температура       |                   |                   | P, мм<br>вод. ст. | τ, с | σ <sub>т</sub> ,<br>кгс/мм <sup>2</sup> | σ <sub>в</sub> ,<br>кгс/мм <sup>2</sup> | δ, % | ψ, % | КСУ <sub>20/-60</sub><br>Дж/см <sup>2</sup> | НВ <sub>пкг</sub> | НВ <sub>10</sub> | НВ <sub>22</sub> | НВ <sub>выкр 10</sub> |          | НВ <sub>ш</sub> | НВ <sub>подошва</sub> |     |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|---|---|------|------|---|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------|-----------------|-----------------------|-----|
|  | T <sub>н.о.</sub> | T <sub>к.о.</sub> | T <sub>п.в.</sub> |                   |      |   |   |      |      |   |                   |                  |                  |                       |          |                 |                       |     |
| 1  | 845               | 395               | 480               | 2100              | 150  | 85                                      | 119                                     | 15   | 47   | 31/31                                       | 347               | 343              | 325              | 341                   | 341      | 302             | 307                   | 307 |
| 2  | 845               | 400               | 580               | 1500              | 130  | 82                                      | 124                                     | 16,5 | 46   | 36/23                                       | 359               | 356              | 341              | 356                   | 356      | 307             | 321                   | 319 |
| 3  | 845               | 380               | 540               | 1500              | 150  | 84                                      | 120                                     | 15,5 | 46   | 36/24                                       | 343               | 349              | 337              | 343                   | 343      | 302             | 313                   | 311 |
| 4  | 845               | 350               | 460               | 1500              | 180  | 84                                      | 124                                     | 15,5 | 45   | 34/12                                       | 359               | 359              | 350              | 359                   | 359      | 319             | 331                   | 333 |
| Требования ГОСТ Р 51685 – 2013 для рельсов категории ДТ350 |                   |                   |                   |                   |      | Не менее                                |   |      |      |   | 352 –<br>401      | Не менее         |                  |                       | Не более |                 |                       |     |
|  |                   |                   |                   |                   |      | 82                                      | 126                                     | 9,0  | 25,0 | 15  |                   | 341              | 321              | 341                   | 341      | 363             |                       |     |

- Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин. – М.: Теплотехник, 2007. – 280 с.
4. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути. – М.: Интекст, 2002. – 208 с.
  5. Масару Уэда, Кацую Иванов, Такэси Ямамото. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки Nippon Steel // Инженерные решения. 2012. Январь. С. 9 – 11.
  6. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Аткинова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38 – 42.

© 2014 г. К.В. Волков, Е.В. Полевой, М.В. Темлянецв, О.П. Аткинова, А.М. Юнусов, А.Ю. Сюсюкин  
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

*Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова*

Волгоградский государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОСЛОЙКИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МАГНИЕВО-АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ\*

При сварке плавлением магния с алюминием образуются хрупкие интерметаллиды, резко снижающие работоспособность конструкций, поэтому обычно используются сваренные взрывом магниево-алюминиевые переходники [1] различных конструкций. Наиболее часто используют два типа соединений: 1) композиция МА2-1-АД1-АМг6, применяемая для эксплуатации при температурах от  $-196$  до  $+100$  °С, не допускающая при дуговой сварке перегрева границы АД1-МА2-1; 2) четырехслойная композиция МА2-1-ВТ1-0-АД1-АМг6, рассчитанная на эксплуатацию в диапазоне температур от  $-196$  до  $+500$  °С. Прочность таких соединений в направлении, нормальном границе раздела слоев, определяется свойствами наиболее слабого из составляющих материалов, которым обычно является прослойка алюминия, играющим роль буфера пластичности и диффузионного барьера. С уменьшением толщины прослойки (ее обычно характеризуют относительной толщиной  $\chi = h/d$ , где  $h$  – толщина прослойки,  $d$  – диаметр испытываемого образца) начинает проявляться

эффект контактного упрочнения. Для расчета прочности композитов с мягкими прослойками ранее разработан графоаналитический метод [1, 2], обеспечивающий приемлемые для практики результаты. После разработки метода конечных элементов и создания на его основе пакетов компьютерных программ, например SIMULIA/ABAQUS, появилась возможность более точного моделирования поведения различных процессов – от гидродинамических потоков расплавов металлов [3] и температурных полей в нагреваемых слябах под прокатку [4] до деформации композиционных материалов с резко различающимися по прочностным характеристикам слоями.

Целью настоящей работы являлась верификация моделирования с использованием пакета компьютерных программ SIMULIA/ABAQUS поведения при растяжении магниево-алюминиевых композитов с мягкой прослойкой при нормальной и повышенных температурах.

Для верификации результатов моделирования был изготовлен сваркой взрывом слоистый композит МА2-1-АД1-АМг6, в котором толщина алюминиевого подслоя изменялась в диапазоне  $0,1 - 1,5$  мм, а толщины магниевого

\* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00418).

и алюминиевого сплавов оставались неизменными (соответственно 20 и 10 мм). Оптимизированные параметры сварки взрывом трехслойной композиции обеспечивали прочность сварных соединений на уровне прочности алюминия (с учетом повышения этого показателя из-за роста плотности дислокаций при взрывном нагружении и контактного упрочнения). Отжиг композиционного материала при 100 °С в течение 1 ч частично устранял взрывное упрочнение алюминия.

Из трехслойного материала МА2-1-АД1-АМг6 в состоянии после сварки и отжига механически вырезали стандартные цилиндрические образцы для испытаний на растяжение (длина рабочей части 20 мм), ось которых перпендикулярна поверхностям соединения слоев. Результаты испытаний на растяжение по нормали к линии соединения показали [5], что с уменьшением относительной толщины алюминиевого подслоя  $\chi = h/d$  прочность трехслойного материала после сварки и термической обработки постепенно возрастала от 100 – 120 МПа при  $\chi = 0,5$  до 200 МПа при  $\chi = 0,03$  (рис. 1). Разрушение образцов при  $\chi = 0,03$  происходило по сплаву магния МА2-1, и прочность композита уже не определялась прочностью алюминиевой прослойки. При  $\chi > 0,2$  продольная остаточная деформация преимущественно локализовалась в алюминии, определяющим пластичность всего соединения. Уменьшение  $\chi$

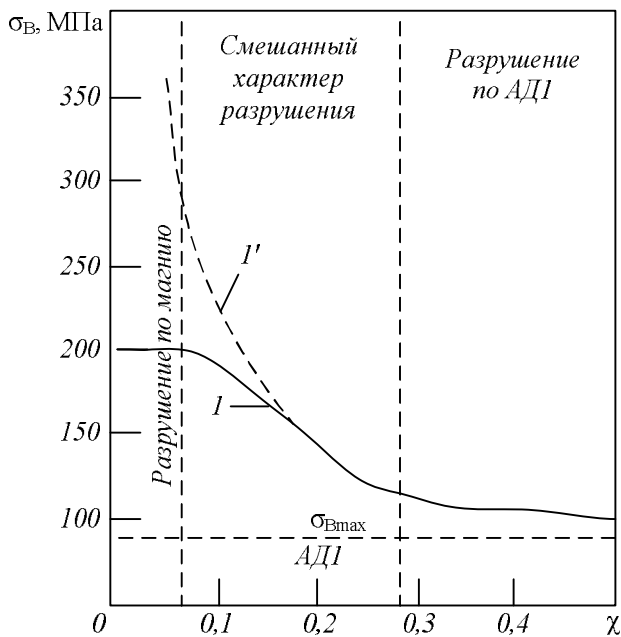


Рис. 1. Зависимость прочности композита после термической обработки при 100 °С в течение 1 ч от относительной толщины алюминиевого слоя:  
I и I' – экспериментальная и расчетная кривые

до 0,07 приводило к стеснению пластической деформации в сплаве АД1, постепенному снижению общей пластичности и заметному вовлечению сплавов МА2-1 и АМг6 в пластическую деформацию, в основном, в приконтактной с прослойкой АД1 области.

Верификация моделирования процессов деформирования и разрушения при растяжении цилиндрического образца диам. 6 мм трехслойного магниево-алюминиевого композита МА2-1-АД1-АМг6 методом конечных элементов проверялась с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systemes Simulia Corp. (USA), использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали модель Джонсона-Кука [6], согласно которой предел текучести определяется формулой

$$\sigma_Y = \left( A + B \varepsilon_p^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (1)$$

где  $A$  – предел текучести неупрочненного материала;  $B$  – коэффициент упрочнения при деформировании;  $C$  – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования;  $\varepsilon_p$  – эффективная пластическая деформация;  $T_m$  – температура плавления;  $T_r$  – комнатная температура;  $n, m, \varepsilon_0$  – параметры модели;  $\dot{\varepsilon}_0$  и  $\dot{\varepsilon}_p$  – первые производные по времени величин  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_p$ .

Формула (1) по сути представляет собой кривую деформирования материала. Для описания разрушения материала использовалась модель Джонсона-Кука [7], согласно которой разрушение конечного элемента происходит, когда параметр поврежденности  $D$  становится равным единице:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i; \quad (2)$$

здесь  $\Delta \varepsilon_p^i$  – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на  $i$ -м шаге интегрирования по времени; величина  $\varepsilon_f$  вычисляется по формуле

$$\varepsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left( 1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \times \left( 1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (3)$$

где  $D_1, \dots, D_5$  – параметры материала;  $\sigma_{ef}$  – эффективное напряжение;  $p$  – давление в рассматриваемом конечном элементе.

Значения параметров для выбранных материалов, взятые из работ [8, 9], приведены в табл. 1, 2. В связи с низкой скоростью деформирования ( $\dot{\varepsilon}_p < 0,0025 \text{ с}^{-1}$ ) ее влияние не учитывалось.

Цилиндрическая форма образцов позволяла задавать элементы композита в виде деформируемых осесимметричных тел [10] и рассчитывать напряжения и деформации в радиальном сечении, что значительно сокращало время моделирования. Относительная толщина прослойки АД1 варьировалась от  $\chi_{\text{АД1}} = 0,66$  (4 мм) до  $\chi_{\text{АД1}} = 0,033$  (0,1 мм), а толщины слоев сплавов АМг6 и МА2-1 составляли 10 мм. Прочность связей между слоями соответствовала прочности наименее прочного элемента пары. Размер сторон квадратных ячеек конечно-элементной сетки в элементах композита из сплавов АМг6 и МА2-1 составлял 0,10 мм. Размер прямоугольных ячеек в мягкой прослойке АД1 в радиальном направлении соответствовал размерам ячеек сплавов АМг6 и МА2-1, а в осевом направлении составлял 1/40 толщины мягкой прослойки. Моделируемая скорость растяжения образца составляла 0,02 мм/с. Различия в поведении композита

определялись при температурах от нормальной до 300 °С.

Полученные при моделировании значения предела прочности композитов МА2-1–АД1–АМг6 при различных относительных толщинах прослойки  $\chi_{\text{АД1}}$  хорошо коррелируют с экспериментально определенными величинами для композита, отожженного при 100 °С в течение 1 ч (рис. 1). Проведенное моделирование показало изменение характера деформирования и разрушения основных слоев композита при варьировании относительной толщины мягкой прослойки (рис. 2, 3), причем характер зависимости во многом определяется температурой испытания. При нормальной температуре в области  $\chi_{\text{АД1}} > 0,016$  разрушение при моделировании происходило по прослойке АД1, но уменьшение ее относительной толщины сопровождалось ростом пластической деформации в магниевом сплаве МА2-1 с образованием шейки в сплаве Мг6 при  $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$  (рис. 2, а).

Увеличение температуры приводило к снижению общей прочности композита и сохранению разрушения по алюминиевой прослойке даже при  $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$  (рис. 3, а). Кривые деформация – напряжения при различных температурах для композиционных образцов с относительными толщинами алюминиевой прослойки  $\chi_{\text{АД1}} = 0,016$  и  $\chi_{\text{АД1}} = 0,667$  показаны на рис. 4. Повышение температуры снижало расчетную прочность композиционных образцов. Зависимость максимального удлинения образца от температуры испытаний имеет более сложный характер: при использовании мягкой прослойки больших толщин (рис. 4, б) повышение температуры способствует быстрой

Т а б л и ц а 1

**Использованные коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [6]**

| Материал                        | $A$ , МПа | $B$ , МПа | $m$   | $n$  | $\dot{\varepsilon}_0$ , $\text{с}^{-1}$ | $T_m$ , К | $T_r$ , К |
|---------------------------------|-----------|-----------|-------|------|---|-----------|-----------|
| Сплав АМг6                      | 218,3     | 704,6     | 0,93  | 0,62 | 1                                       | 773       | 293       |
| Алюминий                        | 60,0      | 6,4       | 0,859 | 0,62 | 1                                       | 933       | 293       |
| Сплав МА2-1<br>(аналог AZ31В-О) | 100,0     | 380       | 1,04  | 0,28 | 1                                       | 773       | 293       |

Т а б л и ц а 2

**Использованные коэффициенты для модели разрушения Джонсона–Кука [7]**

| Материал                        | $D_1$ | $D_2$  | $D_3$   | $D_4$  | $D_5$ | $\dot{\varepsilon}_0$ , $\text{с}^{-1}$ | $T_m$ , К | $T_r$ , К |
|---------------------------------|-------|--------|---------|--------|-------|---|-----------|-----------|
| Сплав АМг6                      | 0,178 | 0,389  | -2,246  | 0      | 0     | 1                                       | 873       | 293       |
| Алюминий                        | 0,071 | 1,428  | -1,142  | 0,0097 | 0     | 1                                       | 933       | 293       |
| Сплав МА2-1<br>(аналог AZ31В-О) | -0,35 | 0,6025 | -0,4537 | 0,206  | 7,2   | 1                                       | 773       | 293       |

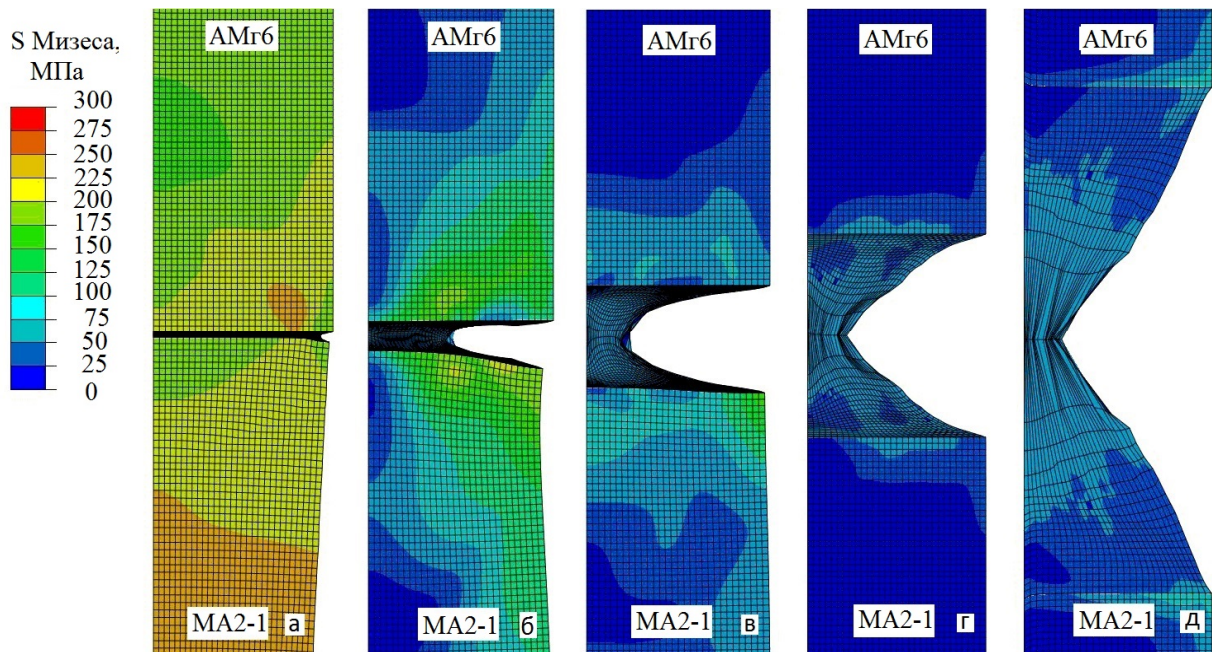


Рис. 2. Изменение характера деформирования в композите МА2-1–АД1–АМг6 ячеек слоев МА2-1 и АД1 при нормальной температуре и варьировании относительной толщины мягкой прослойки  $\chi_{АД1}$ :  
 $a - \chi_{АД1} = 0,016$ ;  $б - \chi_{АД1} = 0,033$ ;  $в - \chi_{АД1} = 0,067$ ;  $г - \chi_{АД1} = 0,166$ ;  $д - \chi_{АД1} = 0,667$

локализации деформации в формирующейся шейке и, соответственно, снижению относительного удлинения. Для прослойки с  $\chi_{АД1} = 0,016$  (рис. 4, а) наименьшие значения относительного удлинения получены в интервале моделируемых температур 100 – 200 °С вследствие уменьшения вовлечения магниевого сплава в пластическую деформацию.

Полученные результаты указывают на необходимость тщательного подхода к выбору толщины технологической прослойки АД1 в трехслойном композите МА2-1–АД1–АМг6, вклю-

чая математическое моделирование поведения изделия из композиционного материала при возможных схемах нагружения, для обеспечения необходимого запаса пластичности материала в условиях эксплуатации. Вместе с тем практическое получение слоя АД1 в 100 мкм в композиционном материале МА2-1–АД1–АМг6 затруднено даже в случае использования при сварке взрывом не листового алюминия, а предварительно сваренной взрывом и прокатанной трехслойной прослойки МА2-1–АД1–АМг6 с расчетным соотношением слоев

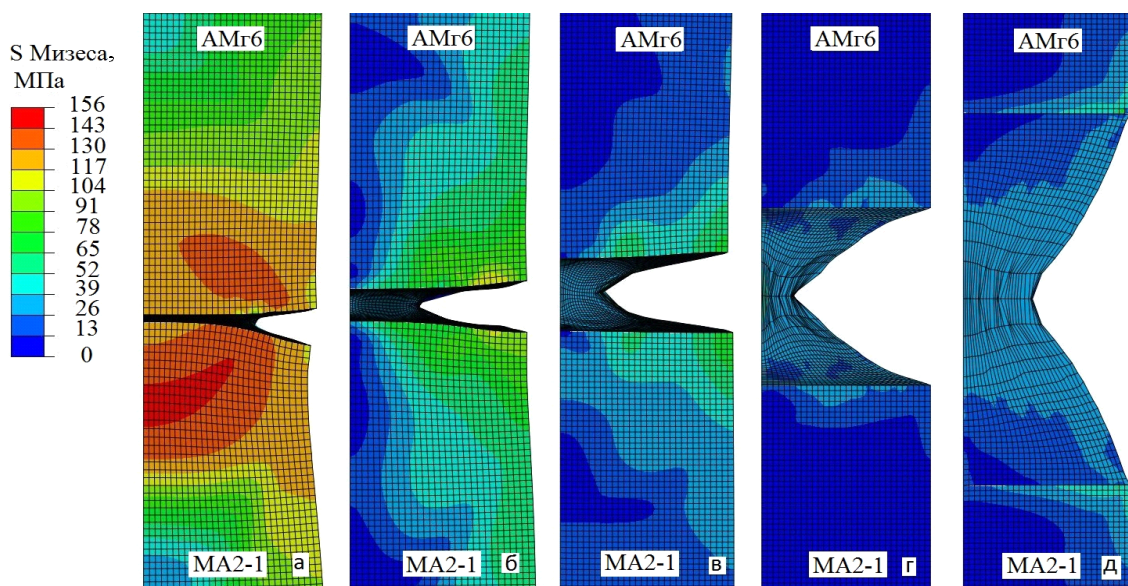


Рис. 3. Изменение характера деформирования в композите МА2-1–АД1–АМг6 ячеек слоев МА2-1 и АД1 при температуре 300°С и варьировании относительной толщины мягкой прослойки  $\chi_{АД1}$ :  
 $a - \chi_{АД1} = 0,016$ ;  $б - \chi_{АД1} = 0,033$ ;  $в - \chi_{АД1} = 0,067$ ;  $г - \chi_{АД1} = 0,166$ ;  $д - \chi_{АД1} = 0,667$



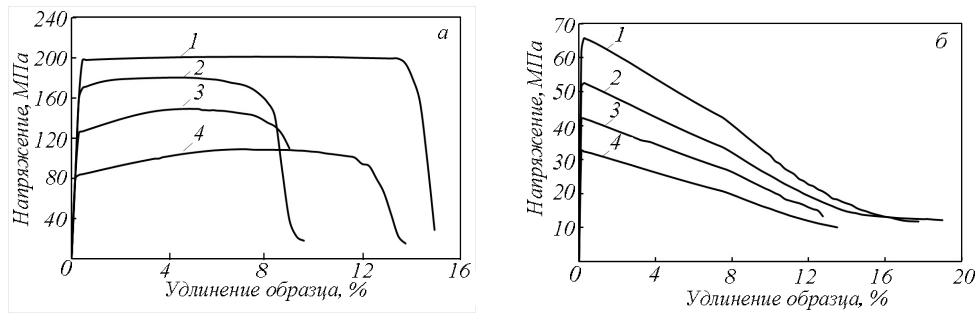


Рис. 4. Кривые деформация – напряжения при различных температурах для композиционных образцов МА2-1-АД1-АМг6 с относительными толщинами алюминиевой прослойки  $\chi_{АД1} = 0,016$  (а) и  $\chi_{АД1} = 0,667$  (б):  
1 – нормальная температура; 2 – 100 °С; 3 – 200 °С; 4 – 300 °С

по аналогии с ранее созданной технологией получения четырехслойного композита титан – ниобий – медь – сталь [11]. Причиной этого является ухудшение при прокатке условий совместной деформации слоев, вызывающей в конечном счете разрушение по границе АД1–МА2-1 или по магниевому сплаву МА2-1 вследствие снижения его деформационной способности по мере увеличения обжатия.

**Выводы.** Сравнением с экспериментальными данными верифицированы результаты моделирования с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus поведения в процессе осевого растяжения нормально к линии соединения при комнатных и повышенных температурах трехслойной композиции МА2-1-АД1-АМг6 с различными толщинами мягкой прослойки. Методами конечно-элементного моделирования подтверждено, что уменьшение относительной толщины алюминиевой прослойки приводит к росту прочности композита с локализацией пластической деформации в алюми-

ниевом сплаве АД1. Только при относительной толщине  $\chi_{АД1} \leq 0,033$  начинается заметное деформирование алюминиевого сплава АМг6, увеличивающееся по мере роста температуры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. – М.: Металлургия, 2004. – 230 с.
2. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Проничев Д.В. Композиционные переходники. – Волгоград: РПК «Политехник», 2007. – 328 с.
3. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Комшук В.П., Ганзер Л.А. Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 12. С. 15 – 21.

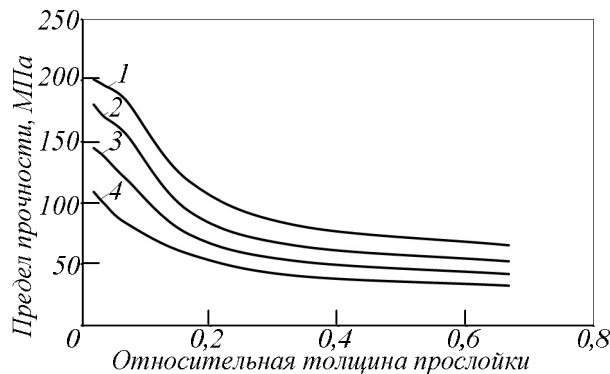


Рис. 5. Зависимость определенного при моделировании временного сопротивления разрыву от относительной толщины алюминиевой прослойки в композите АМг6-АД1-МА2-1:  
1 – нормальная температура; 2 – 100 °С; 3 – 200 °С; 4 – 300 °С

4. Перетяtko В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Нагрев стальных слябов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150100 – Металлургия. – М.: Теплотехник, 2008. – 178 с.
5. Гуревич Л. М., Трыков Ю.П., Арисова В.Н., Пономарева И.А., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения в магниево-алюминиевых композитах // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 72 – 76.
6. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541 – 547.
7. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. P. 31 – 48.
8. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона–Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 32 – 43.
9. Giraud E., Rossi F., Germain G., Outeiro J.C. Constitutive Modelling of AZ31B-O Magnesium Alloy for Cryogenic Machining // 14<sup>th</sup> CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), (CIRP CMMO), Italy (2013). DOI : 10.1016/j.procir. 2013.06.144.
10. Abaqus 6.12. Analysis User's Manual. Vol. 1. Part 1. Introduction, spatial modeling and execution. DassaultSystemesSimulia Corp., Providence, RI, USA, 2012. – 831 p.
11. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Голик А.А. Моделирование контактного упрочнения титано-стального композита с мягкой прослойкой // Известия ВолгГТУ. Серия Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. Вып. 9. № 9 (136). 2014. С. 68 – 72.

© 2014 г. Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, А.А. Голик, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова  
Поступила 28 августа 2014 г.

УДК 669.162.12:622

**В.М. Павловец**

Сибирский государственный индустриальный университет

## **ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ**

Технологическая схема производства железорудных окатышей включает в себя окомкование шихты с получением влажных окатышей на низкотемпературной стадии процесса и упрочняющую термическую обработку окомкованного сырья на высокотемпературной стадии технологии, после которой окисленные окатыши пригодны для длительной транспортировки к потребителям и для последующей плавки или металлургической. Упрочняющая термическая обработка окатышей в режимах сушки, подогрева и обжига с использованием 100 % технологического топлива (20 – 25 м<sup>3</sup>/т) и 80 % электро-

энергии (5 – 10 кВт·ч/т) осуществляется на обжиговых конвейерных машинах, где и происходит основное структурообразование (формируется пористость, межчастичная минеральная связка). Процессы формирования формы и размеров пор, характера (открытая, закрытая) пористости при обжиге являются трудноконтролируемыми, поскольку на них накладываются многочисленные сопутствующие физико-химические процессы. Окомкование влажной железорудной шихты на низкотемпературной стадии технологии в окомкователе свободно от внешнего теплового и струк-



турообразующего воздействия. При использовании перспективных методов струйного теплосилового воздействия на комкуемую шихту и новых функциональных возможностей окомкователей разных типов [1 – 5] можно снизить затраты на тепловую обработку окатышей, увеличить производительность технологических агрегатов и сформировать оптимальную для последующего обжига и заключительной восстановительно-тепловой обработки структуру.

В металлургии широко используются многофазные струи, которые состоят из потока твердых и (или) жидких частиц, рассредоточенных в высоконапорном газообразном энергоносителе (сжатом или вентилятором воздухе, остром паре, продуктах факельного сжигания топлива, высокотемпературной плазме). Трехфазные струи применяют для нанесения защитных, теплоизоляционных и упрочняющих покрытий, которые позволяют изменять свойства изделия. При использовании этих технологий можно получить плотный напыленный слой твердых частиц на поверхностях металлов, футеровок и ограждений без участия механических систем [6, 7]. Двухфазные (жидкости в потоке газа) струи широко используют для распыливания жидкостей и интенсификации охлаждения нагретых поверхностей.

Целью настоящей работы является исследование принципов структурообразования, основанных на струйной теплосиловой обработке влажной шихты на низкотемпературной стадии технологии формирования окатышей.

При работе окомкователя по рассматриваемой технологии (зародышеобразование напылением и доокомкование (ЗНД)) [8 – 10] на днище тарели в рабочей зоне окомкователя из влажной шихты формируется шихтовый гарнисаж (ШГ), который выходит на поверхность холостой зоны в верхней четверти тарели. На гарнисаж низкотемпературными воздушно-шихтовыми струями (ВШС) напыляется влажная шихта (расход  $G_{ш1}$ ). Постепенно формируется плотный напыленный слой, который вместе с верхней частью гарнисажа принудительно разделяется на множество зародышевых фрагментов и «очищается» до заданной толщины; в результате получается шихтовая матрица для получения зародышей с управляемой структурой (рис. 1).

Зародыши – это прочные (не менее 40 – 80 кПа) сформованные из влажной шихты кусковые тела, способные перекачиваться по гарнисажу и при накатывании на поверхность шихтовой мелочи обеспечить рост оболочки окатышей. Для получения зародышей на поверхности напыленного слоя металлическими

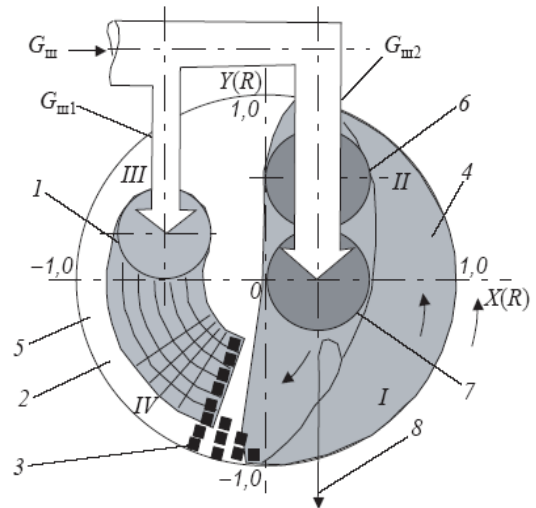


Рис. 1. Схема получения окатышей способом принудительного зародышеобразования:

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

делителями, установленными в нижней части холостой зоны тарели, наносят продольные, а затем поперечные разрезы глубиной до 5 – 10 мм. Зародыши, сцепленные с гарнисажем, срезаются (очищаются) с его поверхности для получения кусков, близких по форме к сферокубу или сферопризме. Из холостой зоны окомкователя зародыши поступают в рабочую зону, где увлажняются и комкуются влажной шихтой потока (расход которой составляет  $G_{ш2}$ ) до размеров кондиционных окатышей.

Воздушно-шихтовая струя формируется в технологическом пространстве между разгрузочным узлом питательного конвейера и днищем окомкователя и создает структурообразующие и энергетические воздействия на сырую шихту потока и плотный напыленный слой в холостой зоне окомкователя. При ударе влажной шихты о гарнисаж ее кинетическая энергия трансформируется в энергию формирования напыленного слоя, сопровождаемого уплотнением (2400 – 3600 кг/м<sup>3</sup>), упрочнением (до 200 МПа) и частичным обезвоживанием напыленного слоя. Влажность слоя, из которого формируются зародыши, на 0,3 – 0,7 % ниже влажности загружаемой шихты при работе на холодном (20 – 30 °С) сжатом воздухе. Использование сжатого воздуха с температурой 140 – 150 °С (полученного, например, в компрессоре без охладителя) или подогрев его в рекуперативном теплообменнике до 180 – 200 °С позволяет снизить влажность на 2,5 – 3,2 %. Часть шихты (5 – 20 %) в виде выбросов из зоны напыления поступает в рабочее про-

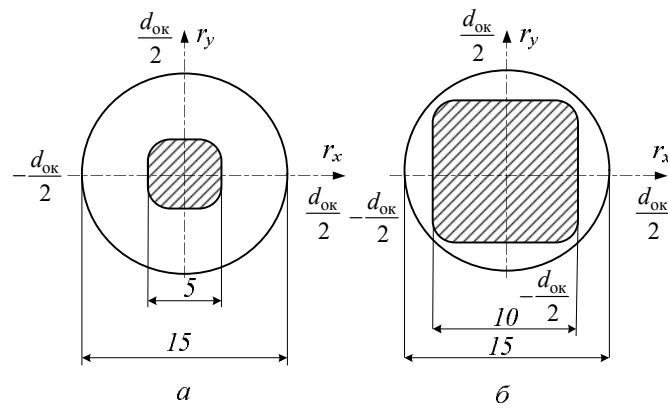


Рис. 2. Схема окатыша, сформированного на зародышах (заштрихованная область – зародыш, незаштрихованная – оболочка окатыша) при использовании зародышей размером 5 мм (а) и 10 мм (б)

странство окомкователя и участвует в процессе окомкования.

Влажные окатыши по технологии ЗНД структурно состоят из расположенных в их центре (сердцевине) зародышей влажностью  $W_{зр} = (0,92 \div 0,94)W_{ш}$  и плотностью  $\rho_{зр} = 2400 - 3200 \text{ кг/м}^3$  и шихтовой оболочки влажностью  $W_{об} = (1,0 \div 1,1)W_{ш}$  и плотностью  $\rho_{об} = 3200 \div 3600 \text{ кг/м}^3$  (рис. 2) (здесь и далее индексы «зр», «ш» и «об» означают зародыши, загружаемая шихта и шихтовая оболочка).

Эксперименты проводили на лабораторном окомкователе диам. 0,62 м, работающем с частотой 6 об/мин и наклоненном к горизонту под углом 45°. Шихту Тейского железорудного концентрата (диаметр частиц  $d_{ч} = 0,068 \text{ мм}$ , влажность 8,25 %, расход 0,01 кг/с) напыляли струйным аппаратом с относительного расстояния  $L/d_{са}$  5, 10 и 15 (где  $L$  и  $d_{са}$  – расстояние от среза сопла до гарнисажа и диаметр сопла струйного аппарата, м). Угол атаки к гарнисажу составлял 90°. Схема отбора проб и направление фото- и видеосъемки показаны на рис. 3.

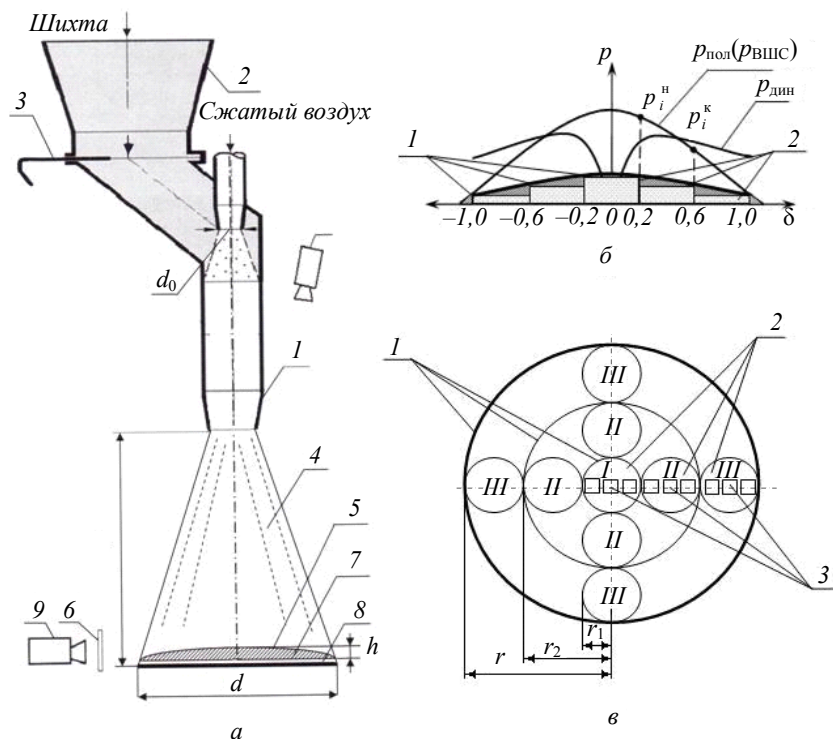


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для видеосъемки процесса напыления влажной шихты на контрастную поверхность (а), поле давлений струи на поверхности напыленного слоя (б) и схема взятия образцов в зонах I – III (в):

- а: 1 – струйный аппарат; 2 – бункер шихты; 3 – шибер; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; 6 – защитный стеклянный экран; 7 – контрастная основа; 8 – опора; 9 – видеокамера;  
 б и в: 1 – границы зон; 2 – расположение образцов в зонах; 3 – места фотосъемки

Методика отбора проб напыленного слоя для анализа пористости образцов подробно описана в работах [11, 12]. В первой серии опытов определяли плотность и пористость образцов в зависимости от безразмерного текущего радиуса  $\delta = r_i/r$  (где  $r_i$  и  $r$  – текущее значение радиуса и радиус напыленного слоя, м;  $i$  – порядковый номер зоны) и параметра  $L/d_{ca}$ . Зона I ( $\delta_1 = 0 \div 0,2$ ) находилась в центре (на оси струи) в круге радиусом  $r_1$ . Зона II ( $\delta_2 = 0,2 \div 0,6$ ) занимает кольцевое пространство вокруг зоны I, ограниченное внутренним радиусом  $r_1$  и наружным радиусом  $r_2$ . Периферийная зона III ограничена кольцом радиусами  $r_2$  и  $r$  ( $\delta_3 = 0,6 \div 1,0$ ). Пористость (открытую  $P_{отк}$ , закрытую  $P_3$  и общую  $P_o$ , %) определяли по стандартной методике (ГОСТ 25732 – 88 Методика определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости), дублируя результаты в нескольких сериях экспериментов. Результаты опытов первой серии экспериментов представлены в таблице.

Во второй серии опытов по вышеприведенной методике получали сферокубические зародыши размерами (высота ребра) 5, 10, 12 мм и средней плотностью  $2910 \text{ кг/м}^3$ , полученные делением напыленного слоя в центральной зоне. Напыленный слой формировали на тарели ( $X(R) = 0,5$ ). Зародыши доокомковывали в режиме переката до окатышей размером 16 мм. Полученные окатыши обжигали при температуре  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. Исследовали влияние соотношения массы зародыша в окатыше ( $m_{зр}/m_{ок}$ ) на плотность и пористость (рис. 4).

Общая и открытая пористость напыленного слоя возрастают пропорционально увеличению  $L/d_{ca}$ , падению среднего давления ВШС ( $P_{вшс}$ ) и росту координаты  $\delta$  в направлении от оси к периферии. Для объяснения полученных результатов провели анализ макроструктуры поверх-

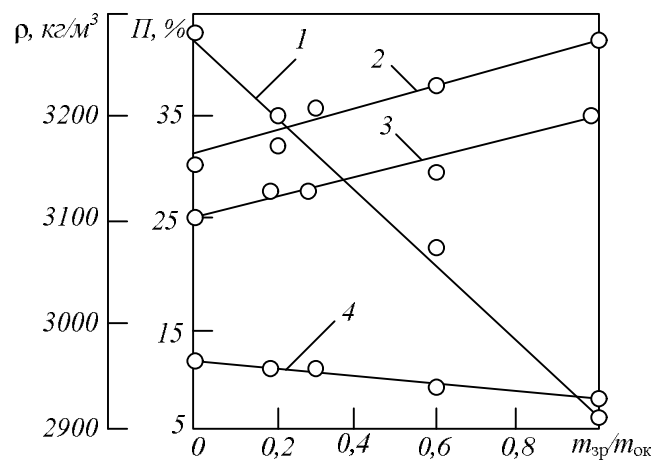


Рис. 4. Зависимость кажущейся плотности и пористости обожженных окатышей от массовой доли зародышей в окатышах (соотношение  $m_{зр}/m_{ок} = 1$  соответствует структуре зародыша, а  $m_{зр}/m_{ок} = 0$  соответствует структуре окатыша):

1 – кажущаяся плотность окатышей; 2, 3 и 4 – общая, открытая и закрытая пористость

ности свежеполученного напыленного слоя (рис. 5).

В процессе напыления влажной шихты на поверхности напыленного слоя формируются концентрические извилистые поры, глубина и форма которых зависят от зоны этого слоя, влажности, расхода шихты и параметров струйного процесса ( $L/d_{ca}$ , угла атаки, содержания шихты в ВШС). Формирование пор обусловлено сдвиговой деформацией влажной шихты, которая, в свою очередь, связана с величиной и характером динамического давления ( $P_{дин}$ ) воздуха, движущегося на поверхности напыленного слоя. Как видно (рис. 3), динамическое давление воздуха меняется от нуля на оси до максимального значения в зоне II ( $\delta = 0,3 \div 0,4$ ), после чего падает до минимума в зоне III. При течении воздуха на поверхности напыленного слоя возникают силы трения,

**Пористость образцов после их обжига при температуре  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 мин (через косую приведены значения при  $L/d_{ca}$  5, 10 и 15)**

| $X(R)$ | $\delta$  | $\rho_{каж}$ , кг/м <sup>3</sup> | $P_o$ , %      | $P_{отк}$ , %  | $P_3$ , %    |
|--------|-----------|----------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| 0      | 0 – 0,2   | 3240/2916/2630                   | 34,4/40,1/46,7 | 24,3/30,4/38,6 | 10,1/9,7/8,1 |
|        | 0,2 – 0,6 | 3110/2810/2585                   | 37,0/43,1/47,7 | 26,9/33,6/40,5 | 10,0/9,5/7,2 |
|        | 0,6 – 1,0 | 2960/2705/2512                   | 40,0/45,2/49,1 | 30,6/36,2/42,6 | 9,4/9,0/6,5  |
| 0,5    | 0 – 0,2   | 3148/2820/2558                   | 36,2/42,9/48,2 | 26,0/34,1/40,9 | 10,2/8,8/7,3 |
|        | 0,2 – 0,6 | 3006/2715/2510                   | 39,1/45,0/49,1 | 29,9/37,4/42,1 | 9,2/7,6/7,0  |
|        | 0,6 – 1,0 | 2854/2612/2460                   | 42,2/47,1/50,2 | 33,1/38,7/43,8 | 9,1/8,4/6,4  |
| 0,9    | 0 – 0,2   | 3105/2770/2522                   | 37,1/43,9/48,9 | 27,5/36,1/41,8 | 9,6/7,8/7,1  |
|        | 0,2 – 0,6 | 2954/2665/2480                   | 40,2/46,0/49,8 | 31,2/38,4/42,8 | 9,0/7,6/7,0  |
|        | 0,6 – 1,0 | 2802/2586/2426                   | 43,2/47,6/50,9 | 34,7/41,1/44,7 | 8,5/6,5/6,2  |

Примечание.  $P_o = (1 - \rho_{каж}/\rho_{ист})100 \%$ ,  $\rho_{ист} = 4936 \text{ кг/м}^3$ .

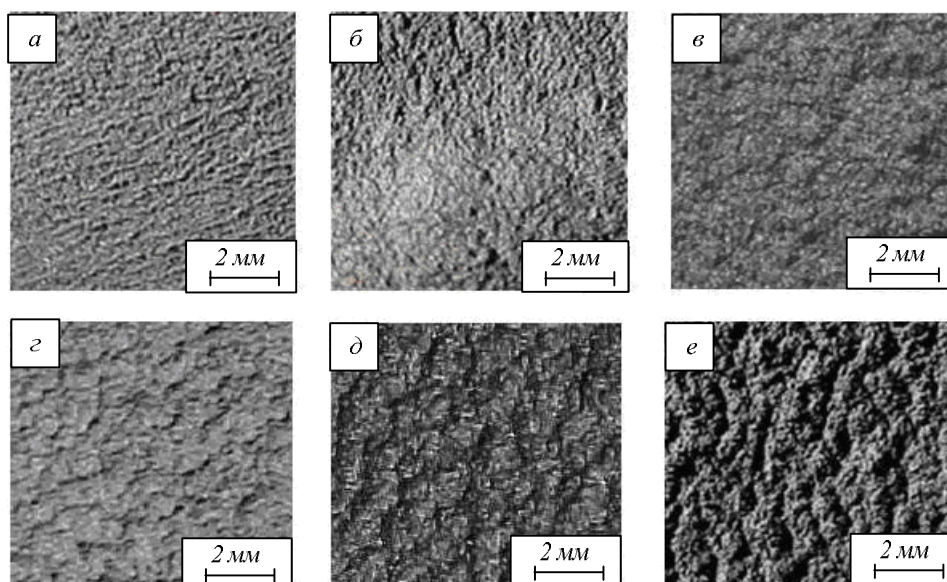


Рис. 5. Макроструктура напыленного слоя:

*a* – шихтовый гарнисаж; *b* –  $\delta = 0$ ;  $\beta = 90^\circ$ ; *в* –  $\delta = 0,2$ ;  $\beta = 90^\circ$ ; *г* –  $\delta = 0,5$ ;  $\beta = 90^\circ$ ; *д* –  $\delta = 0,5$ ;  $\beta = 45^\circ$ ; *e* –  $\delta = 0,6$ ;  $\beta = 45^\circ$

которые приводят к сдвигу сырой массы в радиальном направлении и позволяют воздействовать на структуру слоя и формировать открытую пористость. Установлено, что при  $L/d_{ca} > 20$  глубина пор и их извилистость уменьшаются, расстояние между ними возрастает, структурные отличия в зонах исчезают. При  $L/d_{ca} < 5$  указанные поры в зоне I и частично в зоне II визуально не наблюдаются, поскольку при высоких давлениях ВШС и влажности шихты влага «выжимается» на поверхность, формируется тонкий слой подвижной влагошихтовой пульпы, которая заполняет концентрические поры и разглаживает поверхность напыленного слоя. В этих условиях возможности формирования открытой пористости снижаются.

При наличии зародышей в структуре окатышей плотность окатышей определяется по выражению

$$\rho_{ок} = \rho_{зр}(m_{зр}/m_{ок}) + (1 - m_{зр}/m_{ок})\rho_{об},$$

где  $\rho_{зр}$  и  $\rho_{об}$  – плотность зародыша и оболочки окатыша, кг/м<sup>3</sup>.

Если предположить, что плотность оболочки остается относительно постоянной, то воздействовать на структурные характеристики окатышей можно варьированием плотности зародышей и их массовой долей. Результаты экспериментов (рис. 4) показывают, что величина общей и открытой пористости всего окатыша пропорциональна указанным параметрам, а повышенное содержание открытых пор в сердцевине окатыша позволяет прогнозировать увеличение его реакционной способности

и снижение диффузионных затруднений при термической и восстановительной обработке окискованного сырья.

**Выводы.** Рассмотрены принципы структурообразования в процессе получения окатышей за счет расширения функциональных возможностей технологии их получения. В основе принципов лежат методы внешнего теплосилового воздействия на влажную железорудную шихту в рабочем пространстве окомкователя. Установлено, что формировать характер и величину пористости окатышей можно изменением массового содержания зародышей с регламентированной поровой структурой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2377323. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.07.2008 г. Оpubл. 27.12.2009 г.
2. Пат. РФ № 2385351. Способ получения окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.10.2008 г. Оpubл. 27.03.2010 г.
3. Пат. РФ № 2387720. Способ подготовки шихты к спеканию / Павловец В.М. Заявл. 23.12.2008 г. Оpubл. 27.04.2010 г.
4. Пат. РФ № 2390570. Способ термообработки окатышей / Павловец В.М. Заявл. 01.10.2008 г. Оpubл. 27.05.2010 г.
5. Пат. РФ № 2402619. Способ получения окатышей / В.М. Павловец. Заявл. 02.06.2009 г. Оpubл. 27.10.2010 г.
6. С и з о в А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми струями. – М.: Металлургия, 1991. – 184 с.

7. С и з о в А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.
8. П а в л о в е ц В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
9. П а в л о в е ц В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
10. П а в л о в е ц В.М. Напыление влажной шихты на железорудные окатыши // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 12. С. 7 – 11.
11. П а в л о в е ц В. М. Исследование структурных характеристик шихтового покрытия, напыленного на поверхность железорудных материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 4. С. 7 – 12.
12. П а в л о в е ц В. М. Исследование характеристик шихтового покрытия, напыленного на железорудные материалы низкотемпературными струями сжатого воздуха // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 7 – 12.

© 2014 г. В.М. Павловец  
Поступила 8 сентября 2014 г.

УДК 669.15.7

*А.К. Соловьев, В.О. Михеев, П.С. Пуликов*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ СЕРЫ

При сжигании серосодержащего топлива образуются оксиды серы: сернистый ангидрид ( $\text{SO}_2$ ) и серный ангидрид ( $\text{SO}_3$ ). Оксиды серы, а также образующиеся при соединении в атмосфере с водяным паром кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) оказывают вредное воздействие на здоровье людей, являются причиной гибели хвойных лесов, снижения урожайности сельскохозяйственных культур, закисления водоемов. Кроме того, оксиды серы являются причиной коррозии стальных конструкций и разрушения различных строительных материалов. В атмосфере выброшенный из дымовой трубы сернистый ангидрид под действием солнечного света окисляется в серный ангидрид, а затем переходит в серную кислоту. Время существования оксидов серы и продуктов их трансформации в атмосфере составляет (по данным различных исследований) от нескольких часов до нескольких суток, за это время воздушными потоками они могут быть перенесены на огромные (до 1000 км) расстояния. В этом заключается явление дальнего и сверхдальнего переноса оксидов серы. По этой причине в некоторых странах Европы сложилась парадоксальная ситуация, когда, например, Норвегия,

Швеция, Швейцария и некоторые другие страны получают в результате переноса больше оксидов серы, чем выбрасывают сами [1].

Современная ТЭС мощностью 2400 МВт, работающая на угле, в течение одного часа выбрасывает в атмосферу 34 т сернистого ангидрида; ежегодно выбросы сернистого ангидрида 120 котельных г. Новокузнецка в три раза превышают выбросы коксохимпроизводства. Именно поэтому проблема снижения количества оксидов серы стоит очень остро.

Мировой опыт показывает, что ни одна из технологий сероулавливания не может быть успешно внедрена без опытной проверки в условиях реальной ТЭС, длительное отставание с сооружением в нашей стране опытно-промышленных сероулавливающих установок усложняет и без того тяжелое положение с сероулавливанием в энергетике.

На сегодня можно говорить лишь о нескольких опытно-промышленных установках (ОПУ). В стадии освоения находится установка на Дорогобужской ТЭЦ (производительностью 1 млн.  $\text{м}^3/\text{ч}$  газа по аммиачно-циклическому методу) и опытно-экспериментальная установка Губкинской ТЭЦ (производительностью 106



тыс. м<sup>3</sup>/ч газа по мокрому известняковому способу). Введена и испытана ОПУ на Молдавской ГРЭС, использующая аммиачно-озонный метод одновременной очистки газов от оксидов азота и серы производительностью 10 тыс. м<sup>3</sup> газа /ч, на Северодонецкой ТЭЦ испытывалась установка по магнезитово-циклическому методу.

По-иному обстоит дело в развитых капиталистических странах. На зарубежных электростанциях успешно эксплуатируются и сооружаются новые установки по улавливанию оксидов серы из дымовых газов. Несмотря на то, что оснащение сероочистными установками повышает стоимость ТЭС на 25 – 30 % и стоимость тарифов на электроэнергию на 5 – 15 %, в США, Японии, Германии, Австрии и др. странах эти установки обязательны для всех новых энергоблоков.

В нашей стране из-за узковедомственного подхода к экономическому обоснованию затрат на сооружение электростанций, остаточного принципа выделения средств на природоохрану внедрению систем очистки дымовых газов от оксидов серы не уделялось должного внимания. По этой причине до настоящего времени разработанные различными организациями технологии очистки выбросов от SO<sub>2</sub> не проверены в условиях эксплуатации, их проектные показатели уступают зарубежным, промышленное производство отечественных катализаторов не налажено.

Сегодня существует два основных направления снижения выбросов оксида серы энергетическими установками, сжигающими серосодержащее топливо:

- предварительное (перед сжиганием) снижение содержания серы в исходном топливе (десульфуризация топлива);

- очистка дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу, от оксидов серы с помощью специальных установок.

Десульфуризация является перспективным направлением снижения количества выбросов оксидов серы от действия ТЭС, так как одновременно наиболее полно решается задача устранения отрицательных последствий, связанных с образованием и прохождением по тракту котла оксидов серы, повышения экономичности сжигания. При этом не возникает вопроса об утилизации продуктов обессеривания дымовых газов. Но обессеривание жидкого и твердого топлива (в отличие от обессеривания газообразного топлива, которое достаточно просто осуществляется на месте добычи) является достаточно сложным в техническом плане процессом.

Наибольшее распространение в мире получило второе направление снижения количества оксидов серы – очистка дымовых газов в сероулавливающих установках. В настоящее время известно более 80-и модификаций способов удаления SO<sub>2</sub> из дымовых газов.

Мокрые абсорбционные способы очистки дымовых газов от сернистого ангидрида, использующие в качестве сорбента недорогой и недефицитный материал (известь, известняк), получили наибольшее распространение в мире, несмотря на опасность образования в аппаратах трудноудаляемых отложений. Из всего количества действующих на сегодня в мире сероулавливающих установок около 90 % составляют установки, использующие именно этот метод.

В основе метода мокрой абсорбционной очистки дымовых газов лежит нейтрализация сернистой кислоты, получающейся в результате растворения диоксида серы, содержащегося в дымовых газах, гидратом оксида кальция Ca(OH)<sub>2</sub> (известью) или карбонатом кальция CaCO<sub>3</sub> (известняком). Известь более дорогой и дефицитный материал, однако применение извести в качестве сорбента позволяет почти в два раза сократить расход реагента, снизить расход электроэнергии на приготовление суспензии и орошение абсорбера. В ряде случаев применение извести может быть оправдано, несмотря на то, что по сравнению с известняком ее стоимость может быть в 2 – 2,5 раза выше. С применением извести в США работают около 35 % «мокрых» сероочистных установок, в Германии – 20 %, в Японии – 11 % [2].

Преимуществами метода являются:

- применение в качестве реагента недорогих и недефицитных природных материалов;
- относительная простота технологии при высокой степени очистки газов от SO<sub>2</sub>, достигающая в современных установках 95 – 98 %;
- получение конечного продукта, пригодного для дальнейшего использования;
- сравнительно невысокие капитальные затраты на сооружение установки.

На рисунке показана принципиальная технологическая схема сероочистной установки, работающей по мокрому известняковому методу.

Дымовые газы после котла очищаются в электрофилт্রে 2 и при температуре 125 – 130 °С насосом 3 подаются в теплообменник, где они, отдав часть тепла очищенному газу, охлаждаются до 90 – 95 °С, после чего поступают в предвключенный скруббер с трубой Вентури 5. Здесь дымовые газы охлаждаются до температуры насыщения и дополнительно очищаются от частиц золы и недожога. Кроме

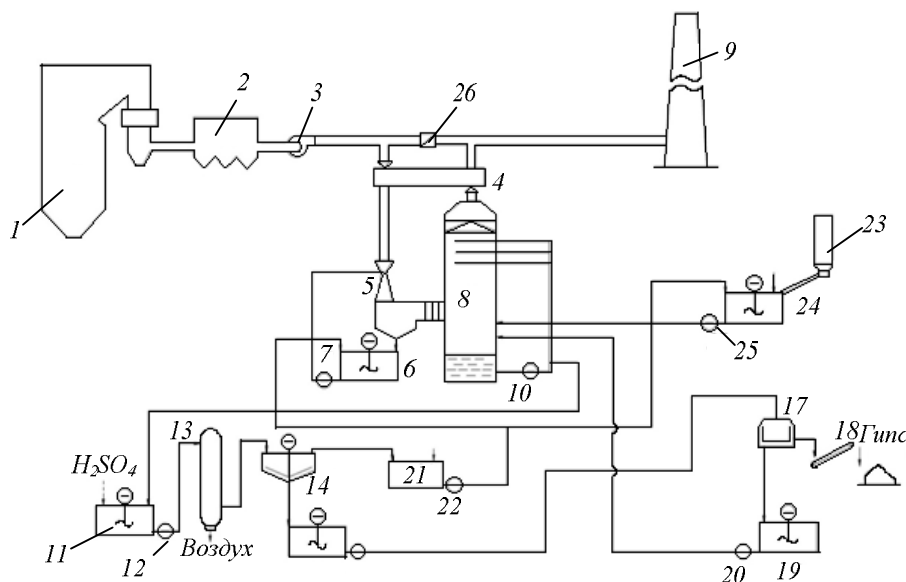
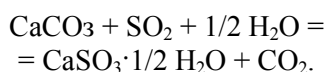


Схема сероочистной установки, работающей по мокрому известняковому методу:

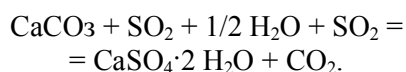
1 – котел; 2 – электрофильтр; 3 – дымосос; 4 – регенеративный газовый подогреватель; 5 – предвключенный скруббер; 6 – циркуляционная емкость скруббера; 7, 10, 12, 16, 20, 22, 25 – насос; 8 – абсорбер; 9 – дымовая труба; 11 – окислительная емкость; 13 – окислительная башня; 14 – сгуститель; 15 – емкость сгустителя; 17 – центрифуга; 18 – конвейер; 19 – емкость центрифуги; 21 – емкость осветленной воды; 23 – емкость известняка; 24 – емкость для приготовления суспензии; 26 – переключающий шибер

того, в скруббере адсорбируется некоторое количество оксидов серы ( $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ), а также других вредных примесей, мешающих процессу сероочистки ( $\text{HCl}$  и  $\text{HF}$ ). Вода для орошения скруббера поступает из рециркуляционного бака 6 с помощью специального насоса 7. На выходе из скруббера установлен каплеуловитель. Уловленные капли жидкости с частицами золы, механического недожога и других примесей собираются в нижней части скруббера и сливаются в рециркуляционный бак. Часть золовой пульпы отбирается после насоса 7 и направляется на обработку или в отвал. Далее дымовые газы поступают в абсорбер 8.

Промывочная жидкость (суспензия известняка) подается в верхнюю часть абсорбера, где системой сопел равномерно распределяется по сечению абсорбера. Дымовые газы,двигающиеся в абсорбере снизу вверх, контактируют с распыленной суспензией известняка, в результате чего сернистый ангидрид реагирует с известняком с образованием сульфата кальция

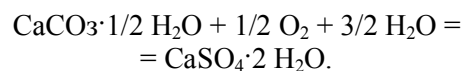


Кроме того, в абсорбере за счет наличия в дымовых газах кислорода образуется также незначительное количество сульфата кальция



Очищенные от  $\text{SO}_2$  дымовые газы при температуре  $50 - 55^\circ\text{C}$  проходят каплеуловитель, где освобождаются от капельной влаги, подогреваются до  $95 - 105^\circ\text{C}$  в теплообменнике 4 и выбрасываются через дымовую трубу 9 в атмосферу.

Прошедшая абсорбер суспензия известняка вместе с продуктами реакции собирается в нижней части абсорбера в циркуляционной емкости и насосом 10 снова подается на четыре яруса распыливающих сопел, расположенных сверху. Таким образом, обеспечивается непрерывная циркуляция промывочного раствора. Часть пульпы после насоса 10 отбирается и подается в систему получения гипса. В окислительную емкость 11 добавляется также некоторое количество серной кислоты для окисления остатков карбоната кальция, а также для обеспечения необходимого значения pH. Затем насосом 12 в окислительную башню 13 (в нижнюю часть) подается сжатый воздух. В башне происходит окончательное окисление кислородом воздуха сульфита кальция в сульфат



Из окислительной башни пульпа поступает в сгуститель 14, из нижней части которого концентрированная масса сульфата кальция направляется в бак 15, откуда – на центрифугу 17. Осветленная вода отводится в бак 21,

далее – в бак 6 или направляется в систему подготовки известняковой суспензии.

В центрифугах гипс отделяется от воды, остаточное содержание которой не превышает 10 %, затем конвейером 18 направляется на склад. Отделенная в центрифугах вода (рН = 4) поступает в продувочную емкость 19 и оттуда – в нижнюю часть абсорбера.

Система подготовки суспензии известняка включает в себя бункер известняка 23 с измельчителем и бак 24 для приготовления промывочного раствора. В бак 24 подводится как свежая вода, так и вода из системы получения гипса (рН = 4).

Продувка системы (удаление сточных вод) осуществляется из линии после насоса рециркуляции.

Все емкости, в которых могут оказаться взвешенные вещества, снабжены перемешивающими устройствами для предотвращения образования отложений. Для предотвращения образования твердых трудноудаляемых отложений на стенках абсорбера часть мелких кристаллов гипса после центрифуги вместе с отделенной водой и непрореагировавшим известняком снова возвращаются в цикл и подаются в нижнюю часть абсорбера. Эти мелкие частицы гипса, являясь центрами кристаллизации, уменьшают степень перенасыщенности промывочного раствора. Кроме того, внутренняя поверхность абсорбера постоянно орошается водой для смыва рыхлых отложений [1].

Полученный на установке гипс может быть использован для производства различных строительных материалов. Эффективность очистки газов от SO<sub>2</sub> может составить 90 – 95 %.

Полная стоимость установки составляет примерно 15 % от стоимости энергоблока, оборудованного сероочистой установкой. Эксплуатационные расходы электроэнергии достигают 2 % от мощности энергоблока. Потеря эксплуатационных затрат компенсируется за счет продажи гипса.

**Выводы.** Мокрый абсорбционный способ очистки дымовых газов от сернистого ангидрида с недорогим и недефицитным материалом в качестве сорбента может быть применен на теплоэлектростанциях, использующих в качестве топлива уголь, жидкое топливо или их смесь с максимальным содержанием серы в топливе 3 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А л и е в Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. – М.: Металлургия, 2012. – 544 с.
2. К а л ы г и н В. Г. Промышленная экология: учебное пособие для вузов. – М.: Академия, 2010. – 432 с.

© 2014 г. А.К. Соловьев, В.О. Михеев,  
П.С. Пуликов  
Поступила 12 сентября 2014 г.

УДК 621.791

*Г.Н. Вострецов, Т.А. Бич, Л.П. Бащенко*

Сибирский государственный индустриальный университет

### ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ В СРЕДЕ АЗОТА

Валки холодной прокатки работают в условиях одновременного действия остаточных, контактных, изгибающих напряжений, тепловых нагрузок и крутящего момента, поэтому рабочий слой валков должен обладать высокими прочностью, вязкостью, износостойкостью, теплостойкостью и твердостью. Наиболее полно всем этим требованиям отвечают теплостойкие инструментальные стали высо-

кой твердости, которые сочетают теплостойкость (600 – 700 °С) с высокой твердостью (HRC 63 – 68) и повышенным сопротивлением пластической деформации [1].

Таким образом, весьма актуальной задачей является разработка и применение наплавочных материалов на основе теплостойких инструментальных сталей. Причем в зависимости от конкретных условий работы валков должен разра-



батываться материал с определенными доминирующими свойствами. Например, для наплавки рабочего слоя валков холодной прокатки вольфрама и молибдена необходима высокая твердость, а для наплавки рабочего слоя валков прокатки керамической пленки – высокая износостойкость наплавленной поверхности [2].

В результате анализа условий эксплуатации прокатных валков и требований, предъявляемых к рабочей поверхности, можно сформулировать следующие основные принципы разработки наплавочных материалов:

- создание наплавленного слоя, соответствующего требованиям полного комплекса необходимых свойств (твердости, теплостойкости, износостойкости и прочности);

- оптимизация составов наплавочных материалов в зависимости от конкретных вариантов применения;

- технологичность разрабатываемых наплавочных материалов.

Целью работы является исследование влияния основных легирующих элементов на твердость наплавленного теплостойкого металла. Для достижения поставленной задачи первоначально по экспериментальным и литературным данным [1, 3] была определена область исследования, а потом с применением методов планирования эксперимента и метода кругого восхождения по поверхности отклика функции рассчитан оптимальный состав порошковой проволоки.

Определение твердости образцов проводили сразу после плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота и после отпуска (вторичная твердость). Режимы отпуска: температура нагрева 560 °С; время выдержки 1 час. Результаты исследования приведены на рис. 1 (здесь и далее обозначение химического элемента соответствует содержанию этого элемента).

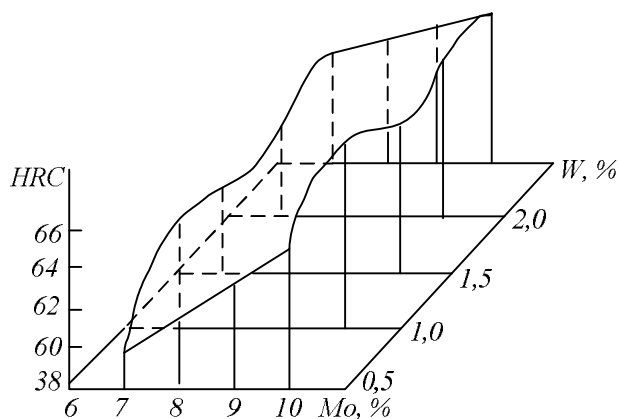


Рис. 1. Изменение вторичной твердости в зависимости от содержания вольфрама и молибдена в порошковой проволоке (содержание углерода 0,8 %)

Для оценки влияния факторов получено регрессионное уравнение

$$HRC = 42,25 \cdot 5C + 5,37W + 1,82Mo - 0,49W \cdot Mo. \quad (1)$$

В относительных координатах это уравнение можно записать в следующем виде (рис. 2):

$$\frac{\Delta HRC}{HRC} = 0,062 \frac{\Delta C}{C} + 0,026 \frac{\Delta W}{W} + 0,145 \frac{\Delta Mo}{Mo} - 0,001 \frac{\Delta W}{W} \frac{\Delta Mo}{Mo}. \quad (2)$$

Для соблюдения требования отклонения твердости от среднего значения HRC 65 в пределах  $HRC \pm 1$  (рис. 2) можно варьировать соотношением значений  $\Delta C/C = 25 \%$ ,  $\Delta W/W = 57 \%$  и  $\Delta Mo/Mo = 10 \%$ . По проведенным расчетам в данном диапазоне концентраций легирующих элементов в теплостойких сталях при выполнении условия сохранения твердос-

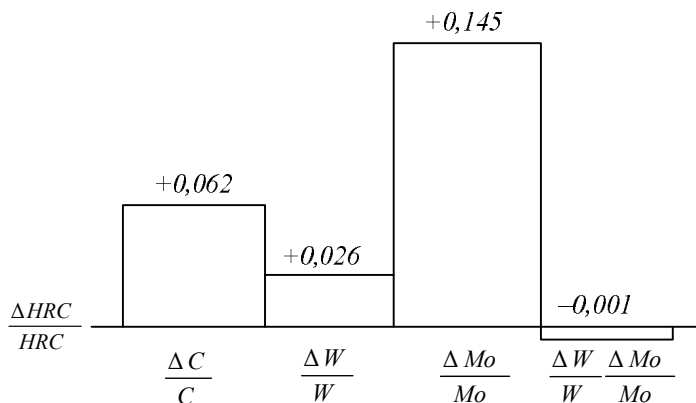


Рис. 2. Влияние отклонения содержания легирующих элементов от оптимального на изменение вторичной твердости наплавленного металла

ти вольфрам можно частично заменить молибденом

$$W = (1,1 \div 1,2) \% \text{Mo.} \quad (3)$$

Получение качественного наплавленного металла при плазменной наплавке в защитно-легирующей газовой смеси без пор, трещин и других дефектов обеспечивается введением в шихту для производства порошковой проволоки определенных добавок. Например, фтор- и хлорсодержащие компоненты и алюминий снижают вероятность образования пор [4]. Дополнительно эти компоненты шихты могут влиять на формирование фазового состава, структуру и свойства наплавленного металла. При изменении содержания алюминия в шихте порошковой проволоки можно определить его оптимальное содержание, исходя из условия получения качественного металла с максимально возможно высокой твердостью.

В настоящей работе содержание алюминия в наплавленном металле изменяли в пределах 0 – 3,0 %, азота – в пределах 0,06 – 0,08 %. Алюминий добавляли в шихту порошковой проволоки в количестве до 6 %. Легирование азотом наплавленного металла проводили из газовой фазы в результате использования азотосодержащей защитной газовой среды.

Микрорентгеноспектральный качественный и количественный анализ образцов наплавленного металла выполняли на установке «Сомбах-мисро», а рентгеноструктурный – на установке ДРОН-2,0. В результате микрорент-

геноспектрального анализа установлено, что алюминий в наплавленном металле находится либо в виде соединений предположительно нитридов или комплексных оксидов металлов, либо в виде твердого раствора (рис. 3, 4). Размеры включений находятся в пределах 6 – 12 мкм, что позволяет сделать предположение об их дополнительном вкладе в процесс упрочнения наплавленного металла. Содержание алюминия в твердом растворе и во включениях определяли на площади 2×2 мкм с шагом съемки 5 мкм. Линию сканирования зонда выбирали таким образом, чтобы попало хотя бы одно крупное включение (рис. 3).

В результате исследования влияния содержания алюминия в наплавленном в азоте металле типа P2M8 установлено, что максимальный прирост вторичной твердости HRC 1,5 – 2,0 наплавленного металла достигается при содержании алюминия в порошковой проволоке до 1,0 – 1,2 % (рис. 5). Вероятно, в этом диапазоне концентраций алюминия доминируют процессы дисперсионного упрочнения. Дальнейшее увеличение содержания алюминия в наплавленном металле приводит к резкому снижению твердости после наплавки и способности металла к упрочнению при отпуске. Такое снижение твердости обусловлено увеличением количества относительно «мягкой» структурной составляющей – высокотемпературного  $\delta$ -феррита (HV около 3000 МПа) [5]. Увеличение количества высокотемпературного  $\delta$ -феррита приводит к уменьшению количества появляющегося при более низких

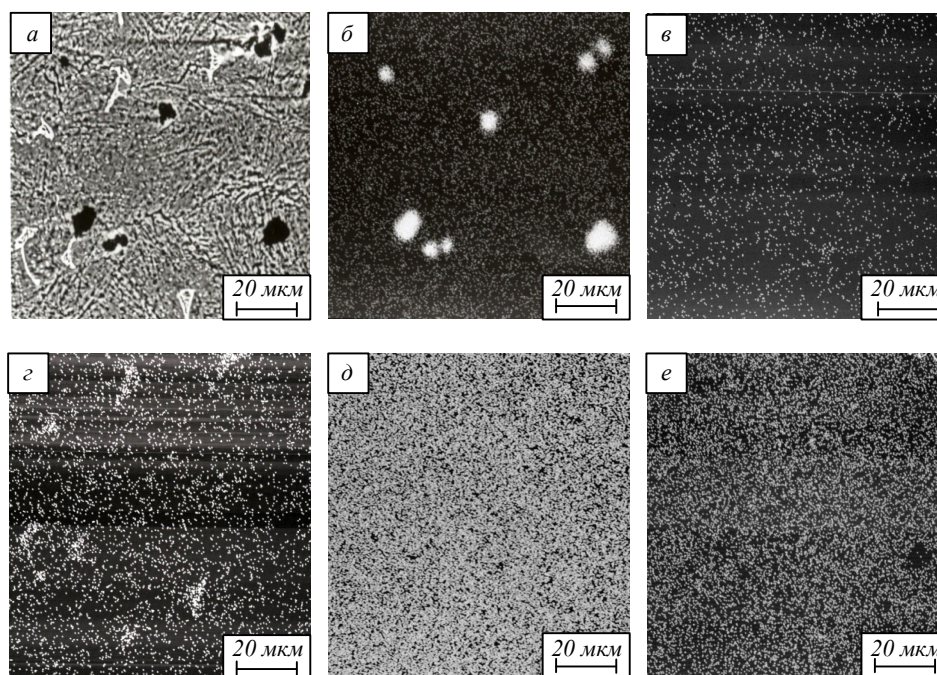


Рис. 3. Структура характерного участка, наплавленного в азоте металла типа P2M8 (а), и характер распределения на этом участке алюминия (б), вольфрама (в), молибдена (г), железа (д) и хрома (е) (электронная микроскопия)

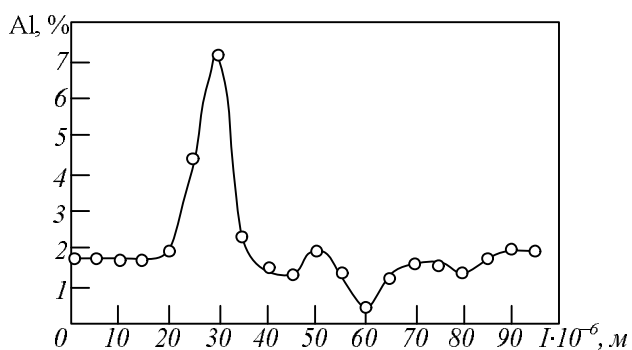


Рис. 4. Характерное распределение алюминия в микро-объеме наплавленного в азоте металла типа P2M8

температурах аустенита. Таким образом, снижение вторичной твердости (рис. 5, а, кривая 2) при увеличении содержания алюминия в твердом растворе более 0,8 – 1,0 % связано с увеличением количества δ-фазы вместо α-фазы. В этом случае процессы разупрочнения доминируют над процессами дисперсионного упрочнения и процессами упрочнения, связанными с мартенситным превращением аустенита при отпуске на вторичную твердость.

В результате исследования были разработаны составы порошковых проволок на основе теплостойких инструментальных сталей высокой твердости для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота (см. таблицу). Разработанные порошковые проволоки использованы при плазменной наплавке в защитной среде азота прокатных валков (рис. 6).

**Выводы.** Установлена регрессионная зависимость между содержанием углерода, вольфрама, молибдена и алюминия и вторичной твердостью наплавленного в среде азота теплостойкого металла. Исходя из условия сохранения высокой твердости наплавленного металла, вольфрам в порошковой проволоке можно заменить молибденом в соотношении  $Mo/W = 1,0/(1,1 \div 1,2)$ . Оптимальным с точки зрения получения максимальной вторичной твердости при плазменной наплавке в среде азота является содержание алюминия в наплавленном металле в пределах 0,8 – 1,0 %

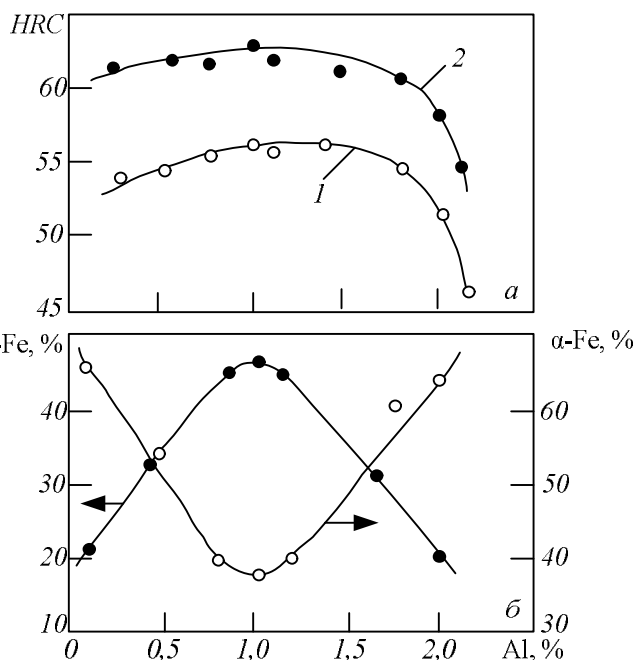


Рис. 5. Влияние содержания алюминия в наплавленном металле типа P2M8 на его твердость (а) после наплавки (1) и после отпуска (2) и фазовый состав (б)

(около 2,0 % в порошковой проволоке). Разработаны составы порошковых проволок для плазменной наплавки теплостойкими инструментальными сталями и наплавлены опытные партии прокатных валков.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
2. Малушин Н.Н., Зубков Н.С. Анализ работоспособности наплавленных рабочих валков стана холодной прокатки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1989. № 10. С. 62 – 65.
3. Пат. РФ № 2492982. Шихта порошковой проволоки / Козырев Н.А., Вострецов Г.Н., Шурупов В.М. Вострецова Т.Г. Заявл. 05.03.2012 г. Опубл. 20.09.2013 г.

**Содержание основных легирующих элементов в наплавленном теплостойком металле**

| Марка   | Содержание (среднее) элементов, % |     |     |     |     |     | HRC            |           |
|---------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----------|
|         | C                                 | W   | Mo  | Cr  | V   | Al  | после наплавки | вторичная |
| ПП-Р0М8 | 0,85                              | –   | 8,5 | 4,0 | 0,4 | 2,0 | 57             | 60 – 62   |
| ПП-Р2М8 | 0,85                              | 1,5 | 8,5 | 4,0 | 0,4 | 2,0 | 56             | 63 – 65   |
| ПП-Р6М5 | 0,8                               | 6,0 | 5,0 | 4,0 | 0,4 | 2,0 | 56             | 64 – 66   |

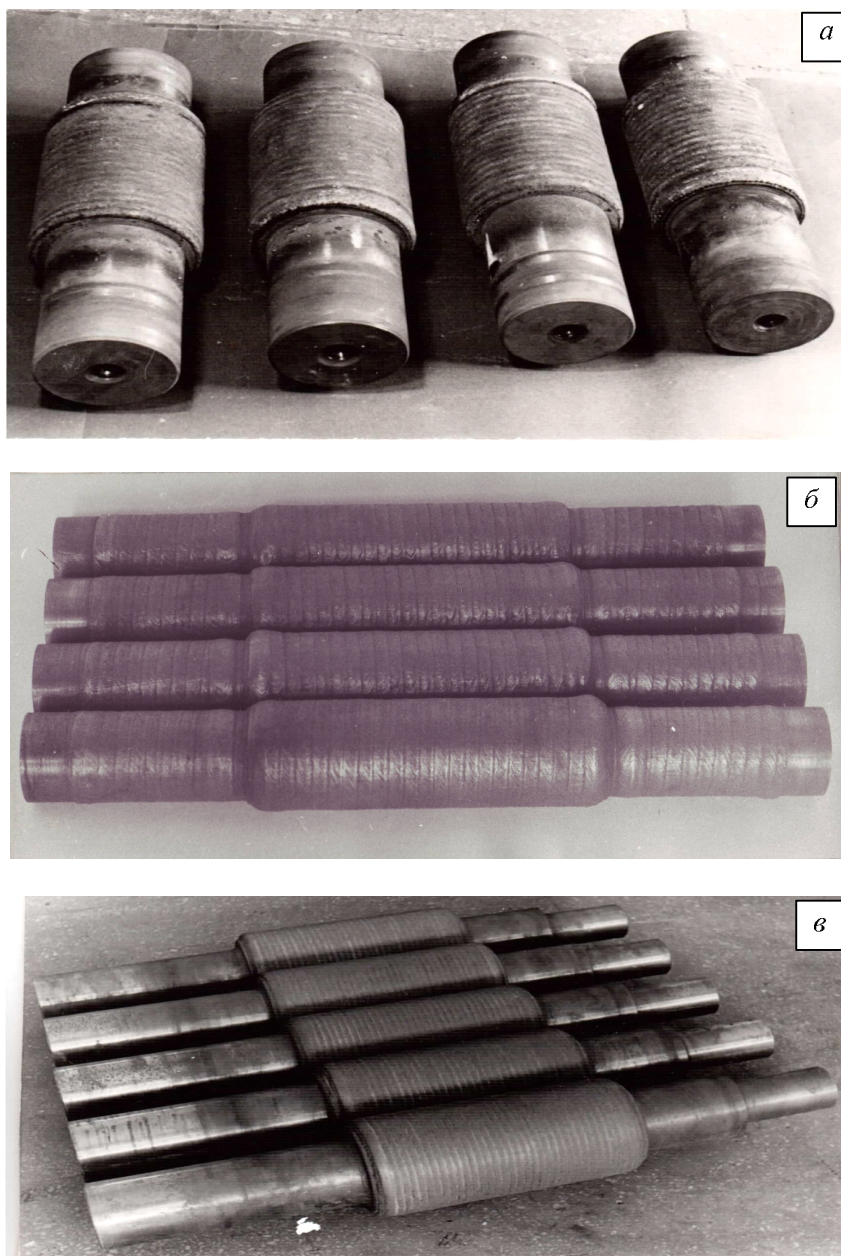


Рис. 6. Напавленные детали:

*а* – валки для прокатки керамической пленки; *б* – напавленные рабочие валки стана 4/55-200 холодной прокатки электро-технической стали; *в* – валки холодной прокатки стана «425»

4. В о с т р е ц о в Г.Н., К о з ы р е в Н.А., В о с т р е ц о в а Т.Г. Восстановительная плазменная наплавка теплостойкими инструментальными сталями деталей металлургического оборудования. – В кн.: Сб. докладов 14-й Международной научно-практической конференции. – Санкт-

Петербург: изд. Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та, 2012. С. 37 – 41.

5. М е с ь к и н В.С. Основы легирования стали. – М.: Металлургия, 1964. – 684 с.

© 2014 г. Г.Н. Вострецов, Т.А. Бич,  
Л.П. Бащенко  
Поступила 9 сентября 2014 г.



УДК 621.783.231.1

*А.Ю. Сюсюкин*

ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

**ПОТЕРИ МЕТАЛЛА С ОКАЛИНОЙ ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ**

При нагреве в печах происходит окисление металла, которое является сложным процессом и состоит из нескольких этапов: диффузии кислорода из ядра газового потока к поверхности нагреваемых изделий; адсорбции его на этой поверхности; диффузии реагирующих веществ через слой оксида навстречу кислороду и кристаллохимических превращений, связанных с изменениями состава и структуры решетки твердых фаз [1].

Для определения потерь металла с окалиной в период работы печи до ее реконструкции проведен ряд исследований. В экспериментах в промышленных условиях использовались заготовки размером 300×330×4650 мм из сталей марок Э76Ф, НЭ76Ф, которые нагревались в методической печи с шагающими балками в атмосфере продуктов сгорания природного газа.

Основным способом определения величины окалинообразования был выбран метод планиметрирования (измерения площади и взвешивания пластинок окалины). Отбор проб производили с различных участков непрерыв-

нолитой заготовки на рольганге после выдачи ее из печи [2].

Измерение площади окалины осуществляли с помощью миллиметровой бумаги. Массу пластинок определяли на весах ВЛКТ-2kg-M с точностью до 0,1 г. Угар определяли по формуле [3 – 5]

$$y = \frac{M_{\text{ок}} \text{Fe}100}{F_{\text{ок}}}$$

где  $M_{\text{ок}}$  и  $F_{\text{ок}}$  – масса и площадь пластинки окалины, г и мм<sup>2</sup>; Fe – содержание железа в окалине, %.

Результаты потерь металла с окалиной при нагреве в печи с шагающими балками до ее реконструкции представлены в табл. 1.

В апреле – сентябре 2012 г. проведена реконструкция печи с шагающими балками с установкой новой системы сжигания топлива и заменой горелок в сварочных зонах, установкой пилотных горелок в нижних зонах томле-

Т а б л и ц а 1

**Результаты потерь металла с окалиной при нагреве стали марки Э76Ф (до реконструкции печи)**

| Время нагрева, ч:мин | Размер заготовки, мм | Пластины окалины         |          | Потери с окалиной |        |        | Потери чистого Fe, % |
|----------------------|----------------------|--------------------------|----------|-------------------|--------|--------|----------------------|
|                      |                      | площадь, мм <sup>2</sup> | масса, г | г/см <sup>2</sup> | кг     | %      |                      |
| 3:18                 | 300×330×4640         | 5807,7                   | 29,5     | 0,50795           | 30,702 | 0,8861 | 0,659236             |
| 3:20                 | 300×330×4640         | 1772,8                   | 12       | 0,6769            | 40,914 | 1,1808 | 0,878505             |
| 3:20                 | 300×330×4640         | 1978,8                   | 11,5     | 0,58116           | 35,128 | 1,0138 | 0,754256             |
| 3:30                 | 300×330×4608         | 1515                     | 6,5      | 0,42904           | 25,76  | 0,7356 | 0,547273             |
| 3:30                 | 300×330×4620         | 1236,96                  | 6        | 0,48506           | 29,197 | 0,8455 | 0,629047             |
| 3:40                 | 300×330×4664         | 3434                     | 16       | 0,46593           | 28,304 | 0,8133 | 0,605109             |
| 3:45                 | 300×330×4640         | 2271                     | 15       | 0,6605            | 39,923 | 1,1508 | 0,856219             |
| 3:50                 | 300×330×4664         | 8403                     | 73       | 0,86874           | 52,773 | 1,5165 | 1,128243             |
| 4:00                 | 300×330×4620         | 6612,7                   | 54       | 0,81661           | 49,153 | 1,4234 | 1,059016             |
| 5:10                 | 300×330×4640         | 22554                    | 275      | 1,2193            | 74,006 | 2,0929 | 1,557148             |
| 6:20                 | 300×330×4664         | 24751,7                  | 306      | 1,23628           | 75,1   | 2,1433 | 1,594581             |
| 6:20                 | 300×330×4664         | 13290,5                  | 169      | 1,27159           | 77,244 | 2,2045 | 1,640118             |

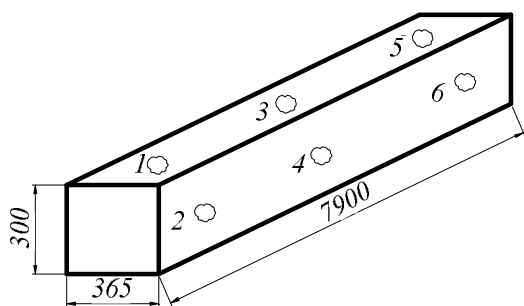


Рис. 1. Схема отбора пластинок окалины

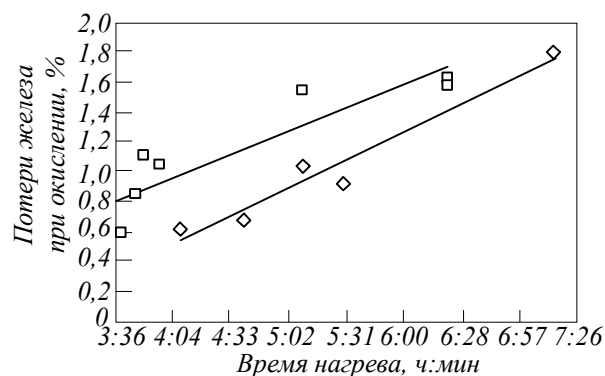


Рис. 2. Потери металла с окалиной в зависимости от времени его нагрева в печи до ее реконструкции (□) и после реконструкции (◇)

ния, дополнительной центральной опорной балки в томильной зоне, а также системы автоматизации уровня 2. С целью проверки гарантийных показателей проведены исследования потерь металла с окалиной после реконструкции печи.

Для исследований использовались заготовки размером 300×365×7900 мм из стали марки Э76ХФ для производства 100-м рельсов, которые нагревались в методической печи с шагающими балками в атмосфере продуктов сгорания природного газа.

Потери с окалиной определяли методом планиметрирования. Схема отбора пластинок окалины представлена на рис. 1. Результаты потерь металла с окалиной при нагреве в печи с шагающими балками после ее реконструкции представлены в табл. 2.

При сравнении результатов, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что после реконструкции печи потери металла с окалиной в среднем снизились с 1 до 0,6 – 0,7 % при времени нагрева 4 ч.

При рассмотрении окалинообразования по различным участкам заготовки длиной 7900 мм, которая используется для прокатки 100-м рельсов, отмечена некоторая неравномерность.

На рис. 3, а, б представлено распределение окалинообразования по длине боковой и верхней граней. Видно, что потери металла с окалиной с верхней грани заготовки несколько выше, чем с боковой. В свою очередь центральная часть заготовки также окисляется больше чем ее концы, что вероятней всего обусловлено имеющейся неравномерностью нагрева в сварочных зонах печи ввиду отсутствия в этих зонах дополнительной опорной балки.

**Выводы.** Определены потери металла с окалиной после реконструкции печи при нагреве заготовки размером 300×365×7900 мм из стали марки Э76ХФ для производства 100-м рельсов. Реконструкция печи позволила снизить потери металла с окалиной, которые в настоящий момент составляют в среднем 1,0 – 1,2 % потерь чистого железа. До реконструкции печи потери металла с окалиной доходили до 1,5 – 1,6 %. При времени нагрева около 4 ч величина окалинообразования не превышает 0,7 %.

Т а б л и ц а 2

**Результаты потерь металла с окалиной при нагреве стали марки Э76ХФ (после реконструкции печи)**

| Время нагрева, ч:мин | Размер заготовки, мм | Пластины окалины         |          | Потери с окалиной |         |       | Потери чистого Fe, % |
|----------------------|----------------------|--------------------------|----------|-------------------|---------|-------|----------------------|
|                      |                      | площадь, мм <sup>2</sup> | масса, г | г/см <sup>2</sup> | кг      | %     |                      |
| 4:10                 | 300×365×7958         | 1209,286                 | 6,157    | 0,509             | 54,992  | 0,831 | 0,615                |
| 4:40                 | 300×365×7956         | 1320,600                 | 7,800    | 0,587             | 63,436  | 0,945 | 0,700                |
| 5:10                 | 300×365×7912         | 1060,000                 | 9,350    | 0,888             | 95,440  | 1,414 | 1,046                |
| 5:30                 | 300×365×7930         | 2064,100                 | 16,290   | 0,787             | 84,688  | 1,259 | 0,932                |
| 7:15                 | 300×365×7930         | 2401,667                 | 37,133   | 1,525             | 164,214 | 2,442 | 1,807                |

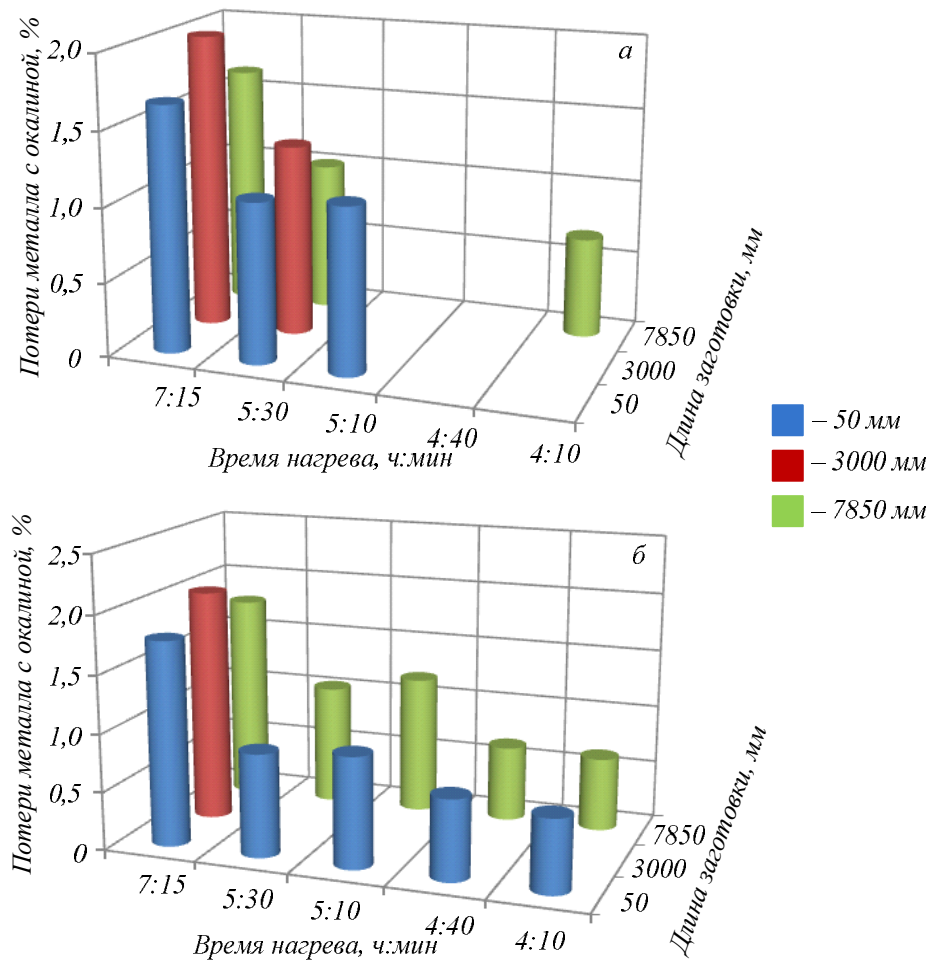


Рис. 3. Потери металла с окалиной при нагреве НЛЗ длиной 7900 мм:  
а – верхняя грань; б – боковая грань

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Темлянецов М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
2. Темлянецов М.В., Нохрина О.И., Сюсюкин А.Ю. Исследование закономерности окисления и обезуглероживания непрерывно-литых заготовок рельсовой стали при нагреве в методической печи с шагающими балками // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2007. Вып. 18. С. 23 – 26.
3. Энергосберегающая технология нагрева слитков / Е.И. Казанцев, Е.М. Котляровский, А.В. Баженов, И.С. Заварова. – М.: Металлургия, 1992. – 176 с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. – М.: Металлургия, 1975. – 367 с.
5. Каплан В.Г., Спивак Э.И. Методика испытания нагревательных печей в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1970. – 464 с.

© 2014 г. А.Ю. Сюсюкин  
Поступила 16 сентября 2014 г.

*В.В. Стерлигов, Е.А. Плюснина*

Сибирский государственный индустриальный университет

## УСЛОВИЯ СТАГНАЦИИ ВОЗДУШНОГО СЛОЯ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Теплоизоляционный материал – это структура, заполненная воздухом. В работе [1] показана возможность получения обобщенной характеристики для разных огнеупоров, если в качестве входного фактора использовать пористость (то есть долю воздуха в объеме огнеупора).

Физической моделью стабилизации (удержания) неподвижного слоя воздуха для предлагаемого типа теплоизоляционного материала является процесс, наблюдаемый при использовании меха: остья, выступающие перпендикулярно поверхности шкуры и расположенные с достаточно большой частотой, удерживают слой воздуха толщиной  $\delta$ , равной высоте (длине) остьев. Такую же систему из проволочных «остьев» можно создать на поверхности слоя обмуровки при использовании некоего подобия стальной щетки и (или) частой объемной сетки.

В работе [2] приведена логическая схема тепловой работы такой теплоизоляции; показано, что геометрическое давление, возникающее при свободной конвекции, вызывает движение среды и переходит в динамическое.

Движение реальной (вязкой) жидкости или газа происходит с преодолением сопротивления трения и местных сопротивлений. Потери давления, обусловленные сопротивлением, в гидродинамике выражаются уравнением

$$\Delta P_{\text{пот}} = \zeta \Delta P_{\text{дин}},$$

где  $\Delta P_{\text{пот}}$  – потери давления, Па;  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $P_{\text{дин}}$  – динамическое давление.

При условии  $\zeta > 1$  на потери (преодоление сопротивления) будет израсходована вся энергия движения.

Математическое обоснование возможности стагнации (торможения) пристенного слоя при свободной конвекции возникает из анализа уравнений Л. Эйлера, Д. Бернулли и Л. Прандтля для ламинарного пограничного слоя.

Для закрытого потока в трубе уравнение Д. Бернулли для реальной жидкости можно записать в виде

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{\text{пот}},$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – давление в начале и в конце трубы, Па.

Это уравнение показывает, что потери кинетической энергии при движении закрытого потока в трубе компенсируются за счет потенциальной энергии статического давления.

В открытом пространстве слой при свободной конвекции можно определить как пограничный вдоль какой-то поверхности. Из уравнения Л. Прандтля для пограничного слоя ламинарного течения можно записать условия  $dP/dy = 0$  и  $dP/dx = 0$  (где  $x$  и  $y$  – координаты), которые означают отсутствие градиента давления на поверхности тела (также, как и в открытом невозмущенном пространстве, то есть  $P = \text{const}$  или  $P_1 = P_2$  [3]).

Для этого случая на основе уравнения Бернулли можно записать выражение

$$\Delta P_{\text{пот}} = \left( \frac{w_1^2}{2} \rho - \frac{w_2^2}{2} \rho \right),$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – скорость жидкости в начале и в конце трубы, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Так как выполняется условие  $\Delta P_{\text{пот}} > 0$ , то справедливо  $w_1 > w_2$ ,  $\partial w_x / \partial x < 0$ .

Уравнение неразрывности для плоского слоя записывается в следующем виде:  $dw_x/dx + dw_y/dy = 0$ . С учетом условия  $dw_x/dx < 0$  можно записать  $dw_y/dy > 0$ . Последнее условие означает возникновение поперечного по отношению к основному направлению движения, «оттеснение» потока от поверхности. Таким образом, торможение потока в основном направлении ( $dw_x/dx < 0$ ) вызывает движение в поперечном направлении ( $dw_y/dy > 0$ ), что может быть замечено, если поток визуализировать. Внешне при визуализации потока, например дымом, это будет проявляться в появлении дыма на поверхности остьев, его вытеснении из слоя, в котором происходит торможение за счет трения или местного сопротивления.

Для проверки гипотезы о возможности торможения были проведены расчеты с учетом



местных сопротивлений, когда реализуется условие  $\Delta P_{\text{пот}} = \zeta_{\Sigma} P_{\text{дин}}$ , где  $\zeta_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления.

Наиболее близким к структуре меха случаем является пучок труб, расположенный в шахматном порядке. Коэффициент местного сопротивления такого пучка труб определяется следующим образом [4]:

$$\zeta = n \frac{S}{b} \alpha + \beta,$$

где  $\alpha = 0,028 \left( \frac{b}{2\delta} \right)^2$  и  $\beta = \left( \frac{b}{2\delta} - 1 \right)^2$  – функции, зависящие от коэффициента живого сечения  $2\delta/b$ ;  $n$  – количество рядов;  $S$  – шаг труб в глубину пучка, м;  $b$  – межосевое расстояние между трубами в ряду, мм;  $\delta$  – расстояние между трубами, мм.

Коэффициент сопротивления зависит от геометрических параметров пучка: диаметра трубы  $d$ , расстояния между трубами  $2\delta$  в одном ряду, шага труб по глубине пучка  $S$ , то есть  $\zeta = f(d, 2\delta, S)$ . По геометрическим параметрам пучка легко определить межосевое расстояние между трубками в ряду  $b = d + 2\delta$ .

Результаты расчета коэффициентов местных сопротивлений для одного ряда труб ( $n = 1$ ) при  $S/b = 1$  приведены ниже:

| $d$ , мм | $\delta$ , мм | $2\delta/b$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\alpha S/b$ | $\zeta$ |
|----------|---------------|-------------|----------|---------|--------------|---------|
| 1        | 4,5           | 0,9         | 0,05     | 0,02    | 0,05         | 0,07    |
| 2        | 4,0           | 0,8         | 0,05     | 0,08    | 0,05         | 0,13    |
| 3        | 3,5           | 0,7         | 0,08     | 0,20    | 0,08         | 0,28    |
| 4        | 3,0           | 0,6         | 0,09     | 0,43    | 0,09         | 0,52    |

Выполнения условия  $\zeta_{\Sigma} > 1$  легко достигнуть при различных вариантах конструкций для нескольких рядов труб, что является аналогом геометрии остьев в структуре меха.

Другим способом достижения стагнации является трение. Классическим случаем течения жидкости, для которого существует аналитическое решение потерь на трение, является так называемое «течение Пуазейля», представляющее собой стационарное одномерное ламинарное течение в плоском канале, образуемом двумя бесконечно большими параллельными плоскостями.

Величина потерь на трение для задачи Пуазейля определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d_3} \frac{\bar{w}_x^2}{2} \rho,$$

где  $\bar{w}_x$  – средняя скорость по сечению, м/с;  $d_3$  – эквивалентный диаметр сечения, м;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $L$  – длина участка, м.

Для рассматриваемого течения решение уравнения Пуазейля имеет вид

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}}, \quad (1)$$

где  $\text{Re} = \frac{\bar{w}_x d_3}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

В настоящей работе необходимо определить геометрию канала, в котором может быть реализовано явление стагнации за счет трения. Если записать, как это принято для определения потерь на трение,  $\Delta P_{\text{тр}} = K_{\text{тр}} P_{\text{дин}}$ , то  $K_{\text{тр}} = \lambda \frac{H}{d_3} \geq 1$  (где  $H$  – высота нагретой вертикаль-

ной поверхности, м). Коэффициент  $K_{\text{тр}}$  иногда называют «коэффициентом гидравлических потерь на трение», он является полным аналогом коэффициента местного сопротивления  $\zeta_{\Sigma}$ . В настоящей работе уже было доказано достижение условия стагнации для местного сопротивления  $\zeta_{\text{м.с}} \geq 1$ .

На основе уравнения Пуазейля можно записать

$$K_{\text{тр}} = \frac{96 H}{\text{Re} d_3} = 1.$$

Следовательно, величина эквивалентного диаметра  $d_3$  может быть рассчитана по выражению

$$d_3 = \frac{96 H \nu}{w_0 (1 + \alpha t) d_3};$$

здесь  $w_0$  – осевая скорость, м/с;  $\alpha$  – температурный коэффициент объемного расширения.

Для воздуха при  $H = 1$  м,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>,  $t = 70$  °С,  $\nu = 20 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с окончательно получим  $d_3 = 20,79 \cdot 10^{-3}$  м.

Если на поверхности создать ребра (как показано на рис. 1) с отношением высоты ребра  $b$  к толщине щели  $\delta$ , задаваемым по желанию конструктора ( $n = b/\delta$ ), то можно рассчитать размер щели при заданном значении  $d_3$ .

$$\text{Поскольку } d_3 = \frac{4F}{P} = \frac{4\delta b}{2(b+\delta)} = \frac{4n\delta\delta}{2(n+1)\delta} = \frac{2n\delta}{n+1},$$

то при  $n = 5$  значение  $\delta$  составит  $33 \cdot 10^{-3}$  м.

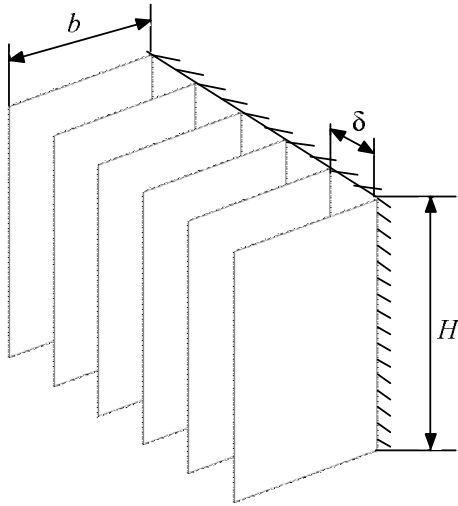


Рис. 1. Стенка с ребристой поверхностью

$$\text{Для } H = 0,25 \text{ м, } d_3 = \sqrt{\frac{96 \cdot 0,25 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,25}}}, \\ = 14,77 \cdot 10^{-3} \text{ м } \delta = \frac{d_3}{1,66} = \frac{14,72}{1,66} = 8,9 \text{ мм, что яв-}$$

ляется технически реализуемым.

Таким образом, высказанная гипотеза получает свое расчетное подтверждение. Решение уравнения для определения значения  $d_3$  позволяет определить геометрические параметры системы: толщину слоя между ребрами и их высоту. Экспериментальная проверка может ввести некоторые коррективы, а полученные в опытах коэффициенты позволят уточнить расчетную модель.

В терминах теории подобия последнее условие может быть выражено числом подобия  $Sg$  ( $Sg$  – Stagnation), учитывающим отношение

$$\frac{\Delta P_{\text{пот}}}{\Delta P_{\text{геом}}} = \frac{\Delta P}{Hg\Delta\rho} = Sg. \quad (9)$$

Отсутствие такого числа подобия среди тех, которые уже известны в специальной терми-

нологии [5], говорит о том, что эта задача еще не решена.

Ближайшим аналогом числа  $Sg$  является число Эйлера  $Eu = \frac{\Delta P}{w^2 \rho}$ , представляющее со-

бой падение давления при движении среды, отнесенное к динамическому давлению, величина которого уже определялась ранее.

В работе при опытной проверке гипотезы использовали образцы, характеристики которых представлены ниже:

| Образец | Материал остьев (игл) | Расположение остьев       | $d, b, S,$<br>мм мм мм |
|---------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| 1       | Алюминий              | Коридорное                | 0,8 5 18               |
| 2       | Сталь                 | Шахматное                 | 0,2 4 12               |
| 3       | Хлорвинил             | Коридорное (в виде пучка) | 1,0 15 4               |
| 4       | Щетина                | Шахматное                 | 0,2 0,5 12             |

Для выявления возможности создания застойной зоны была создана опытная установка. Визуализацию потока осуществляли дымом. На рис. 2 показаны фотографии образцов при визуализации потока. В первом случае дым проходит сквозь остья по всему сечению пучка, а во втором четко виден вытесненный дым в застойной зоне, где нет движения, при этом видна зона в начале участка, где дым еще проходит внутри пучка. В соответствии с излагаемой гипотезой суммарный коэффициент сопротивления, зависящий от числа рядов  $n$ , в начале участка еще не превысит 1 (то есть  $\zeta_{\Sigma} < 1$  и  $\Delta P_{\text{пот}} < P_{\text{дин}}$ ). При таких условиях  $w_x > 0, w_y = 0$ ; вытеснения потока еще не наблюдается. Установка для исследования влияния геометрических параметров системы представляет собой

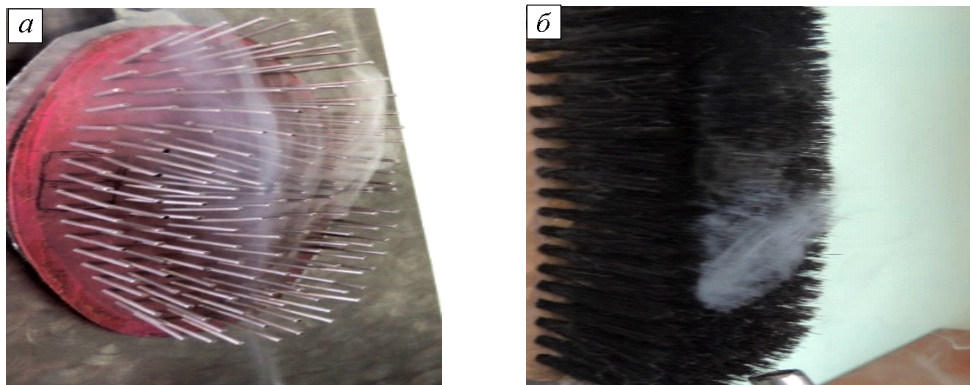


Рис. 2. Фотографии по визуализации потока при использовании образцов 1 (а) и 4 (б)

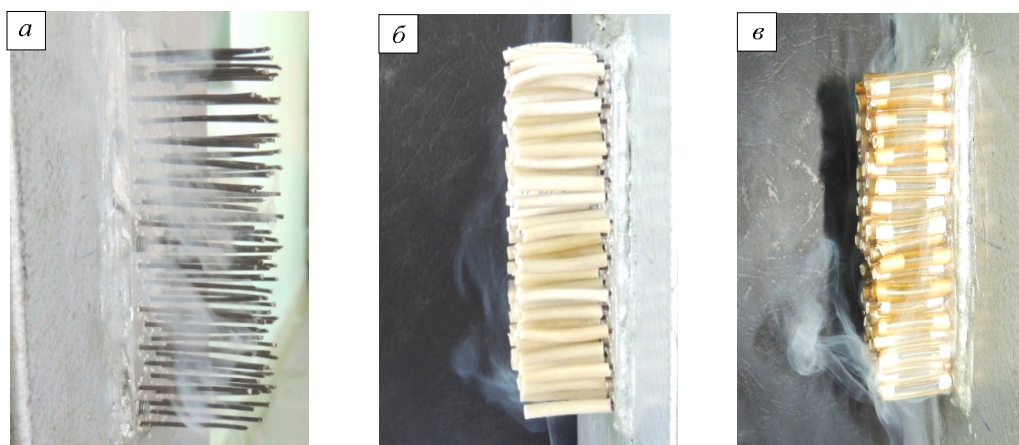


Рис. 3. Движение дыма в пучке стержней диам. 1 мм (а), 3 мм (б) и 4 мм (в)

металлическую емкость, внутри которой установлен нагреватель. К лицевой части установки припаяны металлические стержни диам. 1 мм, расположенные в шахматном порядке; высота игл составляет 30 мм, шаг между остьями в продольном и поперечном направлении 10 мм. Шаг между остьями изменяли путем использования трубок («надеваемых» на стержни) различного диаметра: от 2 до 6 мм. В емкости поддерживали постоянную температуру воды (100 °С) за счет кипения. Для выявления застойной зоны и определения наилучших геометрических параметров системы дым пропускали через остья.

На рис. 3 приведены фотографии опытов при использовании трубок разного диаметра. При  $d = 1$  мм (рис. 3, а) видно, что поток, визуализированный дымом, проходит через все сечение пучка. При  $d = 3$  мм (рис. 3, б) поток существует только в нижней части; в верхней части происходит оттеснение его от поверхности нагрева, так как выше находится застойная зона. При  $d = 4$  мм (рис. 3, в) более ярко видна застойная зона.

Таким образом опыты показали, что при свободной конвекции при движении нагреваемого потока вдоль горячей стенки при определенных геометрических размерах можно добиться образования застойной зоны с характерным вытеснением потока из пучка и перевести теплообмен из режима конвекции в режим теплопроводности.

Для доказательства изменения теплового режима на этой же установке были проведены измерения плотности теплового потока ( $q$ ) специальным зондом ИПП-2. При этом были получены следующие величины:

– при  $d = 1$  мм (проходной слой)  $q = 161$  Вт/м<sup>2</sup> (нет застоя воздуха);

– при  $d = 4$  мм (застойный слой)  $q = 81$  Вт/м<sup>2</sup> (застой воздуха).

**Выводы.** Математический анализ условий явления показал возможность создания застойной

зоны и использования структуры из «остьев» с целью теплоизоляции. Численный эксперимент, проведенный на основе известных уравнений, показал возможность создания такой структуры и продемонстрировал методику расчета гидравлических (аэродинамических) показателей конструкции. Физическим экспериментом визуализировано вытеснение потока, которое является признаком возникновения застойной зоны. Показано влияние конструктивных элементов структуры на характер течения потока и тепловую эффективность предлагаемого решения. Все это позволяет утвердиться в правильности высказанной гипотезы и перейти к поиску практических решений и разработке технологий производства предлагаемого типа теплоизоляции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 30–35.
2. Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А. О возможности использования стационарного воздушного слоя для теплоизоляции энергетических агрегатов // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. 2011. Вып. 28. С. 72–74.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 2-е. – Л.: МАНГИЗ, 1962. – 456 с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования – М.: Металлургия, 1964. – 385 с.
5. Петухов Б.С. Теория теплообмена. Терминология. Вып. 83. – М.: Наука, 1971. – 28 с.

© 2014 г. В.В. Стерлигов, Е.А. Плюснина  
Поступила 20 июня 2014 г.

*Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКАРБОНИТРИДА ХРОМА В КОМПОЗИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

В технологии композиционных гальванических покрытий (КГП) кристаллизация металла (никеля, хрома, железа, меди и др.) осуществляется из электролитов-суспензий, содержащих в качестве добавки модификатор, представляющий собой, как правило, вещество в порошкообразном состоянии, частицы которого включаются в формирующуюся на поверхности изделия металлическую матрицу. По данным работы [1] для улучшения характеристик КГП необходимо повышать уровень дисперсности упрочняющей фазы и в пределе использовать ее с частицами наноразмерного уровня. Это позволяет улучшить качество гальванических осадков за счет снижения пористости и микрошероховатости; способствует формированию матрицы с равновесной субзеренной структурой и равномерным содержанием частиц; дает возможность повысить уровень физико-механических свойств покрытий в результате реализации эффекта дисперсионного упрочнения и снижения внутренних напряжений; расширяет технологические возможности процесса получения КГП из-за незначительной седиментации наноразмерных частиц в электролитах-суспензиях и повышенной адсорбции ионов и других добавок. Эти обстоятельства предопределяют постоянное стремление специалистов, работающих в области технологии КГП, к использованию в качестве упрочняющей фазы материалов высокой дисперсности, в том числе и наноматериалов.

Целью настоящей работы является изучение физико-механических свойств композиционных гальванических покрытий на основе никеля, достигаемых с применением нанокарбонитрида хрома состава  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ . Для сравнения также исследованы покрытия с нано- и микропорошками карбида хрома.

Для модифицирования никелевой матрицы использовались нанопорошок карбонитрида хрома, обозначаемый в дальнейшем как НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ , и порошки карбида хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  трех видов: нанопорошок карбида хрома, по-

лученный отжигом в аргоне карбонитрида хрома при температуре 1273 К (НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ); особо тонкий микропорошок карбида хрома, полученный отжигом в аргоне карбонитрида хрома при температуре 1373 К (МП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (1)); микропорошок карбида хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , полученный измельчением в мельнице с твердосплавными шарами и футеровкой порошка карбида хрома стандартной гранулометрии (–63 мкм) в течение 80 ч (МП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  (2)).

Характеристики фазового и гранулометрического составов используемых порошков приведены в табл. 1.

Можно видеть, что все порошки однофазны и содержат примеси, обусловленные способами получения. Нанопорошок карбонитрида хрома, синтез которого подробно описан в работе [2], представлен глобулярными частицами достаточно широкого размерного диапазона – от 20 до 80 нм. Нанопорошок карбида хрома, синтез и эволюция дисперсности которого описаны в работе [3], имеет удельную поверхность, в 3 раза меньшую по сравнению с нанопорошком карбонитрида, и представлен частицами размером от 30 до 100 нм дендритной формы. Для особо тонкого микропорошка и микропорошка характерны размерные диапазоны 0,2 – 0,8 и 3 – 6 мкм, соответственно, с преобладанием дендритной и неправильной осколочной форм частиц.

Осаждение КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  осуществляли из слабокислого сульфатного электролита, содержащего различные добавки, состава  $245 \text{ кг/м}^3 \text{ NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $30 \text{ кг/м}^3 \text{ H}_3\text{BO}_3$ ,  $20 \text{ кг/м}^3 \text{ NaCl}$ ,  $6 \text{ кг/м}^3 \text{ NaF}$  при концентрации нанопорошка в электролите  $5 - 10 \text{ кг/м}^3$ , значениях pH 5,0 – 5,5, катодной плотности  $1,0 \text{ кА/м}^2$ , температуре 323 К и постоянном перемешивании электролита. При осаждении КГП Ni – МП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  концентрация микропорошка в электролите составляла  $60 - 80 \text{ кг/м}^3$ , катодная плотность тока  $0,7 \text{ кА/м}^2$ . Для осаждения «чистых» никелевых покрытий использовали электролит такого же состава, не содер-

## Основные характеристики порошков карбонитрида и карбида хрома

| Характеристика                                  | НП Cr <sub>3</sub> (C <sub>0,8</sub> N <sub>0,2</sub> ) <sub>2</sub> | НП Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> | МП Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (1) | МП Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (2) |
|---|--|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Химический состав основной фазы                 | Cr <sub>3</sub> (C <sub>0,8</sub> N <sub>0,2</sub> ) <sub>2</sub>    | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>    | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>        | Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>        |
| Содержание основной фазы, % (по массе)          | 93,45  | 94,90                             | 95,73                                 | 95,54                                 |
| Содержание примесей, % (по массе):              |  |                                   |                                       |                                       |
| свободного хрома                                | 1,80   | 1,54                              | 1,32                                  | 0,31                                  |
| свободного углерода                             | 1,10   | 0,21                              | 0,18                                  | 0,80                                  |
| оксида хрома (III)*                             | 3,00   | 2,88                              | 2,61                                  | 3,20                                  |
| летучих   | 0,60   | 0,47                              | 0,16                                  | 0,15                                  |
| Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг        | 32000 – 37000  | 10000 – 12000                     | 1400 – 1700                           | 400                                   |
| Размер частиц, мкм                              | 0,02 – 0,08  | 0,03 – 0,10                       | 0,20 – 0,80                           | 3 – 5                                 |
| Форма частиц                                    | Шаровидная   | Дендритная                        | Дендритная                            | Осколочная<br>неправильная            |
| Коррозионная стойкость в растворах электролитов | Устойчивы в щелочных и слабокислых электролитах                      |                                   |                                       |                                       |

\* Определялось по содержанию кислорода.

жащий дисперсной фазы. КПП всех видов осадили на стальную основу (сталь 3).

Для определения элементного состава образцов КПП использовался метод энергодисперсионной спектроскопии на растровом электронном микроскопе JSM-6480 LV с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии INCA. Этот метод в сочетании с растровой электронной микроскопией позволяет проводить количественный элементный анализ в интервале от  $B$  до  $U$  в объеме порядка 1 – 3 кубических мкм. Чувствительность метода составляет 0,1 % (ат.). Относительная погрешность измерения равна 5 %.

Микротвердость покрытий измерялась на микротвердомере ПМТ-3 методом статического вдавливания перпендикулярно слою покрытия индентора при нагрузке 0,49 Н. Микротвердость покрытий определялась на образцах толщиной 40 мкм по 5 – 6 измерениям диагонали отпечатка. Внутренние напряжения покрытий измеряли методом деформации гибкого катода и рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{Ed_k a}{3l_k^2 d_n}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости металла катода;  $d_k$  – толщина катода;  $d_n$  – толщина покрытия;  $a$  – отклонение нижнего конца катода;  $l_k$  – длина участка катода с покрытием.

Анодами служили никелевые пластины размером 0,08 × 0,1 м, заключенные в чехлы из ткани типа «хлорин». Выход по току опре-

делялся весовым методом с помощью последовательно подключенного к электролизеру медного кулонометра.

Содержание карбонитрида и карбида хрома в композиционных покрытиях определялось весовым методом после растворения покрытия в 10 %-ном растворе HNO<sub>3</sub> (ГОСТ 5744 – 94 с изм.). Процент включения карбонитрида и карбида в матрицу рассчитывался как отношение массы нерастворимого остатка к массе покрытия.

Анализ рентгеновских энергодисперсионных спектров КПП подтверждает присутствие в них Ni, O и Ni, Cr, C, O. Так, по данным рентгеновского энергодисперсионного микроанализа содержание Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> в покрытии составляет 0,87 % (по массе), а по данным определения весовым методом, т.е. по величине нерастворенного осадка – 0,79 – 0,81 % (по массе). При этом для определяемых элементов характерно достаточно равномерное распределение в покрытии толщиной 30 мкм (рис. 1), что подтверждает его композиционный характер.

Микротвердость покрытий с нанопорошком карбонитрида хрома составляла 4,40 – 4,50 ГПа при содержании второй фазы 0,79 – 0,81 % (по массе), а с микropорошком карбида хрома – 3,60 – 3,70 ГПа при 2,97 – 2,99 % (по массе). Микротвердость никелевой матрицы изменялась в пределах 2,36 – 2,48 ГПа.

Прочность сцепления КЭП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> со стальной основой составляет 29,8 – 32,1 МПа. Результаты измерения внутренних напряжений покрытий и коррозионных токов приведены в табл. 2. Можно видеть, что

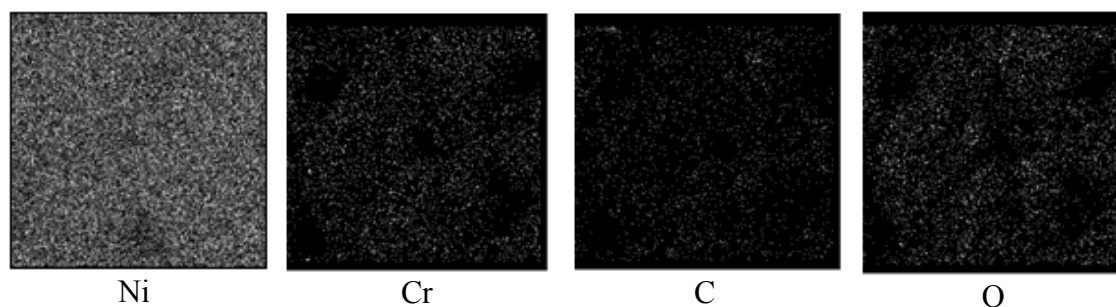


Рис. 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа распределения основных элементов в покрытии КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$

с увеличением толщины осадков внутренние напряжения в них уменьшаются. Включение дисперсных частиц в покрытие также приводит к снижению внутренних напряжений, особенно при использовании нанопорошка карбонитрида хрома. Так, если при толщине 40 мкм композиционное покрытие с микропорошком  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  имеет внутренние напряжения в 2,18 раза меньше, чем у чистого никеля, то с наночастицами – в 4,45 раза. Этот эффект, по видимому, объясняется образованием более мелкозернистой структуры растущего осадка за счет равномерно распределенных в нем частиц дисперсной фазы. Внедрение большего количества частиц микропорошка по сравнению с НП приводит к неравномерной деформации матрицы, захватывающей большие группы зерен, и, как следствие этого, к повышению внутренних напряжений и к снижению коррозионных характеристик.

Коррозионные свойства покрытий оценивались по величине токов коррозии и скорости газовой коррозии при нагревании на воздухе. Величина токов коррозии, возникающих в композиционных покрытиях, намного меньше, чем в никелевой матрице (табл. 2). При толщине 40 мкм покрытия, полученного при использовании микропорошка карбида, значение токов коррозии в нем в 2,65 раза меньше, чем в чистом никеле, а в случае применения нанопорошка карбонитрида хрома – меньше в 16,7 раза, что свидетельствует об образовании

практически беспористых КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ , обеспечивающих высокие защитные свойства. Это подтверждается результатами исследования термоокислительной устойчивости покрытий на воздухе, приведенными на рис. 2, а, б.

Видно, что ход кривых зависимости увеличения массы образцов от времени как никеля, так и композиционного покрытия, описывается параболическим законом. Это можно объяснить образованием на поверхности образцов сплошной защитной оксидной пленки, приводящей с увеличением времени к снижению скорости окисления (рис. 2, б). Жаростойкость композиционных покрытий, включающих нанопорошок карбонитрида хрома, значительно превосходит жаростойкость никелевой матрицы. Увеличение массы никелевых покрытий через 1,5 ч при температуре 873 К в 3,45, при 973 К в 4,75 и при 1073 К в 2,04 раза больше, чем для КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  (рис. 2, а). С увеличением температуры до 1173 К скорость окисления для всех исследуемых материалов увеличивается, причем для композиционных покрытий зависимость более крутая (рис. 2, б). Однако даже в этом случае при температуре 1173 К через 0,5 ч скорость окисления для композиционного покрытия с нанопорошком карбонитрида хрома в 2,33 раза меньше, чем у никеля и в 1,34 раза меньше, чем у КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , что свидетельствует о более высокой устойчивости его к газовой

Т а б л и ц а 2

### Зависимость внутренних напряжений и токов коррозии от толщины покрытий

| Толщина покрытия, мкм | Внутренние напряжения, МПа |   |                                 | Токи коррозии, мкА/см <sup>2</sup> |   |                                 |
|-----------------------|----------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|
|                       | Ni                         | Ni – НП $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ | Ni – НП $\text{Cr}_3\text{C}_2$ | Ni                                 | Ni – НП $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ | Ni – НП $\text{Cr}_3\text{C}_2$ |
| 5                     | 9,72                       | 3,69  | 5,81                            | 0,304                              | 0,088   | 0,191                           |
| 10                    | 7,06                       | 1,71  | 3,12                            | 0,265                              | 0,069   | 0,171                           |
| 20                    | 3,74                       | 0,61  | 1,57                            | 0,205                              | 0,039   | 0,142                           |
| 30                    | 1,36                       | 0,50  | 0,78                            | 0,173                              | 0,020   | 0,105                           |
| 40                    | 1,07                       | 0,24  | 0,59                            | 0,167                              | 0,010   | 0,063                           |



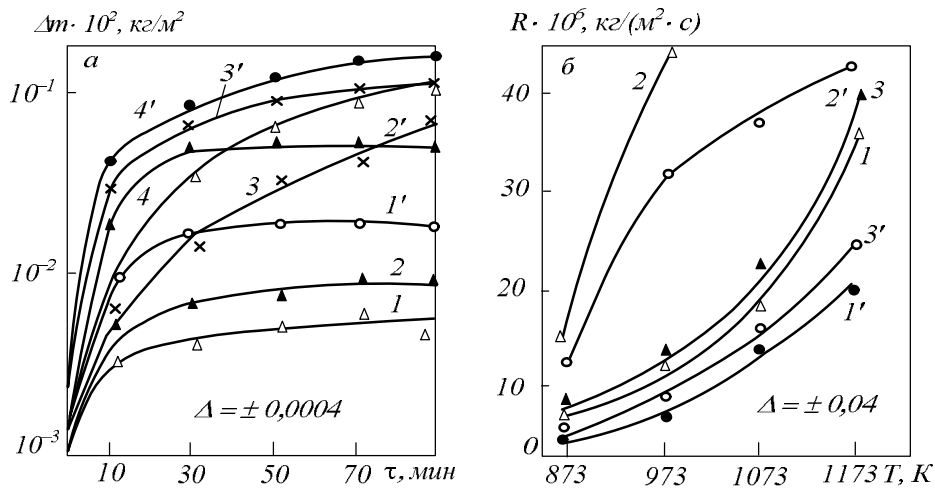


Рис. 2. Жаростойкость покрытий на воздухе:

*a* – увеличение массы образцов при нагревании на воздухе КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> (1, 2, 3, 4) и Ni (1', 2', 3', 4') при температуре соответственно 873, 973, 1073, 1173 К; *б* – зависимость скорости окисления на воздухе от температуры КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> (1, 1'), Ni (2, 2') и КЭП Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (3, 3') соответственно через 10 и 30 мин

коррозии. Для КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> зависимость скорости окисления от температуры описывается уравнением вида (при значениях критерия Фишера F/F<sub>0,95</sub>(3,10) = 0,171/3,7):

$$R = \{5,4[0,0033 (T - 705)]^{2,5} + 3,7\} \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где *R* – скорость окисления, кг/(м<sup>2</sup>·с); *T* – температура, К.

Результаты исследования износостойкости покрытий приведены на рис. 3.

Можно видеть, что покрытие КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> превосходит по износостойкости остальные сравниваемые материалы, что свидетельствует о его более высоких эксплуатационных характеристиках.

Анализ результатов комплексных исследований свойств покрытий КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub>, НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> свидетельствует о целесообразности использования в качестве упрочняющей фазы нанокарбонитрида хрома.

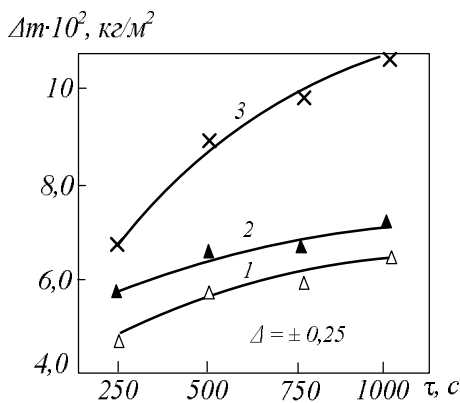


Рис. 3. Износостойкость КГП:

1 – КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub>; 2 – КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 3 – Ni

Полученный комплекс свойств покрытий КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> позволяет рекомендовать их в соответствии с предложенной в работе [4] классификацией к использованию в следующих областях:

- для антикоррозионной защиты деталей, работающих в агрессивных средах;
- для упрочнения деталей, работающих на износ в условиях трения скольжения при средних (1,5 – 2,5 м/с) окружных скоростях и невысоких (5 – 6 МПа) удельных нагрузках: валов, втулок, опор скольжения, шпинделей и др.

**Выводы.** Изучены физико-механические свойства композиционных гальванических покрытий Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub>. Установлено следующее:

- прочность сцепления покрытия КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> со стальной основой составляет 29,8 – 32,1 МПа;
- внутренние напряжения при толщине композиционного покрытия 40 мкм составляют 0,24 МПа в КГП Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub>, 0,59 МПа в КЭП Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 1,07 МПа в никелевом покрытии, т.е. при включении в покрытие нано- и микрочастиц внутренние напряжения снижаются в 4,46 и 1,81 раза соответственно;

- микротвердость КГП определяется содержанием в них упрочняющей фазы и уровнем ее дисперсности и составляет 4,40 – 4,50 ГПа для покрытий Ni – НП Cr<sub>3</sub>(C<sub>0,8</sub>N<sub>0,2</sub>)<sub>2</sub> при содержании карбонитрида 0,79 – 0,81 % (по массе), 4,0 – 4,1 ГПа для Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> при содержании карбонитрида 0,90 – 0,92 % (по массе), 3,6 – 3,7 ГПа для Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (1) при 1,39 – 1,41 % (по массе), 3,6 – 3,7 ГПа для Ni – НП Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (2) при 2,97 – 2,99 % (по массе);

микротвердость КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  в 2,2 раза выше, чем у никелевой матрицы, в 1,23 раза выше, чем у КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , в 1,45 раза выше, чем у КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ; для КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  зависимость микротвердости  $H$  от содержания в покрытии карбонитрида  $a$  описывается уравнением вида  $H = 2,973a + 2,051$ ;

– износостойкость КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  в 1,5 раза выше износостойкости КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , в 1,7 раза – никелевых покрытий;

– токи коррозии при толщине композиционного покрытия 40 мкм составляют 0,010 мкА/см<sup>2</sup> в КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$ , 0,063 мкА/см<sup>2</sup> в КЭП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , 0,167 мкА/см<sup>2</sup> в никелевом покрытии, т.е. при включении в покрытие нано- и микрочастиц токи коррозии снижаются в 16,7 и 2,65 раза соответственно;

– жаростойкость КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  значительно превосходит жаростойкость никелевой матрицы: скорость их окисления при температуре 1173 К в 2,33 раза ниже, чем у никелевых покрытий и в 1,34 раза ниже, чем у КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ; зависимость скорости окисления  $R$  от температуры  $T$  для КГП Ni – НП  $\text{Cr}_3(\text{C}_{0,8}\text{N}_{0,2})_2$  описывается уравнением вида  $R = \{5,4 \cdot [0,0033 (T - 705)]^{2,5} + 3,7\} \cdot 10^{-6}$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руднева В.В., Галевский Г.В. Особенности электроосаждения и свойства композиционных покрытий с нанокompонентами // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 39 – 43.
2. Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Руднева В.В. Плазменный синтез и физико-химическая аттестация нанокарбида хрома // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 3 – 8.
3. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Ширяева Л.С. Синтез и эволюция дисперсности боридов и карбидов ванадия и хрома в условиях плазменного потока // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 12 – 17.
4. Руднева В.В. Развитие теории и нанотехнологии электроосаждения композиционных покрытий // Вестник РАЕН: Проблемы развития металлургии в России. 2006. Т. 6. № 3. С. 63 – 68.

© 2014 г. Л.С. Ширяева, И.В. Ноздрин,  
Г.В. Галевский, В.В. Руднева  
Поступила 20 февраля 2014 г.

УДК 662.732

*А.Е. Аникин, Г.В. Галевский*

Сибирский государственный индустриальный университет

## БУРОУГОЛЬНЫЙ ПОЛУКОКС БЕРЕЗОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАНСКО-АЧИНСКОГО БАССЕЙНА: ПРОИЗВОДСТВО, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

В настоящее время наблюдается нехватка основного восстановителя, используемого в металлургических процессах, – кокса из дефицитных спекающихся каменных углей. В связи с этим ведутся поиски новых перспективных углеродистых материалов, которые способны полностью или частично заменить каменноугольный кокс в целом ряде металлургических процессов. Наряду с этим из-за переизбытка энергетических углей на топливном рынке угледобывающие предприятия активно ищут новые направления их сбыта [1, 2]. Следователь-

но, весьма перспективным направлением является поиск вариантов замены каменноугольного кокса в ряде металлургических процессов исходными и переработанными энергетическими углями. Особенно интересны в этом плане бурые угли ввиду их значительных запасов и относительной дешевизны. Однако при использовании исходных бурых углей в качестве восстановителей в металлургических процессах возникает целый ряд проблем. Во-первых, зачастую металлургические предприятия располагаются на значительном удалении от месторож-



дений, а транспортировка бурого угля на расстояние свыше 300 км экономически и технологически нецелесообразна (высокая влажность, пыление, опасность самовозгорания и т.д.) [3 – 5]. Во-вторых, исходный бурый уголь имеет высокие влажность (27 – 38 %) и выход летучих веществ (45 – 48 %) [6]. Такие показатели влажности и выхода летучих веществ являются недопустимыми для металлургических процессов. В частности, при нагреве из исходного бурого угля начинают выделяться летучие вещества, содержащие большое количество смолистых веществ, которые затрудняют ход процесса и могут привести к выходу из строя газоочистки. В связи с этим становится очевидной необходимость предварительной обработки бурого угля перед использованием в металлургических процессах.

Одним из направлений подготовки бурого угля к использованию в металлургических процессах является сушка и дальнейшее брикетирование. В этом случае существенно снижается влажность, достигается необходимый гранулометрический состав. Однако этого недостаточно в связи с тем, что выход летучих веществ при этом не уменьшается [3]. Добиться существенного уменьшения выхода летучих веществ из бурого угля можно с помощью его глубокой термической переработки (до 750 – 800 °С) [3]. При этом образуется буроугольный полукоксовый продукт (БПК) – продукт, обладающий необходимыми свойствами для его применения в металлургических процессах.

Целью настоящей работы является анализ технологий производства полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений, сравнительный анализ свойств этих полукоксов, а также областей их применения.

В качестве сырья для производства БПК может быть использован любой бурый уголь. Одними из наиболее перспективных являются бурые угли Канско-Ачинского бассейна (КАБ) ввиду их значительных запасов (прогнозные ресурсы – 309,9 млрд. т или 23,4 % от запасов России), низких зольности (3,4 – 22,3 %) и содержания серы (0,1 – 2,2 %) [7], а также благоприятного состава золы (СаО + MgO до 55 %) [8].

В составе КАБ по целому ряду причин наиболее перспективными для производства БПК можно считать бурые угли Березовского месторождения. Во-первых, Березовское месторождение обладает значительными балансовыми запасами – 2453,2 млн. т. [9]. Разработка осуществляется открытым способом на разрезе «Березовский-1», проектная мощность которого 55 млн. т/год [10], производственная мощ-

ность 13,5 млн. т/год [11, 12]. Толщина разрабатываемого угольного пласта – до 70 м [9]. Это, в сочетании с благоприятными условиями залегания [11], обуславливает высокие среднемесячную производительность до 575 т/чел. [13] и добычу угля 7,5 – 8,0 млн. т/год [14, 15]. Разрез динамично развивается – за десять лет добыча угля выросла на 32 % [13]. Во-вторых, Березовское месторождение находится на юго-западе Красноярского края в непосредственной близости к Кемеровской области, а, следовательно, и к центру металлургии Сибири. Кроме того, рядом проходит Транссибирская железнодорожная магистраль, позволяющая организовать доставку сырья для металлургии не только Кузбасса, но и Красноярского края, Урала и др. В-третьих, бурые угли Березовского месторождения обладают благоприятными составом и свойствами: низкие зольность (5,6 %) и содержание серы (0,2 – 0,7 %), высокая теплота сгорания (16,0 МДж/кг) [9], благоприятный состав золы (СаО + MgO до 55 %) [8].

Известны различные технологические варианты производства полукоксов из малометаморфизованных углей [7, 8, 16 – 21].

На заводе «Сибэлектросталь» (г. Красноярск) в конце 60-х гг. был освоен в опытно-промышленном масштабе энерготехнологический способ полукоксования бурого угля, заключающийся в нагреве тонкоизмельченного угля комбинированным теплоносителем: на стадии подготовки – газовым, на стадии полукоксования – твердым [7, 16]. Технологическая схема этого способа содержит четыре контура: сушильно-размольный, бертинирования, полукоксования, охлаждения готового продукта. Этот способ позволяет получать мелкозернистый и пылевидный БПК (примерно 80 % класса 0,3 – 0,5 мм).

В Югославии в 60-е гг. применялся способ, в котором бурый уголь обогащают, дробят до класса 0 – 5 мм, сушат в кипящем слое до влажности 62 – 12 % и далее подают на установку полукоксования Лурги-Рургаз в реактор с кипящим слоем, где в качестве теплоносителя используется полукоксовый продукт с температурой 530 °С. Имеется возможность регулирования конечной температуры в пределах 450 – 1000 °С.

На Ангарском нефтехимическом комбинате, Ленинск-Кузнецком заводе полукоксования, а также в Германии в 60 – 70-е гг. получил распространение процесс полукоксования в вертикальных шахтных печах системы Лурги с внутренним обогревом. Сущность процесса заключается в сушке угля (или брикетов), его полукоксовании, а затем охлаждении. В качестве газа-теплоносителя используется газ по-

лукоксования, сжигаемый в топках камеры сушки и камеры полукоксования [16].

На заводе «Сланцы» в г. Кохтла-Ярве (Эстония) совместно с ВУХИНОм в 1997 г. было проведено коксование длиннопламенного угля Новой Зеландии в камерных печах с внешним обогревом. Получен высококачественный углеродистый восстановитель. Также опробован и отработан процесс полукоксования углей марок Д, ДГ и СС в газогенераторах с получением полукокса, удовлетворяющего требованиям электротермических производств [17, 18]. В 2000-х гг. в газогенераторах этого завода были проведены опытно-промышленные испытания процесса полукоксования углей марки Д Шубаркольского разреза Казахстана. Получен полукокк класса < 25 мм, удовлетворяющий требованиям электротермических и агломерационных производств [17, 19].

Известна технология термоокислительного полукоксования и коксования на цепных колосниковых решетках. Пиролиз угля осуществляется в окислительном режиме за счет сгорания над слоем топлива выделяющихся летучих веществ. В связи с этим процесс получил название «автотермический» или «аутогенный». В России такую технологию разрабатывали в МХТИ им. Д.И. Менделеева, затем в ВУХИНе, и в последнее время с участием Кузнецкого центра ВУХИНа процесс разработан и внедрен в условиях Казахстана для получения углеродистых материалов для неомеменных потребителей из углей марки Д Шубаркольского разреза [17 – 19]. В России в промышленном масштабе эта технология не применяется. Исключение составляют малотоннажные производства полукоксов из углей марок Д и СС на котельных Кузбасса и Алтайского края. За рубежом этот способ широко используют в Канаде, США, Германии, ЮАР и Индии [17].

Для получения полукокса и кокса из углей могут применяться кольцевые печи. Сущность метода заключается в нагревании до заданной температуры относительно тонкого (50 – 200 мм) слоя свободно лежащей угольной загрузки на движущемся поде. В зависимости от типа перерабатываемого сырья и требований, предъявляемых к конечному продукту, загружаемый на кольцевую подину материал может быть кусковым или порошкообразным. Наибольший производственный опыт эксплуатации мощных кольцевых печей (диам. до 25 м) с использованием бурых углей накоплен в Германии; производительность агрегата

115 тыс. т/год БПК (зольность на сухую массу ( $A^d$ ) 9 %, выход летучих на сухую беззольную массу ( $V^{daf}$ ) 3 %, пористость (П) 48,6 %, удельная поверхность ( $S$ ) 300 м<sup>2</sup>/г) [17, 20]. В США также эксплуатируются кольцевые печи диам. 5 и 8 м (производительность последней составляет 28 т кокса /сут.). Кокс используют в электротермических производствах ферросплавов и фосфора. В бывшем СССР технология коксования в кольцевых печах диам. 5 м отработывалась на опытно-промышленных установках Нижнетагильского металлургического комбината и Московского коксогазового завода. В настоящее время эти установки не работают [17, 18].

В Китае на одном из заводов в провинции Шаньси (Внутренняя Монголия) эксплуатируются две вертикальные печи типа SJ производительностью около 100 тыс. т полукокса/год из углей Шеньму марки Д. Печь SJ – вертикальная, квадратная, состоит из четырех камер. Загрузка угля осуществляется сверху, периодически, синхронно связана с выгрузкой полукокса. Газ для нагрева загрузки вдувается через фурмы, установленные в стенах печи. При сгорании и частичном сжигании выделяющихся при нагреве летучих компонентов угля, образующихся внутри печи, газ равномерно нагревает загрузку угля. Камеру можно условно разделить на три зоны: в верхней происходит подсушка угля, в средней – непосредственно полукоксование, в нижней – охлаждение и выдача полукокса. В зоне полукоксования достигается температура  $750 \pm 20$  °С, в зоне охлаждения – не ниже 80 – 100 °С. Получаемый полукокк используется для производства ферросплавов – ферросилиция и ферромарганца, фосфора (класс 5 – 15 мм), карбида кальция (класс 8 – 20 мм) [21]. Такая технология также используется в Казахстане – на борту Шубаркольского разреза в 2006 г. построено шесть печей, общее производство полукокса составляет 300 тыс. т/год [19, 21].

В настоящее время одним из самых перспективных способов получения БПК считается технология «ТЕРМОКОКС» [22], принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Суть технологической концепции состоит в разделении углей с высоким выходом летучих веществ на два продукта – газовое топливо и коксовый остаток (полукокк). В рамках указанной технологии реализуются следующие способы: «ТЕРМОКОКС-С», «ТЕРМОКОКС-КС», «ТЕРМОКОКС-О<sub>2</sub>» [22].

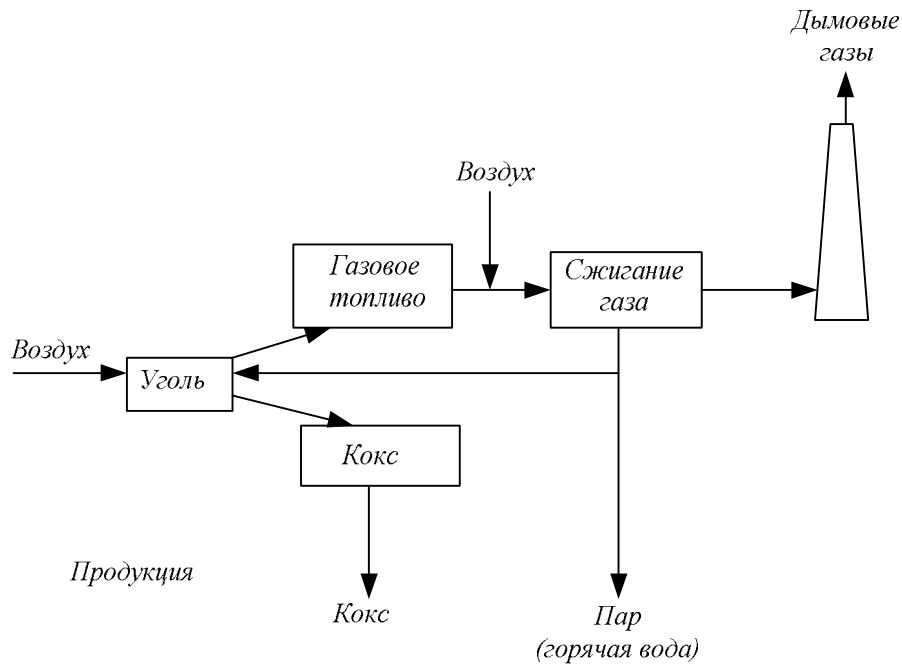


Рис. 1. Принципиальная схема технологии «ТЕРМОКОКС»

Технология «ТЕРМОКОКС-С» предусматривает частичную газификацию углей (окислительную карбонизацию) в слоевых аппаратах с использованием обращенного дутья (схема с обратной тепловой волной), продуктами являются БПК и горючий газ ( $CO + H_2$ ). В 1996 г. процесс реализован в г. Красноярске на Опытно-промышленном заводе по переработке угля (с 2000 г. – ЗАО «Карбоника-Ф») [1 – 4, 10 – 15, 22 – 26].

Технология «ТЕРМОКОКС-КС» заключается в частичной газификации углей (окислительной карбонизации) с использованием технологии кипящего слоя; продукты – БПК и тепловая энергия. Принципиальная схема технологии приведена на рис. 2. В 2007 г. процесс реализован в промышленных условиях на Березовском разрезе (ОАО «СУЭК», Красноярский край) [1 – 4, 10 – 15, 22 – 26].

Несомненным достоинством технологии «ТЕРМОКОКС-КС» является возможность ее реализации в модернизированных типовых энергетических котлах (рис. 3) [22].

Технология «ТЕРМОКОКС- $O_2$ » предусматривает частичную газификацию малозольного угля в слоевых реакторах с использованием обращенного кислородного дутья; продукты – БПК и синтез-газ. В дальнейшем синтез-газ может перерабатываться в синтетические жидкие топлива (СЖТ) [1 – 4, 10 – 15, 22 – 26]. Отличительной особенностью технологии является существенное удешевление (за счет когенерации полукокса и синтез-газа в одном агрегате) получаемого синтез-газа, и, следовательно, получаемых СЖТ (в два раза) по сравнению с другими технологиями, в т.ч. с классической технологией SASOL [22].

Таким образом, исходя из географии опытно-промышленного и промышленного применения, по технологии «ТЕРМОКОКС» перерабатываются, в первую очередь, бурые угли Березовского месторождения КАБ. Данная технология позволяет перерабатывать бурые, а также каменные угли марок Д и Г других месторождений.

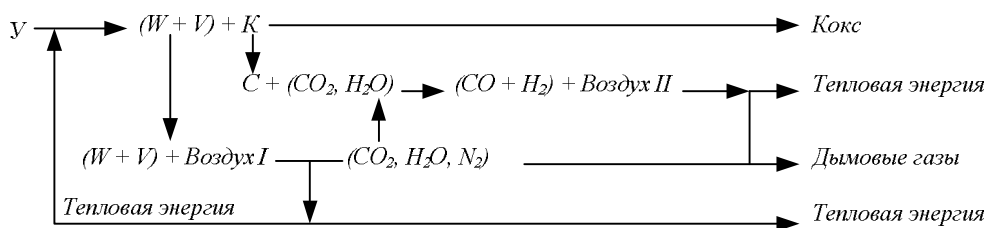


Рис. 2. Принципиальная схема технологии «ТЕРМОКОКС-КС»:

У – уголь; V – летучие вещества; W – влага; K – коксовый остаток (полукокс); С – углерод; воздух I и воздух II – первичное и вторичное воздушно-газовое дутье

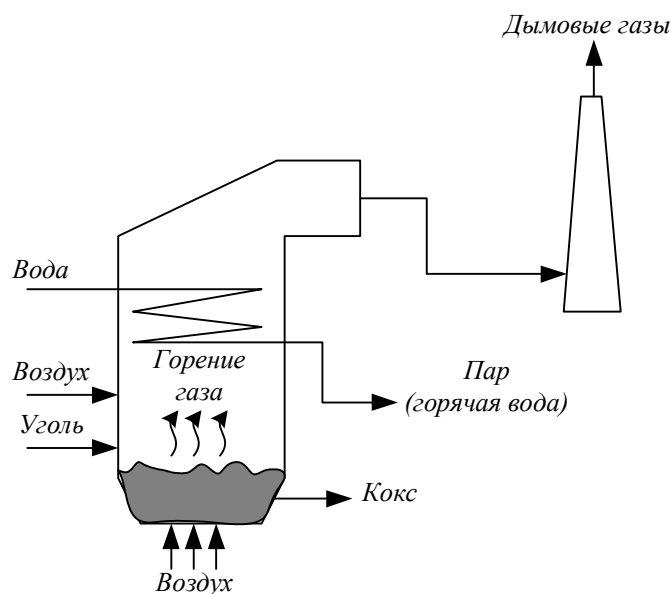


Рис. 3. Принципиальная схема технологии «ТЕРМОКОКС-КС» с использованием энергетического котла

Сравнительный анализ свойств БПК из углей Березовского месторождения КАБ (БПК березовский) [8, 17, 20], БПК из углей Таловского месторождения Томской области (БПК таловский) [27], полукокса из каменного угля марки Г Кузбасса (ООО «Завод полукоксования», г. Ленинск-Кузнецкий) (КПК ленинск-кузнецкий) [7, 16, 21] и полукокса из каменного угля марки ДГ Черемховского месторождения Иркутского бассейна (Ангарский завод нефтеоргсинтеза) (КПК ангарский) [7, 16] представлен в таблице.

Из приведенных данных видно, что БПК березовский обладает следующими преимуществами по сравнению с полукоксами из мало-метаморфизованных углей других месторождений:

- зольность на сухую массу ниже на 53, 16 и 214 % по сравнению с БПК таловским, КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским соответственно;

- содержание фиксированного углерода ( $C_{fix}$ ) выше на 4, 10 и 15 % по сравнению с БПК таловским, КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским соответственно;

- содержание в золе  $CaO + MgO$  выше на 288 и 1633 % по сравнению с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским соответственно;

- пористость выше на 9 % по сравнению с КПК ленинск-кузнецким;

- удельная поверхность выше на 21 и 45 % по сравнению с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским соответственно;

- содержание углерода на сухую беззольную массу ( $C^{daf}$ ) выше на 2 и 1 % по сравнению

с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским соответственно;

- реакционная способность по  $CO_2$  при 1000 °С ( $PC$ ) выше на 20 и 49 % по сравнению с БПК таловским и КПК ленинск-кузнецким соответственно.

Кроме технологических свойств, БПК из углей Березовского месторождения КАБ обладает следующими преимуществами в плане производства: БПК таловский получен лишь в лабораторных условиях; КПК ленинск-кузнецкий производится в объеме 60 тыс. т/год [28], чего явно недостаточно для удовлетворения потребности в нем; производство КПК ангарского остановлено в начале 1990-х гг. В то же время, на Березовском разрезе производится около 25 тыс. т/год БПК на одну установку. При этом имеется технологическая возможность увеличения объема производства до 100 – 125 тыс. т/год и более при проведении модернизации эксплуатирующихся энергетических котлов.

Анализ рынков сбыта КПК ленинск-кузнецкого и БПК березовского позволяет выделить следующие основные сферы их применения.

Ленинск-Кузнецкий завод полукоксования производит два вида полукокса (П-2 и П-3), опробованных и применяемых в следующих областях [29]: в качестве восстановителя в металлургических процессах (производство ферросплавов); компонента шихты для коксования, производства карбида кальция и активированного угля; раскислителя стекла; для термической обработки стали; топлива для кузниц; на агломерационных фабриках для спекания же-

### Свойства полукоксов из малометаморфизованных углей различных месторождений

| Свойства   | Полукок         |               |                        |               |
|--|-----------------|---------------|------------------------|---------------|
|  | БПК березовский | БПК таловский | КПК ленинско-кузнецкий | КПК ангарский |
| 1. Влажность на рабочую массу, %   | 1,2             | Нет св.       | 13,8                   | 17,0          |
| 2. Зольность на сухую массу, %   | 8,6             | 13,2          | 10,0                   | 27,0          |
| 3. Выход летучих веществ на сухую беззольную массу, %                              | 9,5             | 7,7           | 17,2                   | 5,6           |
| 4. Содержание фиксированного углерода, %   | 81,9            | 79,1          | 74,5                   | 67,4          |
| 5. Химический состав золы, %:  |                 |               |                        |               |
| SiO <sub>2</sub>   | 19,0            | Нет св.       | 35,1                   | 75,7          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 10,5            | То же         | 26,8                   | 11,2          |
| CaO + MgO  | 52,0            | -//-          | 13,4                   | 3,0           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 5,8             | -//-          | 20,6                   | 7,6           |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | Нет св.         | -//-          | 1,25                   | 0,03          |
| SO <sub>3</sub>  | 4,4             | -//-          | Нет св.                | Нет св.       |
| Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O   | 2,8             | -//-          | То же                  | То же         |
| 6. Удельное электросопротивление собственное, Ом·см                                | Нет св.         | -//-          | 11,649                 | 6,014         |
| 7. Удельное электросопротивление в засыпи кусков 3 – 6 мм, Ом·см                   | То же           | -//-          | 1,6·10 <sup>6</sup>    | 75,0          |
| 8. Плотность кажущаяся, г/см <sup>3</sup>  | 0,924           | -//-          | 0,869                  | 0,820         |
| 9. Плотность истинная, г/см <sup>3</sup>   | 1,846           | -//-          | 1,606                  | 1,820         |
| 10. Пористость, %  | 49,9            | -//-          | 45,9                   | 55,0          |
| 11. Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г  | 264,0           | -//-          | 217,5                  | 182,0         |
| 12. Элементный состав, %:  |                 |               |                        |               |
| содержание углерода на сухую беззольную массу                                      | 90,85           | -//-          | 88,83                  | 89,70         |
| содержание водорода на сухую беззольную массу                                      | 1,97            | -//-          | 2,97                   | 1,63          |
| содержание азота на сухую беззольную массу   | 0,89            | -//-          | 2,76                   | 1,53          |
| содержание кислорода на сухую беззольную массу                                     | 6,16            | -//-          | 5,24                   | 6,23          |
| содержание серы на сухую беззольную массу  | 0,13            | -//-          | 0,20                   | 0,91          |
| 13. Реакционная способность по CO <sub>2</sub> при 1000 °С, см <sup>3</sup> /(г·с) | 6,48            | 5,40          | 4,35                   | 9,80          |

лезной руды; в качестве выгорающих добавок для производства пористо-пустотного глиняного (строительного) кирпича; для энергетических целей (сжигание в котельных в смеси с рядовым углем).

Буроугольный полукокк из углей Березовского месторождения КАБ опробован и применяется в следующих областях: в качестве бездымного высококалорийного топлива [1 – 3, 5, 7, 13, 14, 22]; сырья для производства водорода путем газификации [7]; восстановителя в металлургических процессах; в производстве ферросплавов заменяет коксовый орешек; используется в качестве восстановителя для прямого (недоменного) получения железа из руд, для приготовления пылеугольного топлива для вдувания в горн доменной печи [1 – 3, 7, 10, 13, 14, 22, 23, 25, 26]; добавки в шихту для коксования [1, 7, 16]; углеродного сорбента [22 – 24]; как высококалорийный компонент смесевых топлив самого различного назначения, например, для обжига цементного клинкера или для спекания глинозема [2].

Спрос на БПК из углей Березовского месторождения КАБ может составлять от 5 до 10 млн. т/год [30], такой полукокк особенно интересен для производителей ферросплавов. В 2012 г. достигнута договоренность о проведении промышленных испытаний по использованию брикетов из БПК на Надеждинском металлургическом заводе. В конце 2012 г. выполнена поставка 1000 т брикетов из БПК на ОАО «Серовский завод ферросплавов», ООО «СГМК-ферросплавы» и ООО «Металекс». В 2013 г. на ферросплавные заводы поставка брикетов из БПК происходила на постоянной основе. В настоящее время ведутся работы по созданию брикета из БПК для кремниевых заводов ОАО «РУСАЛ» [31]. Планируется заменить дорогостоящие колумбийские угли на БПК при производстве кремния. Опыты пройдут на ЗАО «Кремний» (г. Шелехов). Годовая потребность ОАО «РУСАЛ» в углях – около 50 тыс. т. Замена их на БПК позволит сэкономить около 50 млн. руб./год [32, 33]. Заключен договор на поставку БПК в количестве 3 тыс.

т/год с НИИ экологических проблем металлургии для использования в сталеплавильном производстве Новолипецкого металлургического комбината. Также БПК возможно использовать в металлургических производствах, где уголь применяют в пылевидной фракции. Именно такую технологию практикует Ачинский глиноземный комбинат. Также потенциальными потребителями БПК могут стать предприятия «Кузбассэнерго» в Кемеровской области [30].

Стоимость бурого угля марки 2Б Канско-Ачинского бассейна составляет 450 – 550 руб./т, каменного угля марки Г Кузнецкого бассейна – 1200 – 1400 руб./т, БПК Березовского месторождения КАБ – 2500 руб./т, полукокса ООО «Завод полукоксования» (г. Ленинск-Кузнецкий) марки П-2 (класс 10 – 100 мм) – 5500 руб./т, марки П-3 (класс 0 – 10 мм) – 2500 руб./т, коксового орешка – 5000 – 6000 руб./т, кокса класса 25 – 40 мм – 6000 – 7000 руб./т [34].

**Выводы.** Проведенный анализ состояния производства, свойств и областей применения полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений позволяет сделать вывод, что наиболее перспективно производство и потребление бурого угольного полукокса Березовского месторождения КАБ ввиду его более высоких свойств по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений, технологической возможности его крупнотоннажного производства, относительно низкой стоимости, а также значительной потребности в нем многих областей промышленности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исламов С.Р., Степанов С.Г. Глубокая переработка угля: введение в проблему выбора технологии // Уголь. 2007. № 10. С. 55 – 58.
2. Исламов С.Р. Экономический кризис как побуждение к глубокой переработке угля // Уголь. 2013. № 2. С. 46 – 48.
3. Исламов С.Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо // Уголь. 2012. № 3. С. 64 – 66.
4. Романов С.М. Перспективы развития добычи, переработки и использования бурых углей в России // Уголь. 2009. № 1. С. 15 – 17.
5. Головин К.С., Крапчин С.С. Переработка углей – стратегическое направление повышения качества и расширения

- сфер их использования // Уголь. 2006. № 6. С. 64 – 67.
6. Угли СССР: справочник / И.А. Ульянов, А.П. Солдатенков, В.К. Дмитриев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 308 с.
7. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие / Н.Н. Балмасов, В.К. Бранчугов, В.С. Быкадоров и др.; под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: изд. Московского государственного горного университета, 1999. – 648 с.
8. Страхов В.М., Суrowцева И.И., Долинский В.А. и др. Буроугольный полукокс. Возможности его использования как топлива в агломерации железных руд // Кокс и химия. 2007. № 8. С. 20 – 26.
9. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 2. Регионы и бассейны / Н.Н. Балмасов, В.К. Бранчугов, В.С. Быкадоров и др.; под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: изд. Московского государственного горного университета, 1999. – 448 с.
10. Королёва А. Пароль – КАТЭК. В День шахтера свое 35-летие отмечает Березовский разрез в Красноярском крае // Уголь. 2010. № 8. С. 36.
11. ОАО «СУЭК-Красноярск»: задачи на перспективу // Уголь. 2011. № 8. С. 18, 19.
12. Федоров А.В., Иншаков В.Ю. ОАО «СУЭК-Красноярск»: результаты 2010 года и задачи на 2011 год // Уголь. 2011. № 3. С. 18 – 20.
13. Федоров А.В. СУЭК-Красноярск: итоги, проблемы, перспективы // Уголь. 2009. № 5. С. 48 – 51.
14. Лалетин Н.И. ОАО «СУЭК-Красноярск» – 2011 год: стабильность и развитие // Уголь. 2012. № 3. С. 15 – 18.
15. Филиал ОАО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Березовский-1». Мы – за прозрачные, честные отношения // Уголь. 2012. № 4. С. 10, 11.
16. Мизин В.Г., Серов Г.В. Углеродистые восстановители для ферросплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
17. Страхов В.М. Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Кокс и химия. 2008. № 9. С. 44 – 49.
18. Страхов В.М., Святлов Б.А., Голвачев Н.П. и др. Технология производства кокса из углей Шубаркольского разреза. Оценка его качества как углероди-

- стого восстановителя для выплавки ферросплавов // Кокс и химия. 2004. № 10. С. 16 – 20.
19. Г л е з и н И.Л., Ш а м п а р о в А.Г., С т р а х о в В.М. Полукоксование длиннопламенных углей Шубаркольского месторождения в газогенераторах // Кокс и химия. 2009. № 8. С. 25 – 29.
  20. Ш к о л л е р М.Б. БПК – модификатор свойств кокса и угольных смесей // Кокс и химия. 2007. № 12. С. 18 – 24.
  21. С т р а х о в В.М. С у р о в ц е в а И.В., Д ь я ч е н к о А.В., М е н ь ш е н и н В.М. Технология производства и качество полукокса из вертикальных печей типа SJ Китая // Кокс и химия. 2007. № 5. С. 17 – 24.
  22. И с л а м о в С.Р. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «ТЕРМОКОКС»: автореф. дис. докт. техн. наук. – Красноярск, 2010. – 37 с.
  23. И с л а м о в С.Р. О новой концепции использования угля // Уголь. 2007. № 5. С. 67 – 69.
  24. Г р и н ь к о Н.К. Использование чистых угольных технологий в России // Уголь. 2006. № 1. С. 6 – 8.
  25. И с л а м о в С.Р. Переработка бурого угля по схеме энерготехнологического кластера // Уголь. 2009. № 3. С. 65 – 67.
  26. Ф е д о р о в А.В. ОАО «СУЭК-Красноярск»: миллионы тонн «черного золота» // Уголь. 2013. № 8. С. 12 – 14.
  27. С т р о к и н а И.В. Разработка научных основ и определение технологических режимов углеродотермического восстановления и окисления железа в водородосодержащей атмосфере: автореф. дис. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2013. – 22 с.
  28. С т р а х о в В.М. Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Материалы научной конференции «Перспективы развития химической переработки горючих ископаемых» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/cgi-bin/getpage.exe?cn=333&uid=0.24549786420539&inte=2>. (Дата обращения: 17.07.2014).
  29. ООО Завод полукоксования. Полукокс каменноугольный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zavodpolukoksovaniya.pulscen.ru/goods/121282-polukokx-kamennougolny>. – (Дата обращения: 17.07.2014).
  30. СУЭК нашел покупателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.krasnoyarsk.biz/articles/analytics/2008/03/14/suek>. (Дата обращения: 17.07.2014).
  31. Металлурги заинтересовались Березовским полукоксом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news\\_45066.html](http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news_45066.html). (Дата обращения: 17.07.2014).
  32. Русал и СУЭК будут использовать полукокс бурого угля для производства кремния [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mining24.ru/2013/09/rusal-i-suek-budut-ispolzovat-poukoks-burogo-uglya-dlya-proizvodstva-kremniya/>. (Дата обращения: 17.07.2014).
  33. Интересы «Русала» все шире – от Содерберга до катанки и угольного пека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusal.ru/presenter/news\\_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1](http://www.rusal.ru/presenter/news_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1). (Дата обращения: 17.07.2014).
  34. Кокс металлургический и доменный. Динамика цен [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.metaltorg.ru/metal\\_catalog/metallugicheskoye\\_syrye\\_i\\_polufabrikaty/koks/coke/](http://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallugicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/koks/coke/). (Дата обращения: 27.07.2014).

© 2014 г. А.Е. Аникин, Г.В. Галевский  
Поступила 10 сентября 2014 г.

*А.С. Водолеев<sup>1</sup>, Е.С. Черданцева<sup>2</sup>, И.А. Куренский<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

<sup>2</sup>Торгово-экономический техникум

<sup>3</sup>НФИ Кемеровский государственный университет

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ШЛАМОХРАНИЛИЩА ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Шламохранилище, расположенное на поверхности надпойменной террасы реки Томь, является накопителем шламовых отходов предприятий, находящихся в промышленной зоне ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Общая его площадь составляет более 300 га при высоте около 25 м. Со всех сторон шламохранилище окружено дамбой, сооруженной из шлака конвертерного производства и крупнодисперсных отходов углеобогащения. Изучаемый объект, согласно классификации промышленных отвалов В.В. Тарчевского [1], по происхождению относится к отвалам перерабатывающей промышленности наливного типа; по возрасту – к свежим; по форме – к полям нарушений с разнообразным мезо- и микрорельефом; по высоте – к средним; по механическому составу субстрата на поверхности дамбы – к крупномерным (камни и глыбы свыше 5 см); по кислотности – от нейтральной (6,5) до слабощелочной (8,3); по утилизации – к неиспользуемым.

Дамба шламохранилища представляет собой трапециевидное в разрезе сооружение, внешний склон которого террасирован. Всего на склонах дамбы сформированы две террасы, плоская поверхность которых используется для прокладки технологических дорог. Одновременно эти террасы выполняют защитную роль, охраняя дамбу от разрушения водно-эрозионными и дефляционными процессами, хотя при этом их бровки и крутые склоны продолжают достаточно интенсивно разрушаться. Таким образом, наиболее важной с точки зрения охраны окружающей среды является устойчивость сооружения к различным естественным средам (водной, ветровой эрозии) и возможность последующей рекультивации, направленной на сокращение негативного воздействия шламов на окружающую среду.

Для закрепления эрозионно-опасных участков поверхности террас требуется применение рекультивационных методов, в частности методов биологической рекультивации. При этом

в ходе рекультивации должны быть созданы условия для развития культурфитоценозов с прочной дерниной. Ширина террас изменяется в пределах 10 – 40 м, борта их в настоящее время не закреплены (крутизна определяется углом естественного откоса), и по этой причине они подвержены разрушению водно-эрозионными и дефляционными процессами.

Террасы, расположенные в нижней трети склона дамбы, испытывают периодический подпор водами, фильтрующимися сквозь тело дамбы и транзитом, проходящими в водоотводной канал, окружающий дамбу. В результате отсутствия в породах, слагающих дамбу, фракций физической глины и соответственно капиллярной каймы, достигающей поверхности, фильтрация не только не приводит к переувлажнению верхних слоев породы, но даже к их достаточному увлажнению. Таким образом, неблагоприятный гранулометрический состав субстрата дамбы, а также сильное переуплотнение породы в значительной степени препятствуют естественному зарастанию и развитию процессов почвообразования.

Постоянное присутствие на небольшой глубине в породах террасы дренажных вод представляет собой потенциальную экологическую опасность, поскольку создаются условия для развития в толще пород анаэробных восстановительных процессов. Эта опасность остается потенциальной до тех пор, пока в системе не появится свежее органическое вещество, способное сильно активизировать восстановительные процессы. Такое вещество будет образовываться при проведении биологической рекультивации, особенно с использованием отходов от очистки городских канализационных стоков – осадков сточных вод (ОСВ) – в качестве почвоулучшителя. Усиление восстановительных процессов может привести к повышенному растворению токсичных элементов, формированию новых токсичных соединений из водорастворимых продуктов, по-



ступающих в толщу террасы из гидроотвала. Эти соединения могут мигрировать в водоотводной канал и конечную зону аккумуляции дренажных вод.

Проведение полевых экспериментов на шламохранилище ЗСМК показало, что использование ОСВ в достаточном количестве позволяет улучшить агрохимические параметры субстрата в сформированном корнеобитаемом слое. Увеличение мощности нанесения ОСВ от 10 до 20 см позволяет повысить в корнеобитаемом слое сумму фракций физической глины и, следовательно, водоудерживающую способность субстрата, а также улучшить его агрохимические параметры, что создает условия для относительно стабильного функционирования культурфитоценоза и развития процессов почвообразования.

Технологический прием двойного нанесения ОСВ общей мощностью до 30 см способствует более равномерному распределению в корнеобитаемом слое фракций физической глины и увеличению мощности корнеобитаемого слоя с удовлетворительными параметрами субстрата по плотности и водоудерживающей способности. Этот прием значительно сокращает зависимость растительного покрова от режима атмосферных осадков и повышает устойчивость его развития и функционирования.

С целью комплексной оценки экологической безопасности использования ОСВ на данном объекте в течение ряда лет на рекультивированных участках дамбы шламохранилища ЗСМК проводится мониторинг, в котором отслеживается жизненное состояние растительного покрова по биометрическим и физиологическим показателям, изменение химического состава и санитарно-гигиенических показателей поверхностного субстрата.

Установлено, что при внесении ОСВ на поверхность дамбы шламохранилища содержание основных биогенных элементов в поверхностном слое рекультивированных участков возрастает: углерода – до 12,3 %, азота – до 0,92 %. При этом уровень загрязнения тяжелыми металлами снижается: для ванадия – от 3-го (среднего) до 2-го (низкого), для олова и ртути – от 2-го до 1-го (допустимого). Показатели для мышьяка, меди, никеля и цинка соответствуют низкому уровню, а для свинца, хрома, кобальта, кадмия и фтора – допустимому, т.е. остаются неизменными. По содержанию подвижных форм тяжелых металлов (меди, цинка, свинца и никеля) сформированный при внесении ОСВ субстрат шламохранилища отнесен ко 2-му (низкому) уровню загрязнения.

Содержание кобальта и хрома ниже или соответствует уровню ПДК (6,4 мг/кг).

По микробиологической характеристике патогенная микрофлора в изучаемом материале не обнаружена и соответствует СанПиН 4630 – 88 «Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения» [2]. Внесение ОСВ повышает уровень микробной заселенности до эколого-трофического разнообразия, поэтому ОСВ как мелиоранты отнесены к «загрязненным» по показателям «коли-титр».

По комплексной оценке загрязнения поверхностного субстрата установлено, что уровень загрязнения тяжелыми металлами в результате размещения ОСВ снижается: в породе углеобогащения для ванадия – от 3-го до 2-го, для олова и ртути – от 2-го до 1-го. Без изменения остаются показатели для мышьяка, меди, никеля, цинка – низкий уровень, для свинца, хрома, кобальта, кадмия и фтора – допустимый уровень. В конвертерном шлаке уровень загрязнения для ванадия колеблется от 5-го (очень высокого) до 2-го (низкого) без значительных изменений по другим элементам. Для мышьяка, свинца, хрома, меди, никеля, цинка – низкий уровень, для олова ртути, кобальта, кадмия и фтора – допустимый уровень загрязнения [3].

Анализ химического состава биомассы растений является показателем возможного вторичного загрязнения в результате выноса токсичных элементов из корнеобитаемого слоя. По результатам исследований установлено превышение ПДК мышьяка, свинца, цинка, никеля, меди и сурьмы в шлаке и осадках сточных вод. Сопоставление содержания указанных элементов в растениях показало, что мышьяк в них не был обнаружен (также отсутствуют кадмий, селен, бериллий). В растениях опытных участков содержатся, мг/кг: 0,3 – 1,4 Pb, 64 – 400 Zn, 0,7 – 1,2 Ni, 3,7 – 9,2 Cu, 0,7 – 2,7 V, 148 – 274 Mn. При этом валовое содержание этих элементов в техноземах (порода + ОСВ и шлак + ОСВ) составило соответственно, мг/кг: свинца – 29 и 40, цинка – 239 и 191, никеля – 32 и 22, меди – 67 и 68, ванадия – 157 и 157, марганца – 563 и 756. Эти данные показывают, что с точки зрения выноса токсичных элементов потенциальную опасность представляет цинк. Усвоение растениями тяжелых металлов максимально в первые годы размещения ОСВ, с годами концентрация их снижается и становится ниже фонового уровня.

Результаты исследований подтвердили избирательность растений к разным химическим элементам: в люцерне меди накапливается 9 мг/кг, хрома – 2,7 мг/кг, ванадия – 2,7 мг/кг;

содержание этих элементов в злаках составило соответственно 6,9; 1,4; 0,7 мг/кг.

**Выводы.** Комплексная оценка экологической безопасности использования осадков сточных вод на породах шламохранилища ЗСМК показала, что они не могут рассматриваться в качестве источника внесения дополнительного загрязнения в породы шламохранилища. Содержание питательных элементов в сформированных техноземах при размещении ОСВ повышается, что обеспечивает успешное произрастание многолетних трав. Подбор видового состава высеваемых трав определяется их устойчивостью к экстремальным условиям, способностью формировать прочный дерновый горизонт и при этом травосмесь должна создавать фитомелиоративный эффект, что позволяет сформировать устойчивый культурфитоценоз в условиях неблагоприятного техногенного воздействия промышленных отходов ЗСМК. Выноса тяжелых металлов с растительным материалом не происходит, что свидетельствует об эффек-

тивности проводимых мероприятий по биологической рекультивации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Т а р ч е в с к и й В.В. Классификация промышленных отвалов // Растительность и промышленные загрязнения: Охрана природы на Урале. 1970. Вып. 7. С. 84 – 89.
2. СанПиН 4630 – 88 «Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения». Утверждено Минздравом СССР 04.07.1988.
3. Методика исчисления размера вреда окружающей среде, причиненного нарушением требований законодательства в области охраны окружающей среды. Утверждена Постановлением № 105 Коллегии Администрации Кемеровской области 26.04.2007.

© 2014 г. А.С. Водолеев, Е.С. Черданцева,  
И.А. Куренский

Поступила 12 сентября 2014 г.

УДК 628.474.76

*Е.П. Волынкина, К.И. Домнин*

Сибирский государственный индустриальный университет

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ СВАЛОЧНОГО ГАЗА НА ЗАКРЫТЫХ СВАЛКАХ ТБО

Одним из основных видов антропогенного воздействия свалок и полигонов ТБО на окружающую среду является загрязнение атмосферного воздуха свалочным газом (СГ), образующимся в результате естественного биологического разложения органических компонентов, складываемых на свалках отходов. Основными компонентами СГ являются метан (40 – 60 %) и диоксид углерода (30 – 45 %). Теплота сгорания СГ составляет 18 – 25 МДж/м<sup>3</sup>. Метан и углекислый газ относятся к числу парниковых газов, при этом парниковый эффект метана в 21 раз превышает парниковый эффект углекислого газа. На изолированных российских свалках образование метана является причиной их самовозгорания, приводит к трудно ликвидируемым пожарам и выделению в атмосферу значительного коли-

чества токсичных веществ, являющихся продуктами неполного сгорания горючих компонентов отходов (оксиды углерода, серы и азота, полициклические углеводороды, включая бензапирен, хлорфторуглеводороды, включая диоксины и фураны). Образование СГ продолжается в течение десятков лет после прекращения приема отходов, при этом наиболее активная фаза газовыделения составляет 20 – 30 лет.

Международный опыт показывает, что единственным способом прекращения выделения в атмосферу свалочного газа является его организованное удаление через систему скважин и коллекторов с последующим сжиганием. Тепло от его сжигания может быть эффективно использовано на расположенных поблизости объектах или для получения электроэнергии, передаваемой в местные энергосистемы.

Для технико-экономической оценки и проектирования систем сбора СГ необходимо надежное прогнозирование его количества. Статистические данные Рамочной конвенции ООН по изменению климата по проектам сбора СГ, реализованным в качестве проектов механизма чистого развития Киотского протокола в 2003 – 2010 гг., продемонстрировали недопоставку единиц сокращения выбросов по сравнению с исходными прогнозами, в среднем, около 50 % [1]. Авторами отмечается, что наиболее существенной причиной расхождений считается переоценка потенциала газообразования в связи с наличием факторов неопределенности моделирования, связанных с недостаточностью входных данных о характеристиках отходов, условиях в теле полигона и влиянии методов эксплуатации.

Модели газообразования описывают динамику образования СГ во времени в зависимости от состава и графика захоронения отходов. Известно множество математических моделей для оценки газоносного потенциала полигонов ТБО [1 – 4]. Все известные методы оценки газоносного потенциала полигонов базируются на модели процесса анаэробной деструкции целлюлозосодержащих отходов. Для долгосрочного прогнозирования образования свалочного биогаза наиболее часто используют модели, основанные на реакции разложения первого порядка, дифференциальное кинетическое уравнение которой запишется как

$$\frac{dC}{dt} = k_{\text{пр}} C, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация реагирующего вещества;  $t$  – момент времени;  $\frac{dC}{dt}$  – скорость реакции;  $k_{\text{пр}}$  – коэффициент пропорциональности.

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид экспоненты, т.е. концентрация исходного вещества со временем изменяется по экспоненциальному закону:

$$C = C_0 e^{-k_{\text{пр}} t}. \quad (2)$$

Экспоненциальная математическая модель образования СГ, основанная на реакции разложения первого порядка, имеет вид

$$G_t = G_0 (1 - e^{-kt}), \quad (3)$$

где  $G_t$  – количество образующегося газа по годам, м<sup>3</sup>/т отходов;  $G_0$  – общее количество образующегося газа (потенциал газообразова-

ния), м<sup>3</sup>/т отходов;  $k$  – константа скорости разложения, равная натуральному логарифму периода полураспада отходов ( $k = \ln t_{1/2}$ );  $t$  – возраст отходов, лет.

Точность расчетного прогнозирования зависит от полноты учета всех влияющих на процесс факторов, например, морфологического состава отходов, типа свалки или полигона, наличия и масштабов очагов возгораний и др.

Наиболее известными моделями, опробованными в условиях разных стран, являются:

- модель, разработанная Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) – модель IPCC (2006 г.);

- Land GEM Model, разработанная Агентством защиты окружающей среды США (EPA) (2005 г.) и ее модифицированные варианты:

- Украинская модель, разработанная НТЦ «Биомасса» (Институт теплофизики АН Украины) (2009 г.);

- Восточно-Европейская модель (2013 г.).

Сравнение моделей и величин их основных показателей приведено в табл. 1, откуда видно, что все модели представляют собой экспоненциальные уравнения реакции первого порядка, но учитывают различные, влияющие на процесс метанообразования, факторы. При этом модели IPCC рассчитывают динамику образования метана, а Украинская и Восточно-Европейская – в целом СГ (LFG – Landfill Gas). Все модели учитывают морфологический состав отходов при расчете потенциала метанообразования  $L_0$ , но в модели IPCC потенциал метанообразования рассчитывается по эмпирической формуле, а в остальных моделях принимается в зависимости от типа полигона (в Американской), категории отходов (в Украинской) или типа отходов (в Восточно-Европейской).

Значения константы реакции  $k$  все более уточняются от модели к модели. Так, если в модели IPCC даны только минимальные (0,02) и максимальные (0,2) значения, то в Американской модели предлагается уже пять значений – от 0,02 до 0,7 в зависимости от типа полигона, в Украинской – шестнадцать значений в зависимости от категории отходов и типа региона, а в Восточно-Европейской – двадцать в зависимости от категории отходов и климата. В Украинской модели значения  $k$  принимаются в зависимости от типа региона, в котором находится свалка и типа отходов (очень быстро разлагающиеся, медленно разлагающиеся и т.д.). Регионы, включенные в данную модель,

## Сравнение математических моделей образования свалочного биогаза

| Параметры модели  | Модель IPCC   | Американская модель Land GEM (EPA)   | Украинская модель  | Восточно-Европейская модель  |
|---|---|--|--|--|
| Объем образования свалочного газа/метана в расчетный год, $Q$ , м <sup>3</sup> /год | $Q_{CH_4} = L_0 M_i e^{kt}$   | $Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_j}$   | $Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) (e^{-kt_j}) (MFC)(F)$  | $Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) (e^{-kt_j}) (MFC)(F)$  |
| Потенциал метанообразования, $L_0$ , м <sup>3</sup> /т отходов                      | $L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot C_{CH_4} \cdot 16 / (12 \cdot 0,0007168)$<br>$C_{CH_4}$ – доля метана в биогазе; 16 – молекулярная масса метана; 12 – то же углерода; 0,0007168 – плотность метана, т/м <sup>3</sup>   | <u>Тип полигона:</u><br>соответствующий требованиям EPA – 170<br>засушливый, соответствующий требованиям EPA – 170<br>обычный (инвентаризованный) – 100<br>засушливый (инвентаризованный) – 100<br>влажный биореактор (инвентаризованный) – 96 | <u>Категория отходов:</u><br>очень быстро разлагающиеся – пищевые и др.орг. – 69<br>средне быстро разлагающиеся – садовые – 126<br>средне медленно разлагающиеся – бумага, картон, текстиль – 214<br>медленно разлагающиеся – дерево, кожа, кости, солома – 201  | <u>Тип отходов:</u><br>пищевые – 70<br>садовые – 93<br>бумага – 186<br>дерево и солома – 200<br>текстиль и одноразовые подгузники – 112<br>$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot 16 / (12 \cdot 0,0007168)$   |
| Коэффициент метановой генерации (константа реакции), $k$ , год <sup>-1</sup>        | <u>Категория климата/Категория отходов:</u><br>максимальное значение 0,2: влажный климат, быстро разлагаемые отходы с периодом полураспада до 3 лет, например, пищевые<br>минимальное значение 0,02: сухой климат, медленно разлагаемые отходы с периодом полураспада до 35 лет, например, древесные и бумажные | <u>Тип полигона:</u><br>соответствующий требованиям EPA – 0,05<br>сухой, соответствующий требованиям EPA – 0,02<br>обычный (инвентаризованный) – 0,04<br>сухой (инвентаризованный) – 0,02<br>влажный биореактор (инвентаризованный) – 0,7      | <u>Категория отходов/Тип региона (Средний уровень осадков):</u><br>очень быстро разлагающиеся – пищевые и др.орг.: 0,110; 0,120; 0,140; 0,150; средне быстро разлагающиеся – садовые: 0,055; 0,060; 0,070; 0,075; средне медленно разлагающиеся – бумага, картон, текстиль: 0,022; 0,024; 0,028; 0,030; медленно разлагающиеся – дерево, кожа, кости, солома: 0,011; 0,012; 0,014; 0,015 | <u>Категория отходов/Категория климата (Влажный, умеренно влажный, умеренный, умеренно сухой, сухой):</u><br>очень быстро разлагающиеся – пищевые и др.орг.: 0,180; 0,160; 0,140; 0,120; 0,100; средне быстро разлагающиеся – садовые: 0,090; 0,080; 0,070; 0,060; 0,050; средне медленно разлагающиеся – бумага, картон, текстиль: 0,036; 0,032; 0,028; 0,024; 0,020; медленно разлагающиеся – дерево, кожа, кости, солома: 0,018; 0,016; 0,014; 0,012; 0,010 |
| $M_i$ , т   | –   | –  | –  | –  |
| Поправочный коэффициент метанообразования, MCF                                      | <u>Тип полигона:</u><br>контролируемый анаэробный – 1,0<br>управляемый полуанаэробный – 0,5<br>неконтролируемый глубокий (> 5 м) и/или с высоким уровнем грунтовых вод – 0,8  | –  | <u>Тип полигона/Глубина (&lt; 5 м / &gt; = 5 м):</u><br>неуправляемая свалка – 0,4/0,8<br>управляемый полигон – 0,8/1,0<br>полуанаэробный полигон – 0,4/0,5<br>неизвестный – 0,4/0,8   | <u>Тип полигона/Глубина (&lt; 5м/5-10 м / &gt; = 10 м):</u><br>свалка – 0,4/0,4-0,7/0,8<br>контролируемый полигон или свалка – 0,7/0,7 – 0,8/0,9<br>санитарный полигон: 0,9/0,9-   |

| Параметры модели  | Модель IPCC   | Американская модель Land GEM (EPA) | Украинская модель  | Восточно-Европейская модель   |
|---|---|------------------------------------|--|---|
|   | неконтролируемый неглубокий (< 5 м) – 0,4<br>вне категории – 0,6  |                                    |  | 0,95/1,0<br>неизвестный – 0,4/0,4 – 0,7/0,8   |
| Поправочный коэффициент учета возгорания, $F$                     | –   | –                                  | для низких воздействий – 1/3<br>для средних воздействий – 2/3<br>для сильных воздействий – 1   |   |
| Корректирующий коэффициент эффективности сбора                    | –   | –                                  | Влияющие факторы:<br>- практика управления захоронением (наличие почвенного покрова, уплотнения отходов и выравнивания, контроль за размещением отходов, контроль за вывозом мусора, борьба с пожарами, системы управления фильтратом);<br>- система сбора газа и степень охвата ею полигона;<br>- глубина захоронения отходов;<br>- покрытие (тип и степень);<br>- изоляция полигона;<br>- уплотнение специальной техникой;<br>- размеры активной области захоронения;<br>- управление фильтратом |   |
| Оценка окисления метана, ОХ                                       | <u>Тип полигона:</u><br>управляемый, неуправляемый и вне категории – 0<br>управляемый, укрытый метано-окисляющим материалов – 0,1   | –                                  | –  | Значение по умолчанию – 10 %<br>Расчет по формуле:<br>(эффективность сбора, %) · (20 % · % области с финальным покрытием + 10% · % области с промежуточным покрытием + 5% · % области с ежедневным покрытием)   |
| Масса (доля) биологически разложимого органического углерода, DOC | Рассчитывается по формуле:<br>$DOC = (0,4A) + (0,17B) + (0,15C) + (0,3D)$<br>$A$ – доля отходов бумаги и текстиля; $B$ – доля садовых отходов; $C$ – доля пищевых отходов; $D$ – доля древесных отходов | –                                  | –  | Рассчитывается по формуле:<br>$DOC = (0,4A) + (0,2B) + (0,15C) + (0,43D) + (0,24E) + (0,05F) + (0,39G) + (0,18H) + (0,15I)$<br>$A, B, C, D$ – то же, что и для модели IPCC; $E$ – доля отходов текстиля и одноразовых подгузников; $F$ – доля осадков сточных вод; $G$ – доля резины; $H$ – доля смешанных отходов; $I$ – доля промышленных отходов |
| $DOC_f$   | 0,5   | –                                  | –  | 0,5   |
| $C_{CH_4}$  | 0,5   | –                                  | –  | 0,5   |

относятся исключительно к территории Украины. В Восточно-Европейской модели коэффициент  $k$  зависит уже от типа климата и также от типа отходов, как и в Украинской модели.

Во всех моделях присутствует поправочный коэффициент метанообразования, численные значения которого различаются, но всегда зависят от глубины свалки и от типа управления свалкой. В Восточно-Европейской модели шире, чем в остальных моделях, рассмотрена зависимость этого коэффициента от глубины свалки.

Восточно-Европейская модель включает в себя структуры модели IPCC и Украинской модели и допускает возможность расчета объемов образования свалочного газа по собственным данным о климате и составе отходов. В целом Украинская модель представляет собой уточненную Американскую, а Восточно-Европейская основана на Американской, но содержит некоторые элементы модели IPCC. Восточно-Европейская модель учитывает наибольшее количество влияющих факторов и поэтому является в настоящее время наиболее универсальной.

Необходимо отметить, что Американская, Восточно-Европейская и модель IPCC были разработаны для климатических условий и высоких стандартов захоронения отходов развитых западных стран. Применение моделей в странах с другим составом отходов, неразвитой системой управления ТБО может приводить к существенным погрешностям. В связи с этим в Украинской модели учтены такие нехарактерные для западных полигонов факторы, как окисление метана на открытых свалках, влияние возгораний и др.

При расчете динамики образования СГ важнейшее значение имеет точность расчета значения параметра  $L_0$ , описывающего общее количество метана, которое потенциально может выделить 1 т разлагающихся отходов, и зависящего почти исключительно от состава захороненных отходов. Величина  $L_0$  является функцией содержания способной к разложению органической части в захороненных отходах. Обычно  $L_0$  рассчитывается на основе морфологического состава исходных ТБО и доли фактически разложившейся органической части, принятой в модели IPCC, – 0,5, а в Восточно-Европейской – 0,77. Для точности расчета этого параметра важнейшее значение имеет правильность данных о морфологическом составе захороненных отходов. Во всех без исключения моделях предлагается использовать известные в настоящий момент данные о морфологическом составе отходов. При от-

сутствии таких данных в Восточно-Европейской модели, например, используется по умолчанию имеющаяся в базе данных информация для разных стран, например:

- Сербия: пять категорий, в том числе для четырех крупнейших городов (Белград, Крагуевац, Ниш и Нови-Сад) и для всех других городов;

- Польша: три категории, в том числе одна для больших городов с населением свыше 50000 человек, одна для небольших городов с населением менее 50000 человек и одна для сельских районов;

- Болгария: две категории, в том числе одна для столицы Софии и одна для всех других областей;

- Украина: одна категория для всей Украины.

Однако такой метод обуславливает значительную неточность, особенно в условиях старых закрывающихся российских свалок, по следующим причинам:

- морфологический состав отходов, захораниваемых в разные периоды эксплуатации свалки, был различным и неизвестен;

- в период закрытия свалки и создания системы дегазации органические отходы уже разложились, причем в различной степени в зависимости от конкретных условий;

- начальное состояние захороненных отходов в период создания системы дегазации совершенно не соответствует морфологическому составу исходных отходов, направляемых на захоронение в этот период.

В связи с этим, для достижения наиболее точного модельного прогнозирования образования СГ на старых закрывающихся свалках целесообразно использовать в расчетах  $L_0$  данные о фактическом состоянии захороненных отходов (свалочном грунте), включая их фактический морфологический состав и степень разложения органических компонентов.

В период 2011 – 2013 гг. на старой свалке г. Новокузнецка, закрытой в 2009 г., была создана пилотная установка и проведены полевые исследования, целью которых являлась оценка ресурсов и состава СГ и свалочного метана на долгосрочный период для последующего выполнения технико-экономического обоснования возможности коммерческого использования СГ для выработки тепловой и электрической энергии [5, 6]. Для проведения полевых исследований на экспериментальном участке свалки в ноябре – декабре 2011 г. пробурены три вертикальные скважины глубиной 9 – 10 м при глубине отходов 13 – 14 м. Каждая скважина осуществляла дренаж СГ в радиусе до

20 м (2,0 – 2,5 глубины). В процессе бурения скважин отбирались пробы отходов послойно с шагом 1 м по всей глубине. С целью определения стадии биоразложения органических компонентов отходов и фазы, в которой находится метаногенерирующая экосистема внутри свалочного тела, а также определения потенциала метанообразования выполнены исследования морфологического состава и свойств отходов по глубине свалки (свалочный грунт).

В табл. 2 представлены результаты исследования морфологического состава отобранных проб и для сравнения исходных отходов.

Как видно из представленных данных, содержание в отходах таких биологически неразлагаемых компонентов, как стекло, металл, камни и пластмассы не зависело от глубины их залегания и определялось содержанием их в захораниваемых в каждом конкретном слое исходных отходов. Содержание стекла колебалось от нуля на глубине 2,1 – 3,1 м в скважине № 1 до 32,28 % на глубине 2 м в скважине № 2. Металлы, главным образом железо, в 11-ти из 27 исследованных пробах отсутствовали, максимальное содержание металлов составило 5,5 % на глубине 0,2 м в скважине № 1. Максимальное содержание

Т а б л и ц а 2

**Морфологический состав отходов на свалке ТБО, г. Новокузнецк**

| Глубина скважины, м     | Содержание компонентов, % |             |             |             |             |             |             |             | Свалочный грунт   |
|-------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
|                         | Стекло                    | Металл      | Резина      | Пластмасса  | Камни       | Дерево      | Бумага      | Текстиль    |   |
| Исходные отходы         | 6,5                       | 2,75        | 3,0         | 4,0         | 2,0         | 2,0         | 28,0        | 5,0         | Пищевые – 35,0<br>Отсев (менее 15 мм) – 8,0<br>Прочее – 2,5 |
| Скважина № 1            |                           |             |             |             |             |             |             |             |   |
| 1,3                     | 1,83                      | 5,50        | 0,00        | 11,01       | 33,03       | 3,67        | 0,92        | 0,00        | 44,04   |
| 2,0                     | 0,14                      | 0,53        | 0,00        | 2,02        | 5,01        | 1,16        | 0,00        | 0,00        | 91,04   |
| 2,8                     | 0,00                      | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 8,89        | 4,44        | 0,00        | 0,00        | 86,67   |
| 2,9                     | 0,00                      | 0,00        | 0,00        | 3,50        | 15,05       | 36,71       | 0,00        | 13,67       | 31,07   |
| 3,8                     | 0,00                      | 0,00        | 0,00        | 0,57        | 0,00        | 2,21        | 0,00        | 0,00        | 97,21   |
| 4,3                     | 0,00                      | 0,00        | 0,00        | 0,08        | 0,00        | 6,11        | 0,00        | 0,00        | 93,81   |
| 5,3                     | 0,02                      | 0,00        | 0,00        | 0,06        | 1,45        | 0,55        | 0,00        | 0,00        | 97,92   |
| 6,3                     | 0,11                      | 0,00        | 0,00        | 0,07        | 0,30        | 0,55        | 0,00        | 0,02        | 99,35   |
| 6,8                     | 2,00                      | 0,23        | 0,00        | 0,46        | 2,96        | 0,00        | 0,00        | 0,00        | 94,36   |
| 8,4                     | 1,26                      | 1,41        | 0,00        | 0,53        | 2,65        | 0,75        | 0,00        | 0,00        | 93,40   |
| 9,2                     | 3,80                      | 0,00        | 0,00        | 0,78        | 1,56        | 0,41        | 0,00        | 0,00        | 93,46   |
| <b>Среднее значение</b> | <b>0,83</b>               | <b>0,70</b> | <b>0,00</b> | <b>1,73</b> | <b>6,45</b> | <b>5,14</b> | <b>0,08</b> | <b>1,24</b> | <b>83,85</b>  |
| Скважина № 2            |                           |             |             |             |             |             |             |             |   |
| 2,1                     | 12,64                     | 1,53        | 0,00        | 3,33        | 23,68       | 3,77        | 0,54        | 0,00        | 54,50   |
| 3,1                     | 32,28                     | 0,00        | 0,00        | 9,57        | 2,82        | 0,62        | 0,00        | 0,00        | 82,81   |
| 4,1                     | 0,55                      | 0,00        | 0,00        | 1,59        | 0,58        | 3,79        | 0,00        | 0,00        | 93,49   |
| 5,1                     | 0,88                      | 0,14        | 0,57        | 1,43        | 2,72        | 0,81        | 0,00        | 0,54        | 92,97   |
| 6,1                     | 1,36                      | 0,00        | 0,31        | 0,53        | 3,48        | 0,41        | 0,00        | 0,00        | 93,91   |
| 7,7                     | 2,19                      | 0,22        | 0,00        | 1,03        | 4,11        | 1,43        | 0,00        | 0,00        | 91,01   |
| 8,7                     | 3,74                      | 2,13        | 1,95        | 1,15        | 1,29        | 1,38        | 0,00        | 0,80        | 87,56   |
| 9,6                     | 1,97                      | 0,00        | 2,16        | 2,92        | 4,20        | 2,67        | 0,00        | 2,54        | 83,53   |
| <b>Среднее значение</b> | <b>6,95</b>               | <b>0,50</b> | <b>0,62</b> | <b>2,69</b> | <b>5,36</b> | <b>1,86</b> | <b>0,07</b> | <b>0,49</b> | <b>84,97</b>  |
| Скважина № 3            |                           |             |             |             |             |             |             |             |   |
| 3,7                     | 0,67                      | 0,13        | 0,27        | 1,26        | 2,22        | 1,37        | 0,00        | 0,01        | 94,07   |
| 4,7                     | 0,91                      | 0,08        | 0,62        | 0,76        | 9,08        | 0,44        | 0,00        | 0,02        | 88,09   |
| 5,2                     | 0,37                      | 0,00        | 0,02        | 0,30        | 0,73        | 0,73        | 0,00        | 0,00        | 97,85   |
| 6,2                     | 1,26                      | 1,50        | 0,35        | 0,80        | 4,77        | 1,39        | 0,00        | 0,02        | 89,92   |
| 6,7                     | 0,76                      | 0,82        | 0,55        | 0,60        | 10,24       | 1,52        | 0,00        | 0,00        | 84,74   |
| 7,7                     | 0,69                      | 1,30        | 1,11        | 0,56        | 4,58        | 2,33        | 0,03        | 0,32        | 89,09   |
| 8,6                     | 0,65                      | 1,80        | 1,99        | 0,22        | 5,27        | 1,01        | 0,00        | 0,05        | 89,01   |
| 9,1                     | 1,52                      | 1,76        | 0,74        | 0,89        | 4,43        | 0,54        | 0,00        | 0,07        | 90,06   |
| <b>Среднее значение</b> | <b>0,85</b>               | <b>0,92</b> | <b>0,71</b> | <b>0,67</b> | <b>5,17</b> | <b>1,17</b> | <b>0,00</b> | <b>0,06</b> | <b>90,35</b>  |

камней найдено в верхних слоях отходов в скважинах № 1 (33,03 %) и № 2 (23,68 %), что обусловлено размещением в местах отбора проб строительных отходов. Содержание пластмасс колебалось от нуля до 11 %. Резина отсутствовала в скважине № 1 и в незначительном количестве (в среднем 0,62 – 0,71 %) содержалась в отходах скважин № 2 и № 3.

Основными биоразлагаемыми компонентами ТБО, являющимися причиной образования биогаза, являются пищевые отходы с периодом биологического разложения 1 год, отходы бумаги, текстиль – 2 – 3 года, древесина – до 10 лет. В результате проведенных исследований установлено, что отходы в скважинах не содержат пищевых компонентов, которые полностью разложились и стали компонентом свалочного грунта. В отходах практически не содержались компоненты бумаги (небольшое содержание зафиксировано лишь в верхних слоях отходов в скважинах № 1 и № 2), которые также перешли в свалочный грунт в результате разложения. Содержание древесины имело тенденцию к снижению по глубине скважины, что свидетельствует о закономерном увеличении степени ее разложения. Количество текстиля было незначительным (0 ч 0,50 %) за исключением пробы 1 в скважине № 1 на глубине 2,1 м (13,67 %). Содержание свалочного грунта, представляющего собой продукты разложения органических компонентов отходов, в основном колебалось от 83 до 99 % за исключением трех проб со значительно меньшим содержанием, что было обусловлено, главным образом, высокой концентрацией камней. При исключении проб с непредставительно низким содержанием свалочного грунта и высоким содержанием камней среднее содержание свалочного грунта составило 89 – 94 % при незначительных колебаниях вокруг средних значений.

Таким образом, отсутствие по глубине скважины пищевых отходов и бумаги свидетельствует о полном завершении процессов гидролиза и минерализации этих органических компонентов ТБО; низкое содержание текстиля также показывает достаточно высокую степень его минерализации, отходы древесины еще находятся в стадии гидролиза. В связи с этим более обоснованной для оценки экономической эффективности создания и эксплуатации системы дегазации на закрытой свалке является оценка потенциала метанообразования  $L_0$  с учетом фактического состояния образовавшихся свалочных грунтов. Результаты проведенных исследований свалочных грунтов о содержании органической массы и выходу

летучих веществ, характеризующему долю способного к разложению органического вещества, позволяют выполнить такие расчеты (см. табл. 3).

Полученные данные показывают, что зольность грунтов по глубине свалочного тела на территории экспериментального участка колеблется от 72 до 84,5 %, соответственно содержание в грунтах органической массы колеблется от 15,5 до 28 %. При этом органическая масса свалочных грунтов характеризуется высоким выходом летучих веществ – от 56,5 до 93,8 %. Средние значения выхода летучих веществ по скважинам составили: № 1 – 82,43 %, № 2 – 75,77 %, № 3 – 72,37 %. Высокий уровень выхода летучих веществ характеризует органическую массу свалочных грунтов как слабо разложившуюся с высоким содержанием легко разлагающихся летучих органических компонентов. При этом наблюдается экстремальная зависимость выхода летучих веществ от глубины свалочного тела с максимумом на глубине 3 – 6 м. Вероятными причинами такой зависимости могут быть окисление легколетучих компонентов органической массы в верхних слоях свалки атмосферным воздухом в процессе длительного тления или даже горения в поверхностных слоях и закономерное увеличение степени разложения в нижних слоях.

На основании полученных данных выполнен расчет показателя  $L_0$  по уравнению Восточно-Европейской модели образования СГ (табл. 1). Результаты расчета, представленные в табл. 3, показали, что наибольшим потенциалом метанообразования обладают отходы в скважине № 2 – среднее значение  $L_0 = 121,36 \text{ м}^3/\text{т}$ , а наименьшим потенциалом метанообразования обладают отходы в скважине № 3 –  $L_0 = 97,17 \text{ м}^3/\text{т}$ . При этом значения показателя  $L_0$  для размещенных в теле свалки отходов на момент проведения полевых исследований были близки к заданным в Восточно-Европейской модели  $L_0$  для таких медленно разлагаемых компонентов ТБО, как садовые отходы ( $L_0 = 93 \text{ м}^3/\text{т}$ ), текстиль ( $L_0 = 112 \text{ м}^3/\text{т}$ ) и бумага ( $L_0 = 186 \text{ м}^3/\text{т}$ ).

С использованием полученных данных были выполнены прогнозные расчеты динамики образования и извлечения СГ на свалке ТБО г. Новокузнецка по Восточно-Европейской модели на период с момента проведения полевых исследований до 2030 г. (скорректированная Восточно-Европейская модель). Для сравнения были выполнены также прогнозные расчеты по Украинской и Восточно-Европейской моделям с использованием рекомендованного моде-



**Свойства свалочных грунтов и расчетные показатели потенциала метанообразования отходов на свалке ТБО г. Новокузнецка**

| Глубина, м              | Зольность, $A^d$ ,<br>% сух. массы | Содержание органической массы, % сух. массы | Выход летучих веществ $V^{daf}$ , % орг. массы | $L_0$ , м <sup>3</sup> /т отходов |
|-------------------------|------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| <b>Скважина № 1</b>     |                                    |   |  |                                   |
| 1,3                     | 78,53                              | 21,47                                       | 56,54  | 47,96                             |
| 2,0                     | 76,81                              | 23,19                                       | 85,23  | 137,05                            |
| 2,8                     | 74,16                              | 21,53                                       | 83,32  | 127,52                            |
| 3,8                     | 78,16                              | 21,84                                       | 84,70  | 139,79                            |
| 4,3                     | 82,04                              | 17,96                                       | 93,85  | 136,00                            |
| 5,3                     | 80,95                              | 19,05                                       | 86,38  | 121,41                            |
| 6,3                     | 80,83                              | 19,17                                       | 84,12  | 120,71                            |
| 6,8                     | 82,60                              | 17,40                                       | 85,18  | 104,06                            |
| 8,4                     | 79,01                              | 20,99                                       | 77,90  | 115,50                            |
| 9,2                     | 77,33                              | 22,67                                       | 81,36  | 129,33                            |
| <b>Среднее значение</b> | <b>78,88</b>                       | <b>21,12</b>                                | <b>82,43</b>                                   | <b>117,93</b>                     |
| <b>Скважина № 2</b>     |                                    |   |  |                                   |
| 2,1                     | 73,74                              | 26,26                                       | 64,68  | 77,72                             |
| 3,1                     | 72,53                              | 27,47                                       | 83,18  | 142,44                            |
| 4,1                     | 80,28                              | 19,72                                       | 86,21  | 128,71                            |
| 5,1                     | 81,66                              | 18,34                                       | 91,47  | 120,81                            |
| 6,1                     | 76,71                              | 23,29                                       | 75,46  | 124,47                            |
| 7,7                     | 76,10                              | 23,90                                       | 69,62  | 115,86                            |
| 8,7                     | 72,01                              | 27,99                                       | 63,39  | 122,88                            |
| 9,6                     | 72,33                              | 27,67                                       | 72,15  | 138,03                            |
| <b>Среднее значение</b> | <b>75,67</b>                       | <b>24,33</b>                                | <b>75,77</b>                                   | <b>121,36</b>                     |
| <b>Скважина № 3</b>     |                                    |   |  |                                   |
| 3,7                     | 84,53                              | 15,47                                       | 65,68  | 74,52                             |
| 4,7                     | 84,50                              | 15,50                                       | 80,24  | 84,12                             |
| 5,2                     | 82,76                              | 17,24                                       | 79,73  | 101,98                            |
| 6,2                     | 81,79                              | 18,21                                       | 76,57  | 97,50                             |
| 6,7                     | 76,63                              | 23,37                                       | 60,55  | 93,13                             |
| 7,7                     | 77,42                              | 22,58                                       | 65,94  | 106,17                            |
| 8,6                     | 78,50                              | 21,50                                       | 76,35  | 111,69                            |
| 9,1                     | 78,73                              | 21,27                                       | 73,88  | 108,25                            |
| <b>Среднее значение</b> | <b>80,61</b>                       | <b>19,39</b>                                | <b>72,37</b>                                   | <b>97,17</b>                      |

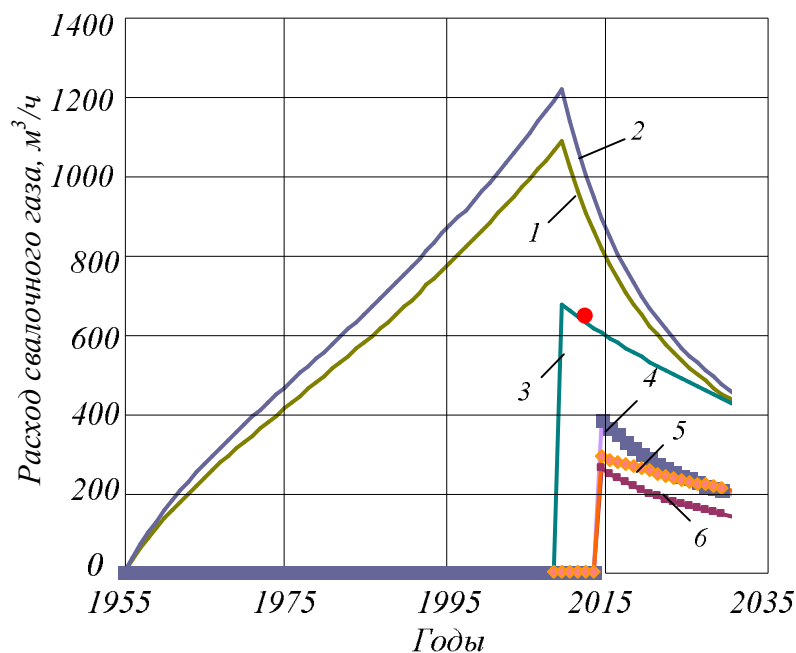
лями морфологического состава ТБО на период с момента начала захоронения ТБО на свалке г. Новокузнецка (1955 г.) до 2030 г. Результаты представлены на рисунке, откуда видно, что прогнозная величина образования СГ по скорректированной модели с использованием экспериментальных данных о фактическом состоянии отходов в теле свалки значительно ниже расчетных значений по моделям, использующим данные об исходном морфологическом составе ТБО.

В 2012 – 2013 гг. с помощью созданной пилотной установки проведены полевые исследования состава и расхода СГ в динамических условиях (насосный тест), на основании результатов которых определен расход СГ и свалочного метана в этот период. Полученное

значение фактического расхода СГ, составляющее 648 м<sup>3</sup>/ч, отмечено на рисунке.

Расчетные значения образования СГ в 2013 г. составили: по Украинской модели – 912 м<sup>3</sup>/ч, а по Восточно-Европейской модели – 1006 м<sup>3</sup>/ч, что на 36,6 % выше значения, полученного насосным тестом. Расчетное значение образования СГ в 2013 г. по скорректированной Восточно-Европейской модели с учетом фактического состояния отходов в теле свалки составило 633 м<sup>3</sup>/ч, что всего лишь на 3 % ниже полученного в насосном тесте экспериментального значения.

Очевидно, что результаты экспериментальных исследований очень близки к расчетному значению по скорректированной Восточно-Европейской модели, в то время как модельные оценки по исходной Восточно-Европейской и Украинской моделям существенно завышены.



Динамика образования и извлечения СГ на свалке ТБО г. Новокузнецка:  
 образование СГ: 1 – Украинская модель; 2 – Восточно-Европейская модель; 3 – скорректированная Восточно-Европейская модель; сбор (извлечение) СГ: 4 – Восточно-Европейская модель; 5 – скорректированная Восточно-Европейская модель; 6 – Украинская модель; ● – насосный тест

**Выводы.** Наиболее точные и реалистичные прогнозы образования свалочного газа для старых закрытых свалок в условиях российских регионов могут быть получены на основе скорректированной Восточно-Европейской модели с учетом состояния свалочных грунтов на момент сооружения системы дегазации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П у х н ю к А.Ю. Исследование газообразования на старых украинских полигонах твердых бытовых отходов // Промышленная теплотехника. 2012. Т. 34. № 4. С. 83 – 93.
2. S t e g e A.G. Steps towards initiating LFG utilization projects indeveloping countries – planning process, LFG models, and managing projects expectations // Proceedings of Methane to Markets Partnership Expo, Delhi, India. – 2010. Access mode: [http://www.globalmetane.org/expo\\_india10/docs/postexpo/landfill\\_stege.pdf](http://www.globalmetane.org/expo_india10/docs/postexpo/landfill_stege.pdf). (Дата обращения: 05.09.2013).
3. Coops O., Luning L., Oonk H., Weenk A. Validation of landfill gas formation models // Proceedings from Sardinia 1995 Fifth International Landfill Symposium, Cossu/Stegmann (eds.). CISA publisher, 1995. P. 635 – 746.
4. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронений твердых бытовых отходов. Утверждены Государственным комитетом Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу 25.04.2003, 2003. – 19 с.
5. В о л ы н к и н а Е.П., А н и к и н А.Е., Д о м н и н К.И. Исследования ресурсов свалочного метана: российский опыт // Твердые бытовые отходы. 2012. № 12. С. 26 – 32.
6. В о л ы н к и н а Е.П., А н и к и н А.Е., Д о м н и н К.И. Исследование свалочных грунтов из скважин пилотной установки по извлечению биогаза с территории свалки ТБО г. Новокузнецка // Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия промышленных регионов России: Сб. докладов четвертой международной научно-практической конференции, 23 – 25 октября 2012 г. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2012. С. 262 – 277.

© 2014 г. Е.П. Волынкина, К.И. Домнин  
 Поступила 5 сентября 2014 г.

*В.И. Ливенец*

Сибирский государственный индустриальный университет

**ПОЛУЧАЕМЫЕ ИЗ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ДРУГИХ ОТХОДОВ БРИКЕТЫ И ГРАНУЛЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

Малодымные брикеты для технологических целей с высокой механической прочностью и термостойкостью могут быть получены при использовании в качестве углеродистого наполнителя тонкодисперсных материалов с низким выходом летучих веществ (например, коксовой или полукоксковой пыли или антрацита). Как связующее при получении таких брикетов по предлагаемой технологии может быть рекомендован концентрат лигносульфонатов, а в случае повышенных требований к сернистости брикетов – его смеси (в виде эмульсий) с битумами, мягкими пеками, мелассой (отход сахарного производства) [1, 2].

В табл. 1 приведены характеристики лабораторных образцов высушенных брикетов, изготовленных из коксовой пыли установки сухого тушения кокса или дробленой коксовой мелочи, а также их смесей с измельченным антрацитом Листвянского месторождения (Новосибирская обл.) с использованием в качестве связующего концентрата лигносульфонатов (за термостойкость принимали проч-

ность брикета на сбрасывание после ударного нагрева при 900 °С в течение 30 мин).

С применением предложенной технологии на опытно-промышленной установке ОАО «Тальменка-Холдинг-ЖБИ» (Алтайский край) получены опытные партии брикетов из дробленой коксовой мелочи ОАО «Кокс» (г. Кемерово) с добавлением 10 % концентрата лигносульфонатов. Эти брикеты успешно испытаны в качестве частичных заменителей кокса при ваграночной плавке чугуна на ОАО «Универсал» (г. Новокузнецк) и на ряде других предприятий. Работа проведена под руководством М.С. Никишанина и Е.Г. Григоркина (ОАО «Тальменка-Холдинг-ЖБИ») [4, 5].

При получении брикетов топливного и технологического назначения из тонкодисперсных углеродсодержащих материалов и отходов была применена разработанная малооперационная технология, которая (в отличие от классической) позволяет практически исключить наиболее энергоемкий и экологически самый неблагоприятный этап – термическую сушку

Т а б л и ц а 1

**Характеристики брикетов для технологических целей на основе коксовой и полукоксковой мелочи и пыли**

| Состав смеси, %                              | Расход связующего, % | Давление прессования, МПа | Параметры брикета |          | Прочность высушенных брикетов |                | Термостойкость, % |
|--|----------------------|---------------------------|-------------------|----------|-------------------------------|----------------|-------------------|
|  |                      |                           | диаметр, мм       | масса, г | на сбрасывание*, %            | на сжатие, МПа |                   |
| Пыль УСТК – 100                              | 8                    | 25,0                      | 50                | 80       | 96,10                         | 8,73           | 97,2              |
| Пыль УСТК – 100                              | 8                    | 100,0                     | 50                | 80       | 98,50                         | 11,42          | 99,8              |
| Дробл. коксовая мелочь – 100                 | 10                   | 37,5                      | 80                | 275      | 98,40                         | 8,74           | 96,9              |
| Дробл. коксовая мелочь – 85<br>Антрацит – 15 | 10                   | 37,5                      | 80                | 275      | 97,40                         | 8,50           | 95,0              |
| Дробл. коксовая мелочь – 70<br>Антрацит – 30 | 10                   | 37,5                      | 80                | 275      | 89,70                         | 5,15           | 94,0              |
| Дробл. отсевы полукокса – 100                | 8                    | 25,0                      | 50                | 50       | 97,10                         | 7,08           | 86,7              |
| Дробл. отсевы полукокса – 100                | 8                    | 100,0                     | 50                | 50       | 98,10                         | 8,07           | 90,9              |

\*Испытания для оценки прочности брикетов проводились по стандартным методикам на раздавливание и сбрасывание, приведенными в работе [3].

исходного тонкодисперсного сырья [4, 5]. Эта технология дает возможность получать брикеты и коксбрикеты для технологических нужд на базе коксовой и полукоксовой мелочи и пыли, а также прочные и термостойкие топливные брикеты для коммунально-бытовых нужд на базе отвальных шламов ряда ЦОФ.

Посредством грануляции на тарельчатом грануляторе с использованием в качестве связующих водных растворов жидкого стекла и концентрата лигносульфонатов получены углеминеральные композиции из пылевидных отходов печей для производства ферросилиция (основой которых является кремнезем) и тонкодисперсных углеродистых материалов (отсевов коксика и буроугольного полукокса (БПК)). Высушенные гранулы (при соотношении содержания  $C_{акт}/SiO_2 = 0,55$ ) предложено использовать для получения кремнистых сплавов и металлургического карбида кремния, способ получения которого предусматривает прокаливание высушенных гранул в печи при 1800 °С [5].

Свойства гранул и получаемых из них продуктов приведены в табл. 2. Гранулы, для которых в качестве связующего использованы лигносульфонат или жидкое стекло, имеют высокую прочность. При окомковании смесей на воде (без связующего) получают менее прочные и относительно мелкие гранулы, которые, однако, вполне приемлемы для использования, например, при получении карбида кремния.

**Выводы.** При брикетировании и грануляции различных пылевидных отходов (в том числе

углеродистых) достаточно квалифицированно решается не только вопрос их утилизации, что положительно сказывается на экономике основных технологических процессов, но и снижается ущерб, наносимый окружающей среде.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2107089 РФ. Смесь для получения топливных брикетов / Динельт В.М., Ливенец В.И. // Открытия, изобретения. 1998. № 8. С. 403.
2. Динельт В.М., Ливенец В.И., Страхов В.М. Получение топлива и специальных видов кокса на основе окомкования углей и углеродистых материалов // Кокс и химия. 2003. № 12. С. 40 – 43.
3. Тайц Е.М., Андреева И.А. Методы анализа и испытания углей. – М: Недра, 1983. – 301 с.
4. Динельт В.М., Ливенец В.И., Никишанин М.С., Григоркин Е.Г. Малооперационная технология получения брикетов из тонкодисперсных углеродистых материалов и отходов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 6. С. 61 – 63.
5. А.с. 1730035 СССР. Способ получения карбида кремния / Динельт В.М., Ливенец В.И. // Открытия, изобретения. 1992. № 16. С. 110.

© 2014 г. В.И. Ливенец  
Поступила 10 сентября 2014 г.

Т а б л и ц а 2

#### Качественные характеристики высушенных гранул на основе пылевидных отходов производства ферросилиция и тонкодисперсных углеродистых материалов

| Состав смеси, %    |                |      |                |               |      | Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> | Прочность на раздавливание, Н/гранула | Количество сбрасываний с высоты 1 м без разрушения | Выход SiC, % |
|--------------------|----------------|------|----------------|---------------|------|--|---------------------------------------|--|--------------|
| твердые материалы  |                |      | связующее      |               |      |  |                                       |  |              |
| пыль ферросплавная | отсевы коксика | БПК  | лигносульфонат | жидкое стекло | вода |  |                                       |  |              |
| 48,6               | 33,8           | –    | 8,8            | –             | 8,8  | 1,38                                   | 13,7                                  | 10   | –            |
| 48,6               | 33,8           | –    | 2,5            | –             | 15,1 | 1,29                                   | 6,0                                   | 7  | 43,6         |
| 48,6               | 33,8           | –    | –              | –             | 17,6 | 1,06                                   | 1,2                                   | 3  | 45,2         |
| 48,6               | 33,8           | –    | –              | 17,6          | –    | 1,56                                   | 13,5                                  | 9  | 65,0         |
| 48,6               | 33,8           | –    | –              | 8,8           | 8,8  | 1,47                                   | 12,0                                  | 8  | –            |
| 48,6               | 33,8           | –    | –              | 5,9           | 11,7 | 1,4                                    | 6,5                                   | 5  | –            |
| 44,7               | –              | 39,1 | 8,1            | –             | 8,1  | 1,38                                   | 13,7                                  | 9  | 78,7         |
| 44,7               | –              | 39,1 | 4,8            | –             | 11,4 | 1,36                                   | 8,5                                   | 8  | –            |
| 44,7               | –              | 39,1 | –              | –             | 16,2 | 1,14                                   | 1,1                                   | 4  | –            |

Л.Б. Павлович, А.А. Крауцер

Сибирский государственный индустриальный университет

## КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ВЫБРОСОВ УЧАСТКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НАФТАЛИНОВОЙ ФРАКЦИИ

Участок кристаллизации нафталиновой фракции (УКНФ) предназначен для выделения нафталина из нафталиновой фракции и его отгрузки в жидком или твердом виде. Вентиляционные выбросы и выбросы емкостного оборудования УКНФ характеризуются наличием высокой концентрации нафталина в сублимированном виде и незначительным содержанием органических примесей, в том числе фенола, цианистого водорода, аммиака и др. В УКНФ очистке подлежат вентиляционные выбросы четырех комплексов (гидравлический пресс-кристаллизатор-вентилятор) объемом  $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$  каждый; при одновременной работе двух вентиляторов объем выбросов составит  $16000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , выбросы 12 воздушников емкостного оборудования (два напорных бака, три плавильника нафталина, четыре хранилища нафталина, три сборника прессовых оттеков) объемом  $528 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Принципиальная технологическая схема УКНФ и каталитической очистки выбросов представлена на рис. 1.

По данным инвентаризации источников загрязнения атмосферного воздуха промплощадки ОАО «ЗСМК» 2011 г. выбросы УКНФ составляли 36,9 т/год, а по фактическим замерам – 58,8 т/год. Фактические замеры показали превышение лимита ПДВ в 1,6 раз. Рассчитаны экологи-

ческие риски для всех источников УКНФ. Для нормирования загрязнения окружающей среды для всех источников выбросов предлагается внедрение концепции риска. Оценка риска проводилась согласно методике, опубликованной ранее [1].

Экологический риск от всех источников выбросов УКНФ составил 52 % (см. таблицу), что превышает приемлемый уровень 2 %. Таким образом, проблема очистки выбросов УКНФ является актуальной задачей.

Предлагается осуществлять сбор выбросов коллекторной системой с дальнейшей их утилизацией посредством каталитического дожигания в шлаковом катализаторе. Схема коллекторной системы сбора и подвода выбросов к установке очистки представлена на рис. 2. Коллекторная система сбора выбросов с воздушников емкостного оборудования УКНФ (рис. 1) состоит из двух напорных баков, четырех хранилищ жидкого нафталина, трех плавильников нафталина, трех сборников оттеков прессования, которые собираются в обогреваемый коллектор и подаются через огнепреградитель на смешение с выбросами вентиляционных установок и далее на установку каталитической очистки. Коллекторная система сбора выбросов используется за рубежом и успешно начала

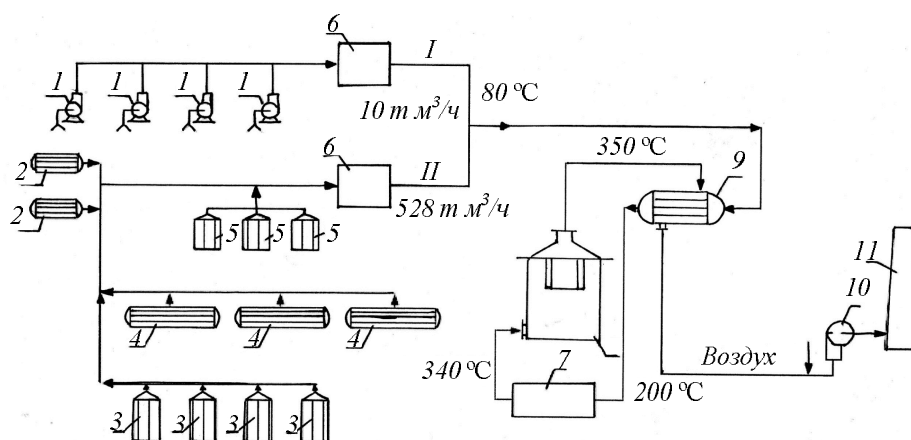


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема УКНФ и каталитической очистки выбросов:

1 – вентилятор; 2 – напорный бак; 3 – хранилища нафталина; 4 – плавильник; 5 – сборник оттеков прессования; 6 – огнепреградитель; 7 – газовый электронагреватель; 8 – каталитический реактор; 9 – трубчатый теплообменник; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба

**Экологический риск от выбросов УКНФ в атмосферу**

| Источники выбросов             | Количество источников | Наименование выбросов | Максимальная приземная концентрация, мг/ м <sup>3</sup> | Риск       |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|------------|
| Хранилища нафталиновой фракции | 4                     | Аммиак                | 0,0013  | 0,07       |
|                                |                       | Цианиды               | 0,0006  | 0,03       |
|                                |                       | Фенол                 | 0,0008  | 0,04       |
|                                |                       | Нафталин              | 0,0040  | 0,23       |
|                                |                       | Пиридин               | 0,0001  | 0,007      |
| Плавильники нафталина          | 3                     | Цианиды               | 0,070   | 0,002      |
|                                |                       | Аммиак                | 0,096   | 0,003      |
|                                |                       | Фенол                 | 0,045   | 0,005      |
| Напорные баки                  | 2                     | Нафталин              | 0,00760   | 0,004      |
|                                |                       | Пиридин               | 0,000090  | 0,0000032  |
|                                |                       | Цианиды               | 0,00190   | 0,00009    |
|                                |                       | Аммиак                | 0,00390   | 0,00009    |
|                                |                       | Фенол                 | 0,00190   | 0,00032    |
| Вентиляция                     | 4                     | Нафталин              | 4,47  | 0,47       |
|                                |                       | Пиридин               | 0,24  | 0,017      |
|                                |                       | Фенол                 | 0,29  | 0,03       |
| Суммарный риск                 |                       |                       |   | 0,52 (52%) |

функционировать на ряде предприятий Российской Федерации (Алтай-кокс, Магнитогорский металлургический комбинат).

В настоящей работе предлагается каталитическая очистка выбросов УКНФ. Технология основана на глубоком каталитическом окислении органических примесей до углекислого газа и воды. Установка (рис. 1) включает в себя следующее оборудование: каталитический реактор с газовым электронагревателем, трубчатый теплообменник, два дымососа, два вентилятора, огнепреградитель, газоходы, трубопрово-

ды, арматуру, систему КИПиА, электрооборудование, дымовую трубу.

Контактные газы, собранные в коллекторную систему с температурой 70 – 90 °С, по обогреваемому трубопроводу поступают с помощью вентилятора в термокatalитический реактор, снабженный газовым электронагревателем, где органические вещества подвергаются глубокому каталитическому окислению в слое катализатора. При окислении температура газов в реакторе поддерживается на уровне 340 – 350 °С. После термокatalитического

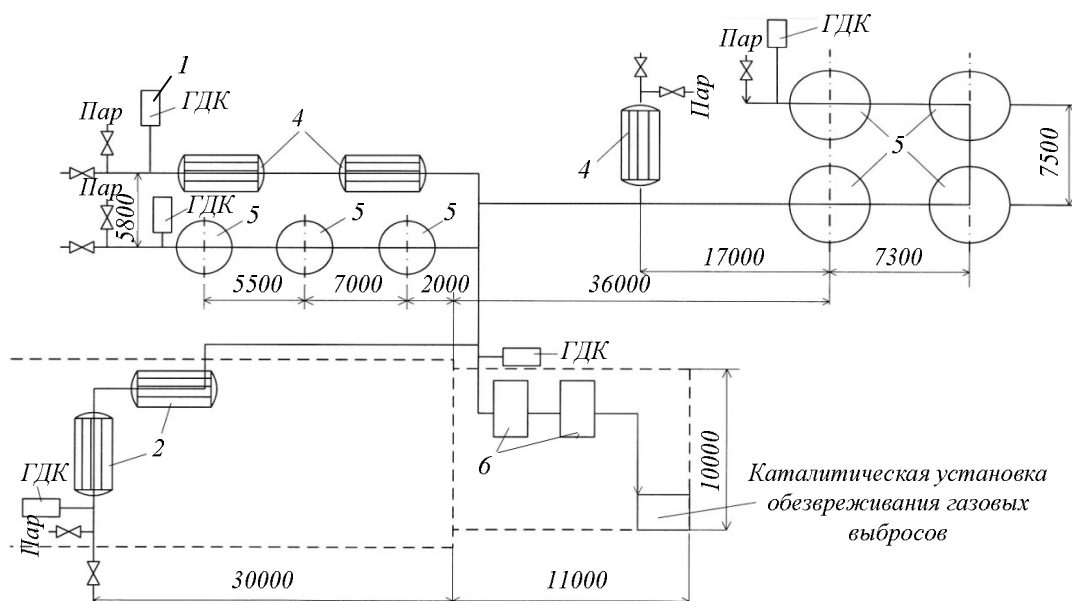


Рис. 2. Принципиальная схема коллекторной системы сбора выбросов емкостного оборудования участка кристаллизации нафталина:

1 – гидравлический клапан; 2 – напорный бак; 3 – хранилища нафталина; 4 – плавильник; 5 – сборник оттеков прессования; 6 – огнепреградитель

реактора очищенные контактные газы с температурой 350 – 360 °С по трубопроводу поступают в теплообменник, где отдают тепло технической воде и охлаждаются до 200 °С. Из теплообменника очищенные газы удаляются по дымососам и выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу. Предусмотрен подсос воздуха до дымососа для предотвращения его нагрева. Корзина с катализатором может подвергаться воздействию температур, достигающих до 600 °С, поэтому она должна выполняться из жаростойкой нержавеющей стали.

Реактор предлагаемой конструкции НПО «Энергосталь» представляет собой цилиндрический вертикальный аппарат. Внутри контактного аппарата на опорной трубе подвешена корзина с катализатором. С целью повышения производительности реактора, эффективности очистки газа, сокращения простоя при замене катализатора и снижения его расхода корзины выполнены из вертикально расположенных колосников, скрепленных кольцами из перфорированных трубок. Корзина жестко скреплена с фиксирующим затвором, выполненным в виде цилиндрического стакана. Поступающие в кольцевой зазор между корпусом и корзиной газы проходят в радиальном направлении слой катализатора к центру и оттуда выбрасываются в газопровод. Во время работы происходит уплотнение катализатора и самопроизвольное заполнение освобождающегося пространства за счет дополнительного слоя катализатора. При этом устраняется вероятность прохода неочищенных газов. Аппаратурный расчет каталитического реактора сводится к расчету необходимого объема катализатора для загрузки в реактор [2].

В УКНФ предлагается использовать новый катализатор для очистки газов от органических веществ и оксида углерода, который содержит активированный выщелачиванием отвальный рядовой конверторный или мартеновский шлак и оксид кобальта. Состав катализатора соответствует следующей эмпирической формуле:  $\text{Co}_a\text{Fe}_c\text{Mn}_d(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Si}, \text{Al})_g\text{O}_g$ , где  $a = 0,6$

– 1,9 %;  $c = 1,1 - 1,6$  %;  $d = 0,9 - 1,7$  %;  $f = 16 - 18$  %;  $g$  – число атомов кислорода, необходимое для насыщения валентности всех элементов. Катализатор может дополнительно содержать оксид меди, тогда его состав соответствует следующей эмпирической формуле:  $\text{Co}_a\text{Cu}_b\text{Fe}_c\text{Mn}_d(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Si}, \text{Al})_g\text{O}_g$ , где  $a = 0,4 - 1,3$  %;  $b = 0,2 - 0,6$  %;  $c = 1,1 - 1,6$  %;  $d = 0,8 - 1,7$  %;  $f = 16 - 18$  %. Кроме того, катализатор представлен такими характеристиками, как фракционный состав (3 – 5 мм), насыпная масса (1,6 – 1,9 кг/дм<sup>3</sup>), механическая прочность (15 кг/частицу) [3].

Степень очистки полициклических ароматических углеводородов при использовании предлагаемого катализатора составляет 95 – 97 % при объемной скорости 3000 ч<sup>-1</sup> и объеме загрузки 2,4 м<sup>3</sup>.

**Выводы.** Выбросы с участка кристаллизации нафталиновой фракции превышают предельно-допустимые. Предлагаемый катализатор для очистки газов позволяет снизить экологический риск от выбросов их в атмосферу.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сокина А.А., Павлович Л.Б., Лупенко В.Г. Оценка экологического риска от загрязнения атмосферного воздуха при выдаче кокса // Вестник СибГИУ. 2012. № 2. С. 46 – 49.
2. А.с. 1268196 (СССР). Каталитический реактор / Дунаев А.В., Ерохин А.В., Серебрякова В.В. и др. // Открытия. Изобретения. 1986. № 41.
3. А.с. 1790057 (СССР). Катализатор для очистки газов от органических веществ и оксида углерода / Павлович Л.Б., Золотухин Е.А., Дряхлов А.С. и др. // Открытия. Изобретения. 1989.

© 2014 г. Л.Б. Павлович, А.А. Краутер  
Поступила 16 сентября 2014 г.



*В.П. Козлов, И.Ю. Жигadlo*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МНЕНИЯ АУДИТОРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Формирование адекватного действительности мнения о достоверности финансовой отчетности является главной целью современного аудита. Общество и бизнес-среда ожидают от аудитора объективного мнения о деятельности организаций и достоверности финансовой отчетности. В процессе формирования мнения и оформления результатов проверки в аудиторском заключении аудитор руководствуется положениями теории аудита, накопленным опытом, а также современной нормативной базой. В первую очередь необходима понятная, однозначно трактуемая и непротиворечивая регулятивная основа аудита, которая позволила бы аудитору формировать правильное мнение о достоверности отчетности, а пользователям отчетности – принимать на ее основе правильные решения. Согласно действующим в настоящее время стандартам аудита существует два вида мнения о достоверности финансовой отчетности: модифицированное и немодифицированное. Если методология и логика формирования немодифицированного мнения более или менее понятны, то при формировании модифицированного мнения, которое является наиболее распространенным в аудиторской практике, возникает масса вопросов и проблем, в том числе связанных с подготовкой аудиторского заключения [1]. Следует отметить, что заключения с модифицированным мнением аудитора заставляют пользователя обратить особое внимание на определенные аспекты проверенной бухгалтерской (финансовой) отчетности.

В то же время, из-за большой неопределенности категории «модифицированное мнение» в своей практической деятельности аудитор часто испытывает затруднения при формировании профессионального суждения о достоверности отчетности. Так, в нормативно-правовой базе современного аудита установлены основные виды (формы) модифицированного мнения аудитора, обстоятельства и условия, которые оказывают влияние на его формирование, однако отсутствуют конкрет-

ные рекомендации и методики обоснования модификации аудиторского мнения, составленного по результатам проверки. Более того, имеют место определенные противоречия и несогласованность между отдельными нормативными актами.

Согласно ФСАД 2/2010 [2], модифицированное мнение аудитор должен выразить в аудиторском заключении в случае, если:

- на основании полученных аудиторских доказательств установлено, что бухгалтерская отчетность, рассматриваемая в целом, содержит существенные искажения;
- аудитор не может получить достаточные надлежащие аудиторские доказательства, чтобы установить, что бухгалтерская отчетность, рассматриваемая в целом, не содержит существенных искажений.

Однако существует ряд факторов, на которых основывается выбор аудиторских процедур и принимается решение по поводу модификации аудиторского заключения, устанавливается зависимость той или иной формы мнения от суждения аудитора.

Анализ современных аудиторских стандартов [3 – 7], которые определяют порядок модификации аудиторского мнения, показал, что некоторые их положения можно трактовать неоднозначно, и, что самое главное, – их крайне сложно применять в аудиторской практике.

Отсутствие четкой взаимосвязи между аудиторскими стандартами [2, 7, 8] для разъяснений и уточнений признаков модификации мнения аудитора и понятия «суждение аудитора», на котором основана та или иная форма аудиторского заключения, увеличивает воздействие субъективных факторов на результаты проверки. Для устранения влияния этих факторов необходим детальный анализ некорректных положений федеральных стандартов, в частности, классификации причин модификации аудиторского заключения.

В настоящее время можно с уверенностью констатировать, что отдельные положения стандартов являются недоработанными, что

может привести к некорректным или спорным ситуациям при подготовке и представлении аудиторского заключения по результатам проверки. Проведенный анализ некорректных положений федеральных стандартов, которые препятствуют принятию аудитором объективных решений по поводу модификации заключения, приведен в табл. 1.

Не менее важным результатом работы аудитора является его суждение по поводу приме-

нимости допущения непрерывности деятельности аудируемого лица, в то время как формирование такого суждения требует применения специальных процедур в процессе проверки.

Допущение непрерывности деятельности организации является одним из важнейших принципов, применяемых при подготовке финансовой (бухгалтерской) отчетности, более того, невыполнение этого принципа влияет на

Т а б л и ц а 1

**Анализ отдельных положений ФСАД 1/2010, 2/2010 и 3/2010**

| № | Положение стандарта  | Ссылка на стандарт | Комментарий   |
|---|--|--------------------|---|
| 1 | Отсутствие возможности выполнения какой-либо аудиторской процедуры не является ограничением объема аудита, если аудитор может получить достаточные надлежащие аудиторские доказательства путем выполнения альтернативных аудиторских процедур. Если это невозможно, то аудитор должен выразить мнение с оговоркой или отказаться от выражения мнения   | п. 8 ФСАД 2/2010   | В стандарте не раскрывается суть понятия «альтернативные аудиторские процедуры» (возможные варианты «альтернативных аудиторских процедур» представлены в п. 5.14 «Пособия по применению федеральных стандартов аудиторской деятельности») [10]  |
| 2 | Аудитор должен выразить мнение с оговоркой в том случае, если:<br>– аудитор, получив достаточные надлежащие аудиторские доказательства, приходит к выводу, что влияние искажений, рассматриваемых по отдельности или в совокупности, является существенным, но не затронет большинство значимых элементов бухгалтерской (финансовой) отчетности (далее по тексту стандарта – всеобъемлющее влияние);<br>– у аудитора отсутствует возможность получения достаточных надлежащих аудиторских доказательств, на которых он мог бы основывать свое мнение, однако он приходит к выводу, что возможное влияние обнаруженных искажений может быть существенным для бухгалтерской отчетности, но не всеобъемлющим. Влияние искажения признается всеобъемлющим с точки зрения степени распространения его на бухгалтерскую отчетность или степени возможного распространения его на бухгалтерскую отчетность для тех случаев, когда аудитор не имеет возможности получить достаточные надлежащие аудиторские доказательства | п. 13 ФСАД 2/2010  | В отношении выявленных искажений вводится новый термин «всеобъемлющий», п. 14 ФСАД 2/2010 пытается раскрыть суть этого понятия, однако в стандарте отсутствует конкретное толкование. Возникает необходимость в определении термина «всеобъемлющий» либо непосредственно в стандарте, либо в Глоссарии терминов аудиторской деятельности, а также формализации показателей (количественных и качественных), позволяющих сделать вывод о всеобъемлющем характере выявленных искажений. В стандартах не установлена связь между существенностью и всеобъемлющим характером выявленных искажений, тем более что положения стандарта вступают в противоречие с этой категорией аудита |
| 3 | Понятие «всеобъемлющий» в отношении искажений является ключевым при формировании мнения в аудиторском заключении, если:<br>– аудитор приходит к выводу, что возможное влияние на бухгалтерскую от-   | п. 20 ФСАД 2/2010  | Нарушается принцип существенности, согласно которому, если ошибка превышает уровень существенности, отчетность не может быть признана достоверной   |

| № | Положение стандарта  | Ссылка на стандарт  | Комментарий   |
|---|--|---------------------|---|
|   | четность необнаруженных искажений может быть существенным, но не всеобъемлющим (мнение с оговоркой);<br>– аудитор приходит к выводу, что возможное влияние на бухгалтерскую отчетность необнаруженных искажений может быть одновременно настолько существенным и всеобъемлющим, что оговорка не позволит донести до пользователей полного понимания ситуации (отказ от выражения мнения)         |                     |   |
| 4 | Включение нераскрытой информации в специальную часть практически неосуществимо, если:<br>– информация, подлежащая раскрытию, не была заранее подготовлена руководством аудируемого лица или в силу иных причин не может быть оперативно получена аудитором;<br>– согласно суждению аудитора объем раскрываемой информации будет непропорциональным по отношению ко всему аудиторскому заключению | п. 31 ФСАД 2/2010   | Понятие «непропорциональным по отношению ко всему аудиторскому заключению» в контексте является некорректным. Совершенно непонятно, о каких пропорциях идет речь. Такая несогласованность в терминологии не позволяет аудитору сфокусировать внимание на существенных вопросах проверки. Возможно, такая несогласованность возникла вследствие буквального перевода текста МСА. Однако в любом случае, если вводится новый термин, тем более предполагающий количественную оценку, необходимо либо установить критерии такой оценки, либо определить качественные показатели. В противном случае все это приводит к необходимости соблюдения формальных требований стандартов в ущерб качеству аудиторской проверки |
| 5 | Привлекающая внимание часть должна указывать только на обстоятельства, отраженные в бухгалтерской отчетности   | п. 4 ФСАД 3/2010    | Не указано, по какой причине привлечение внимания возможно только в отношении обстоятельств, которые отражены в финансовой отчетности (например, аудируемое лицо к моменту окончания аудиторской проверки и подготовки аудиторского заключения имеет незаконченное судебное разбирательство на существенную для аудируемого лица сумму, при этом данная информация не раскрыта в пояснительной записке и руководство не соглашается ее раскрывать)  |
| 6 | В аудиторское заключение может быть включена часть «Прочие сведения», содержащая прочие факты, в т.ч. обстоятельства, которые могут способствовать пониманию пользователями бухгалтерской отчетности аудита и возникнуть в тех редких случаях, когда аудитор не имеет права отказаться от проведения аудита из-за ограничения руководством аудируемого лица объема аудита                        | п. 8, 9 ФСАД 3/2010 | Во избежание спорных ситуаций с аудируемым лицом представляется целесообразным указать те редкие случаи, когда аудитор не может отказаться от проведения аудита даже в случаях существенного ограничения объема аудита  |
| 7 | Содержащая прочие факты часть может быть включена в аудиторское заключение в случаях, когда аудиторское заключение предназначено ограниченному кругу адресатов   | п. 11 ФСАД 3/2010   | Аудиторское заключение – это документ, предназначенный для всех пользователей финансовой отчетности и, в отличие от отчета руководству аудируемого лица, не являющийся конфиденциальным документом. В нормативных документах, регулирующих аудиторскую деятельность, случаи предоставления аудиторского заключения ограниченному кругу лиц не указаны   |

форму и характер аудиторского заключения.

В соответствии с ПСАД № 11 [8] «Применимость допущения непрерывности деятельности аудируемого лица» и международным стандартом аудита (МСА) 570 аудитор обязан включить проверку соблюдения рассматриваемого допущения в программу аудита, ПСАД № 11 и МСА 570 предусматривают модификацию аудиторского заключения по основаниям, связанным с допущением непрерывности деятельности в случаях, указанных в табл. 2 [9].

Как видно (табл. 2), ПСАД № 11 и МСА 570 устанавливают требования в отношении действий аудитора по проверке применения допущения непрерывности деятельности при составлении финансовой (бухгалтерской) отчетности. Однако ФСАД 2/2010 не делает ссылки на вышеуказанные регулятивы, и о модификации аудиторского заключения в случае, если аудируемое лицо не может обеспечить

непрерывность своей деятельности, в указанном стандарте ничего не говорится.

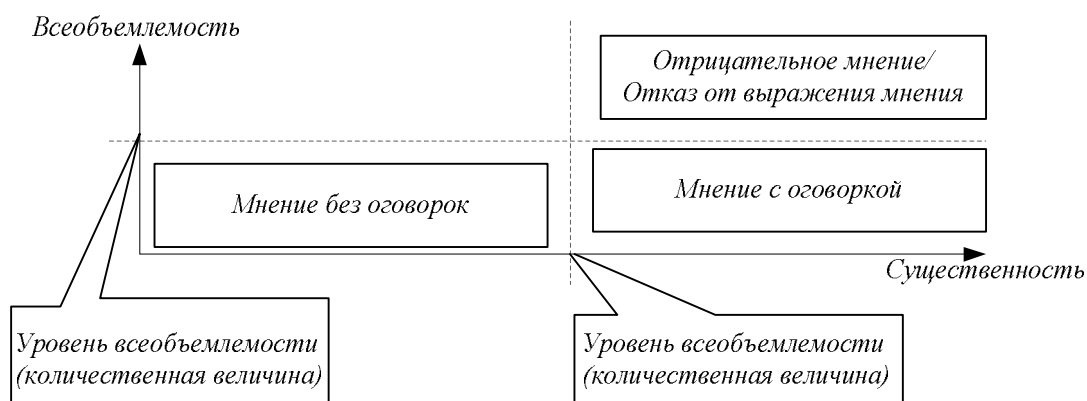
Таким образом, при подготовке аудиторского заключения аудитор должен пользоваться не только ФСАД 2/2010, но и другими стандартами, где описываются события, в соответствии с которыми аудитор должен модифицировать свое мнение. Так, при рассмотрении допущения непрерывности деятельности, мошенничества, событий после отчетной даты, требований соблюдения нормативно-правовых актов аудитор могут понадобиться определенные аудиторские доказательства, а это может повлиять на формирование и выражение мнения аудитора, а следовательно, и на его модификацию.

Другой важной категорией, которая влияет на подготовку аудиторского заключения, является существенность, на основании которой формируется мнение о достоверности отчетности.

Т а б л и ц а 2

### Виды модификации аудиторского заключения

| Описание ситуации   | Ссылка на стандарт              | Наличие или отсутствие модификации   | Вид модификации  |
|---|---------------------------------|--|--|
| Несогласие аудитора с использованным менеджментом допущением в отношении перспектив деятельности организации  | п. 28 ПСАД 11,<br>п. 35 МСА 570 | Модификация мнения   | Отрицательное аудиторское заключение   |
| Подготовка аудиторского заключения в порядке, отличном от допущения непрерывности деятельности  | п. 29 ПСАД 11,<br>п. 36 МСА 570 | Отсутствие модификации либо дополнительный параграф, привлекающий внимание | Обращение внимания на подготовку отчетности в порядке, отличном от допущения непрерывности деятельности    |
| Наличие значительной неопределенности, связанной с использованным менеджментом допущением непрерывности деятельности организации  | п. 26 ПСАД 11,<br>п. 33 МСА 570 | Дополнительный параграф при надлежащем раскрытии неопределенности          | Обращение внимания на значительную неопределенность  |
|   | п. 27 ПСАД 11,<br>п. 34 МСА 570 | Модификация мнения при ненадлежащем раскрытии неопределенности             | Оговорка на ненадлежащее раскрытие информации о существенной неопределенности или отрицательное заключение |
| Отказ менеджмента от оценки применимости допущения непрерывности деятельности, невозможность получения доказательств относительно применимости допущения непрерывности деятельности | п. 30 ПСАД 11,<br>п. 37 МСА 570 | Модификация мнения   | Оговорка на ограничение масштаба аудита или отказ от выражения мнения                                      |



Зависимость формы модифицированного мнения от уровня существенности согласно ФСАД 2/2010

По мнению М.А. Городилова [10] ФСАД 2/2010 предлагает принципиально новый подход к выбору формы аудиторского заключения, основанный на учете двух факторов: существенности и всеобъемлемости обстоятельств, послуживших основанием для выражения модифицированного мнения (см. рисунок).

Если в ходе проверки аудитор выявил нарушение, которое является существенным по своему влиянию на финансовую отчетность, но не всеобъемлющим, то он может выразить мнение с оговоркой. В то же время о существенном обстоятельстве, которое встречается однократно (не распространено), можно «упоминуть» в отдельной (специальной) части мнения с оговоркой, где описываются обстоятельства, явившиеся основанием для выражения модифицированного мнения (п. 26 ФСАД 2/2010). То же относится и к случаям, когда аудитор принимает решение об отказе от выражения мнения.

В данном контексте возникает две проблемы по поводу «всеобъемлемости».

Размытость понятия «всеобъемлемость» и отсутствие в стандартах аудита каких-либо ссылок на практическое применение этого понятия при формировании мнения аудитора.

Противоречие между существенностью и «всеобъемлемостью», поскольку современная теория аудита и его регулятивная основа рассматривают принцип существенности в качестве единственного ключевого основания формирования мнения о достоверности отчетности, совершенно не связывая это со «всеобъемлемостью» (основная цель аудита заключается в том, чтобы подтвердить, является ли отчетность во всех существенных отношениях достоверной либо недостоверной, без упоминания о «всеобъемлемости»).

Кроме того, возникает проблема оценки как количественной величины (порогового значения), так и качественного уровня всеобъемлемости. И если описание проблемы нахождения

уровня существенности и способы ее решения в научных публикациях достаточно глубоко исследованы, то вопрос оценки количественного и качественного уровня всеобъемлемости на теоретическом уровне не изучен и не представлен в нормативной базе. На практике фактор «всеобъемлемость» применяется редко, чаще всего аудиторы вообще не придают значения этому понятию в ходе проверки и считают, что вносить соответствующие изменения во внутренние стандарты аудиторских организаций и индивидуальных аудиторов нецелесообразно.

В то же время аудитор должен выразить мнение с оговоркой в том случае, если, получив надлежащие аудиторские доказательства, приходит к выводу, что влияние искажений, рассматриваемых по отдельности или в совокупности, является существенным, но не затронет большинство значимых элементов бухгалтерской (финансовой) отчетности (далее – всеобъемлющим). Исходя из этого положения стандарта не ясно, какие элементы являются значимыми и какое влияние искажения необходимо считать всеобъемлющим. Однако, обращаясь к теоретическим исследованиям, следует отметить, что в некоторых работах отечественных ученых присутствует мнение о том, что под всеобъемлющими следует понимать искажения отчетности, если они затрагивают более 50 % значимых статей отчетности» [9]. В то же время не конкретизировано, какие элементы отчетности являются значимыми.

Еще одной проблемой является некорректность перевода термина «pervasive» (МСА 705) с английского на русский как «всеобъемлющий». В своей работе М.А. Городилов предлагает другое определение «всеобъемлющего искажения отчетности» и считает, что более удачным для описания выявленных аудитором нарушений и более понятным отечественным специалистам было бы понятие «глубокое»,

«распространенное» или «неоднократное» искажение отчетности [10].

Следует отметить, что перевод текстов стандартов, а особенно специфических терминов на русский язык и в других случаях является не совсем корректным. Зачастую один и тот же термин по-разному переводится в рамках одного документа, а говорить о сопоставимости терминов в разных документах и вообще не приходится [11].

В результате вышеизложенного на практике аудиторы часто вообще игнорируют понятие «всеобъемлющего искажения отчетности» и, как следствие, соответствующие требования федеральных стандартов.

Стандарт ФСАД 2/2010 говорит о том, что влияние искажения признается с точки зрения распространения или степени возможного распространения его на бухгалтерскую отчетность. Исходя из этого, можно применять во внутрифирменных стандартах аудиторских компаний следующую трактовку этого термина: «Всеобъемлющее влияние искажения бухгалтерской отчетности – это влияние, которое затрагивает более 50 % значимых статей отчетности».

Предлагается вариант количественного расчета порогового значения величины «всеобъемлющего влияния», который можно использовать в практической деятельности аудиторских компаний. Эта методика расчета предполагает использование базовых показателей, которые используются для расчета уровня существенности.

Поскольку выбор базовых показателей для расчета уровня существенности организация определяет самостоятельно, поэтому и уровень «всеобъемлющего влияния» можно рассчитать, исходя из данных этих же показателей. В

качестве основного базового показателя для определения пороговой величины «всеобъемлющего влияния» можно взять валюту баланса, которая является синтетическим показателем финансовой отчетности. Предлагается следующий алгоритм расчета: абсолютная величина, которая превышает 50 % от валюты баланса, является всеобъемлющей и применяется при формировании мнения аудитора. Далее идет суммирование существенных ошибок, выявленных в ходе аудита, и полученная величина сравнивается с предельной величиной «всеобъемлющей ошибки». Если сумма существенных ошибок превышает уровень «всеобъемлющей ошибки», то отчетность не может быть признана достоверной; если она ниже уровня «всеобъемлющей ошибки», то аудитор готовит мнение с оговоркой.

Пример расчета уровня «всеобъемлющей ошибки» и принятия решения по поводу модификации мнения приведен в табл. 3.

В этом примере сумма валюты баланса составляет 4000000 руб., тогда величина «всеобъемлющей ошибки» ( $4000000 \cdot 50\%$ ):  $100\% = 2000000$  руб.

Представленный расчет можно использовать в качестве рабочего примера аудиторской кампании, который поможет принять правильное решение при формировании аудиторского мнения, а пользователи отчетности поймут, почему аудитор принимает то или иное решение по поводу достоверности отчетности, и в тоже время увидят, насколько существенны ошибки, выявленные аудитором. В связи с введением в аудиторские стандарты понятия «всеобъемлющей ошибки» предлагается изменить редакцию констатирующей части аудиторского заключения, которая может выглядеть следующим образом: «По нашему

Т а б л и ц а 3

**Пример расчета существенной и всеобъемлющей ошибки**

| Значимый показатель           | Уровень существенности, руб. | Величина обнаруженной ошибки, руб. | Признание существенности и всеобъемлемости |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Выручка от продаж             | 100000                       | 120000                             | Ошибка существенна                         |
| Себестоимость продаж          | 95000                        | 86000                              | Ошибка не существенна                      |
| Прибыль от продаж             | 25000                        | 34000                              | Ошибка существенна                         |
| Валюта баланса                | 80000                        | 500000                             | Ошибка существенна                         |
| Сумма существенных ошибок     |                              | 654000                             |  |
| Величина всеобъемлющей ошибки | 2000000                      |                                    |  |
| Признание значимости ошибок   |                              |                                    | Ошибки существенные, но не всеобъемлющие   |
| Мнение аудитора               |                              |                                    | Мнение с оговоркой                         |

мнению, вследствие существенности обстоятельств, указанных в части, содержащей основание для выражения отрицательного мнения, финансовая отчетность не отражает достоверно во всех существенных и всеобъемлющих отношениях финансовое положение организации «УУУ» и ее дочерних хозяйственных обществ по состоянию на 31 декабря 20XX года, результаты их финансово-хозяйственной деятельности и движение денежных средств за 20XX год в соответствии с установленными правилами составления финансовой отчетности».

Исходя из вышеизложенного, предлагается внести изменения в федеральные стандарты аудиторской деятельности (табл. 4).

**Выводы.** Предлагаемые изменения помогут аудиторам в их практической деятельности и позволят устранить некоторые противоречия в нормативной базе, связанные с формированием мнения о достоверности финансовой отчетности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов П.П. Причины модификации аудиторского заключения // Аудитор. 2004. № 1. С. 25 – 28.
2. Федеральный стандарт аудиторской деятельности (ФСАД 2/2010) «Модифицированное мнение в аудиторском заключении»: утверждено Приказом Минфина России от 20 мая 2010 г. № 46. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://base.consultant.ru>. (Дата обращения: 09.09.2014).
3. Федеральное правило (стандарт) аудиторской деятельности (ФПСАД) № 8 «Оценка аудиторских рисков и внутренний контроль, осуществляемый аудируемым лицом»: утверждено Постановлением Правительства РФ № 696 от 23.09.2002 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://base.consultant.ru>. (Дата обращения: 09.09.2014).

Т а б л и ц а 4

### Изменения, предлагаемые для внесения в ФСАД 1/2010, 2/2010, 3/2010

| Ссылка на стандарт                   | Предлагаемые изменения  |
|--------------------------------------|---|
| п. 8 ФСАД 2/2010                     | Раскрыть суть понятия «альтернативные процедуры»  |
| п. 31 ФСАД 2/2010                    | Установить критерии количественной оценки, определить качественные показатели «непропорциональным по отношению ко всему аудиторскому заключению»  |
| п. 4 ФСАД 3/2010                     | Указать, по какой причине привлечение внимания возможно только в отношении обстоятельств, которые отражены в финансовой отчетности  |
| п. 8 и 9 ФСАД 3/2010                 | Указать в стандарте те редкие случаи, когда аудитор не может отказаться от проведения аудита даже в случаях существенного ограничения объема аудита   |
| п. 11 ФСАД 3/2010                    | Указать ограниченный круг адресатов   |
| п. 14 ФСАД 2/2010                    | Ввести определение термина «всеобъемлющее искажение», установить связь между существенностью и всеобъемлющим характером выявленных искажений, установить количественные критерии этих категорий   |
| ФСАД 2/2010                          | Сделать ссылку о модификации аудиторского заключения в случае, если аудируемое лицо не может обеспечить непрерывность своей деятельности (ПСАД № 11 «Применимость допущения непрерывности деятельности»)  |
| п. 4 ФСАД 2/2010                     | Раскрыть связь существенных искажений финансовой отчетности с уровнем существенности (с количественной точки зрения)  |
| п. 17 ФСАД 1/2010                    | Заменить подпункт б на два других пункта, тогда это положение будет более понятно, например: «Аудитор должен выразить модифицированное мнение в аудиторском заключении, если: у аудитора отсутствует возможность для сбора необходимого количества доказательств для выражения объективного мнения; аудитор хочет привлечь внимание пользователей отчетности к какой-либо ситуации» |
| ФСАД 1/2010                          | Включить принципы подготовки аудиторского заключения  |
| ФСАД 1/2010                          | Предусмотреть подпись аттестованных аудиторов, участвующих в проверке   |
| ФСАД 1/2010, ФСАД 2/2010, ФПСАД № 11 | Обеспечить связь между ФПСАД № 11 и ФСАД 1/2010, ФСАД 2/2010  |
| ФСАД 2/2010                          | Установить количественный показатель «всеобъемлющей ошибки»   |
| ФСАД 2/2010                          | Указать перечень значимых статей отчетности   |

4. МСА 200 «Цель и основные принципы аудита финансовой отчетности» [Электронный ресурс] // Режим доступ: [http://online/zakonkz/Document/ doz\\_id](http://online/zakonkz/Document/doz_id). (Дата обращения: 09.09.2014).
5. Сборник Международных стандартов аудита и контроля качества. 2009 / Пер. с англ., г. Алматы. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://audit.kz/MSA2009.pdf>
6. Правило (стандарт) № 10 «События после отчетной даты». Министерство финансов РФ. Постановление правительства № 696 от 23.09.2006 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.minfin.ru>. (Дата обращения: 09.09.2014).
7. ФСАД 1/2010 «Аудиторское заключение о бухгалтерской (финансовой) отчетности и формирование мнения о ее достоверности». – М.: ЭКСМО, 2010. – 3 с.
8. Правило (стандарт) № 11 «Применимость допущения непрерывности деятельности аудируемого лица» Министерство финансов РФ. Постановление правительства № 696 от 23.09.2006 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.minfin.ru/ru/accounting/audit/standarts/standarts\\_audit/K](http://www.minfin.ru/ru/accounting/audit/standarts/standarts_audit/K). (Дата обращения: 09.09.2014).
9. М а с с а р ы г и н а В.Ф. Допущение непрерывности деятельности организации в современных условиях // Аудиторские ведомости. 2009. № 10. С. 35 – 38.
10. Г о р о д и л о в М.А. Аудиторское заключение о финансовой бухгалтерской отчетности по новым стандартам // Налоговая политика и практика. 2011. № 1. С. 26 – 29.
11. П а н т е л е е в а И.А. Новые федеральные стандарты аудиторской деятельности: основные изменения в работе аудитора // Аудит и налогообложение. 2011. № 10. С. 20 – 25.

© 2014 г. В.П. Козлов, И.Ю. Жигадло  
Поступила 16 сентября 2014 г.



*Т.А. Михайличенко, В.В. Стерлигов*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ МЕТОДИЧЕСКОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ НА КАФЕДРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ СИБГИУ

Кафедра теплоэнергетики и экологии отмечает свой 80-летний юбилей в сложный период реформ и перемен в системе высшего профессионального образования (ВПО) России. Технические вузы страны перешли на новые образовательные стандарты (ФГОСы), которые имеют ряд существенных отличий от предыдущих стандартов; эти изменения связаны со сменой концепции образования и присоединением России к Болонскому процессу. В основе ФГОСов лежит компетентностный подход, регламентирующий результат образования как сформированность набора тех или иных компетенций. Новые ФГОСы дают вузам возможность самостоятельно реализовывать различные образовательные программы, соответствующие не только требованиям стандартов, но и актуальным требованиям конкретных регионов и даже работодателей, что вызывает необходимость индивидуальной работы со студентами. В этом смысле новые стандарты являются «студентоцентрированными», поскольку дают студентам право самостоятельно выбрать свою образовательную траекторию. Хотя следует отметить, что это гарантированное на федеральном уровне право в нашей системе ВПО пока на практике реализовать трудно.

Много вопросов у преподавателей – непосредственных участников образовательного процесса – связано и с такими инновационными моментами новых ФГОСов, как, например, система зачетных единиц, требование формирования и ежегодного обновления вузом фонда оценочных средств (ФОС) и др. [1].

Важным с точки зрения реализации новых программ является то, что все эти изменения предусматривают коренную перестройку педагогической концепции. Инновационно ориентированный специалист может быть подготовлен преподавателем нового формата, который организует процесс обучения как совместную деятельность преподавателя и студента. Образ преподавателя, носителя и передатчика информации, должен уйти в прошлое и уступить место образу преподавателя, реализующего

«объект-объектные», а не «объект-субъектные» отношения обучающего и обучаемого.

Авторы настоящей статьи, общий стаж работы которых на кафедре теплоэнергетики и экологии (ТЭ и Э) составляет более 80 лет, могут ответственно утверждать, что кафедра эта всегда отличалась инновационной направленностью в методическом обеспечении учебного процесса. Многие образовательные технологии, известные в настоящее время как инновационные, использовались преподавателями кафедры уже много лет назад. Сейчас это весьма распространенные в педагогической практике высшей школы технологии активного обучения – «коллаборативный» метод, метод проектов, ситуационный анализ и др. приемы.

Методическое обеспечение различных форм самостоятельной работы, без которой немисливо современное образование, должно учитывать то обстоятельство, что в средней школе, а затем и в высшей до сих пор основное внимание уделяется решению типовых, стандартных задач, в результате у студентов формируется стереотип шаблонных действий и решений.

При разработке конкретных мероприятий по самостоятельной работе студентов-теплотехников вопрос об обоснованности применения технологий активного обучения уже давно не стоит из-за огромных потоков информации, которые должен осмыслить и уметь творчески применять инновационно и социально ориентированный специалист.

В разные годы на кафедре были опробованы и хорошо себя зарекомендовали следующие педагогические технологии и приемы.

1. *Студенческая научно-исследовательская работа.* Это, пожалуй, единственный регламентированный учебным планом элемент самостоятельной работы студентов в вузе, для которого документально определено и количество часов, и время, и место в графике учебного процесса. Значение и возможности этого вида самостоятельной работы трудно переоце-

нить. На кафедре сложилась традиция предвзвешенно знакомить студентов с тематикой предстоящих исследований и предоставлять возможность выбора тем. Эту работу студенты выполняют на протяжении двух семестров и завершают докладом на кафедральной студенческой конференции с последующей публикацией тезисов докладов в сборнике трудов Всесоюзной студенческой конференции, ежегодно проводимой в СибГИУ. Эту работу можно рассматривать как часть исследовательской дипломной работы. Кафедра ежегодно участвует во Всероссийских студенческих научных конференциях, получая признание в виде грамот, дипломов и грантов.

2. *Ситуационный анализ*, более известный как «деловая игра». Это, бесспорно, весьма продуктивный и популярный в университете прием самостоятельной работы студентов, требующий значительной подготовки как со стороны студентов, так и со стороны преподавателя. Очень важно, что данный метод может быть реализован в рамках традиционных практических занятий, трансформированных с учетом конкретной специальности студентов и проводимых в виде игры с элементами ситуационных задач разной степени сложности, которая определяется преподавателем. При трансформации обычное задание заменяется некой вводной, формулирующей практическую ситуацию, в которой обучаемый может быть как исполнителем указаний (вариант – подчиненный), так и генератором указаний на деятельность (вариант – начальник). При этом от исполнителя требуется подробно описать методику выполнения некоторых технических действий по заданию генератора, а от генератора требуется сформулировать комплексное задание для решения конкретной практической ситуации, как правило, выходящей за рамки стандартного протекания технологического процесса. Ситуационные задачи могут решаться как парами «студент – студент», так и парами «студент – преподаватель», причем в последнем случае наибольшая эффективность обучения наблюдается, если преподаватель играет роль исполнителя низкой квалификации, требующего от начальника достаточно подробных указаний. В любом случае ситуация контролируется преподавателем, а ее динамика может меняться по ходу действия путем внесения новых элементов.

В качестве примера можно привести ряд ситуационных задач, возникающих в практике инженера-технолога, для решения которых необходимо осознанное применение базовых положений курса «Теплотехника», а именно,

знание теплотехнических основ процесса нагрева металла, умение выбрать и обосновать рациональный режим и способ нагрева, умение правильно выбрать тип печи, наиболее полно отвечающий данному виду продукции и термической обработки и др. В качестве руководства к действию студентам предлагается стандартная блок-схема разрешения возникших ситуаций, т.е. поиска ответа: возможные причины явления – «дефекта» (например, повышенного окисления при нагреве, коробления длинномерных изделий при термической обработке и др.) – возможность реализации этих причин в конкретной анализируемой ситуации – способы исследования, необходимые для подтверждения или опровержения наличия данных причин – в случае подтверждения наличия «дефектных» факторов указания возможных способов их устранения. При этом в процессе обсуждения участвуют не только непосредственные участники ситуации, но и другие студенты – в качестве экспертов. Игра проходит, как правило, очень оживленно, хотя иногда студентам не хватает культуры дискуссии. Конечно, подобные занятия требуют предварительной подготовки и со стороны обучающего (разработка ситуационных заданий; подбор исходного материала по каждому заданию для проработки их студентами; распределение ролей), и со стороны обучаемых.

3. *Самостоятельная работа во время прохождения производственной практики*. Выдача индивидуальных заданий студентам-практикантам основной целью ставит приобретение профессиональных навыков. Задание выдается на группу из двух-трех студентов или персонально и предусматривает сравнительный анализ работы тепловых агрегатов. Поскольку при получении задания студенты не получают никаких методических рекомендаций, они должны самостоятельно выбрать параметры анализа и сравнения тепловых агрегатов и найти необходимые данные в цехе. Для решения поставленной задачи студенты вынуждены работать с литературой (учебниками, монографиями, статьями в периодической печати, заводскими научно-техническими отчетами), беседовать с обслуживающим персоналом печей, работниками теплотехнической лаборатории. Индивидуализация задания и отсутствие типовых методов его выполнения заставляют студентов более ответственно относиться к прохождению практики, что дает возможность более глубоко ознакомиться с работой тепловых агрегатов, учит инженерному мышлению, прививает навыки коллективного труда и общения с людьми.

4. *Традиционные виды занятий со студентами, дополненные модулем, вносящим в работу элементы исследования.* Не всегда для повышения мотивационного фактора в процессе обучения необходимо вводить новые лабораторные или практические занятия. Иногда достаточно по-иному сформулировать классическое задание, транслируя его на конкретную специальность, требуемую сложность задания, зависящую от того, какого уровня усвоения знаний хотелось бы достичь на занятиях, и др. условия. Например, на практическом занятии по решению задач стационарной теплопроводности на примере плоской стенки в традиционном варианте группы студентов, работающие в монологической системе «малая группа» по индивидуальным заданиям, рассчитывают потери тепла через кладку печи. В новом, исследовательском варианте задание выдается тем же группам, но при этом предусмотрены вариации факторов, оказывающих влияние на величину потерь тепла через кладку (температура печи, различные комбинации толщин слоев рабочего слоя огнеупора и изоляции и др.). После расчета в каждой группе проводится обобщение полученных результатов и их обсуждение, анализируется соответствие полученных данных теории.

В последние годы наиболее яркое воплощение этот метод нашел при проведении лабораторных работ по курсу «Механика жидкости и газа» и др. подобных дисциплин. Эта новаторская технология отличается использованием гибких перенастраиваемых обучающих систем, индивидуализацией заданий, вариативным объемом проверяемых теоретических положений, кооперативным выполнением работ и публичным представлением их при защите [2].

Этот же принцип легко реализуем и при выполнении курсовых работ и проектов; например, при выполнении курсовой работы по технической термодинамике студенты, помимо основного расчета паросиловой установки, выявляют факторы, повышающие эффективность работы установки. Другой пример: коллективное выполнение курсового проекта по термическим печам: в этом случае группе сту-

дентов из двух-трех человек выдается одинаковое задание (марка стали, операция термической обработки и др.), но конструктивное решение у каждого свое. На защите курсового проекта каждый разработчик отстаивает свой вариант проекта и обосновывает его преимущества.

5. *Автоматизированное рабочее место* – эта методика успешно применяется в течение долгих лет на кафедре при изучении курса «Теплотехнологии и конструкции нагревательных печей». По сути – это интерактивная программа по исследованию влияния различных параметров на технико-экономические показатели работы нагревательных печей.

Кроме того, на кафедре практикуется приглашение в качестве лекторов ведущих специалистов предприятий города, экскурсии на производство и организации (например, в аналитический Центр по выбросам в окружающую среду, на мусоросортировочную станцию, в отделы Городского комитета по охране окружающей среды и пр.).

И это далеко не полный перечень активных и интерактивных методов и технологий в методическом обеспечении учебного процесса кафедры, свидетельствующий о том, что кафедра в течение многих лет (несмотря на изменение ее профессиональной нацеленности, что отражалось в названии (кафедра печей, теплотехники, теплофизики и промэкологии, теплоэнергетики и экологии)), активно использует и развивает различные интерактивные образовательные технологии, возведенные сейчас в ранг официальных технологий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайличенко Т.А., Громова О.Б. // Высшее образование в России. 2011. № 12. С. 89 – 94.
2. Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А. // Высшее образование сегодня. 2013. № 3. С. 27 – 31.

© 2014 г. Т.А. Михайличенко,  
В.В. Стерлигов

Поступила 12 сентября 2014 г.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 378.124

Кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ – 80 лет / Коротков С.Г., Волюнкина Е.П., Темлянцев М.В., Галевский Г.В. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 3.

Освещена истории развития кафедры теплоэнергетики и экологии ГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». В хронологической последовательности рассмотрены основные вехи в истории становления и развития кафедры, сведения о научной и учебно-методической работе, достижения ее сотрудников и выпускников. Библ. 7.

**Ключевые слова:** кафедра, теплотехника, теплоэнергетика, экология, металлургия, студент, научные исследования, учебный процесс, утилизация, диссертация.

The department of heat-power engineering and ecology SibGIU – 80 years / Korotkov S.G., Volynkina E.P., Temlyantsev M.V., Galevsky G.V. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 3.

The report focuses on the history of the department of heat-power engineering and ecology of State Educational Institution of Higher Professional Education “Siberian State Industrial University”. In chronological order the basic milestones in the history of establishment and development, information about the scientific and educational work, the fulfillment of its employees and graduates have been considered. Ref. 7.

**Keywords:** department, heat engineering, heat and power engineering, ecology, metallurgy, student, research, educational process, recycle, thesis.

УДК 669.187:621.771

Исследование и оптимизация технологии производства рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката и технико-экономических показателей его производства / Козырев Н.А., Уманский А.А., Бойков Д.В. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 11.

В условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования влияния технологических параметров производства рельсовой стали на содержание кислорода в расплаве. Установлено, что увеличение продолжительности продувки стали инертным газом при обработке на агрегате ковш-печь с 63 до 122 мин способствует уменьшению количества оксидных неметаллических включений, при этом остальные контролируемые параметры качества готовых рельсов не ухудшаются. Проведен анализ технико-экономической эффективности использования новой технологии раскисления рельсовой стали с использованием силикомарганца марки FeMnSi30HP взамен MnC18. По результатам проведенного промышленного эксперимента подтверждено повышение степени сквозного усвоения углерода и кремния на 4 и 13 % соответственно. Оценка механических свойств и макроструктуры рельсов, полученных при использовании опытной технологии, показала, что они находятся на уровне плавок текущего производства. По полученным расчетным данным экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP составила 14 – 33 руб./т в зависимости от категории рельсов. Ил. 2. Табл. 5. Библ. 7.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, раскисление, рельсовая сталь, продувка инертным газом.

The study and optimization of production technology of rail electric steel with the view of improving the quality of railway products, as well as technical and economic indicators of the production / Kozyrev N.A., Umansky A.A., Boikov D.V. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 11.

In terms of the electric plant of “EVRAZ ZSMK” the studies of the influence of the technological parameters of the rail steel production at the oxygen content in the melt have been carried out. It has been found that increasing the duration by blowing inert gas into steel when processing on the unit “ladle-furnace” within 63-122 min, it helps to reduce the number of oxide non-metallic inclusions; herewith the other controlled quality parameters of finished rails do not become worse. The analysis of technical and economic viability of using new technology of rail steel deoxidation with silicomanganese of FeMnSi30HP brand instead of MnS18 brand has been conducted. According to the results of the industrial experiment it has been confirmed that there is the increase of through carbon and silicon absorption at 4 % and 13 % respectively. The evaluation of mechanical properties and macrostructure of rails, produced by the use of experimental technologies, has shown that they are at a level of satisfactory ongoing production.

According to the design data the economic efficiency of the utilization of new ferroalloy of FeMnSi30HP brand is 14-33 rub./t, depending on the category of the rails. Fig. 2. Table 5. Ref. 7.

**Keywords:** non-metallic inclusions, deoxidation, rail steel, inert-gas flushing.

#### УДК 621.785

Моделирование воздухоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов / Волков К.В., Полевой Е.В., Темлянец М.В., Атконова О.П., Юнусов А.М., Сюсюкин А.Ю. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 17.

Освещены вопросы, связанные с использованием новых технологий упрочнения железнодорожных рельсов, в частности, дифференцированной термической обработки длинномерных рельсов. Проведена серия экспериментов по термической обработке рельсовых проб сжатым воздухом с отдельного печного нагрева, целью которых является определение перспективных режимов термической обработки и химических составов рельсовой стали в рамках подготовки к освоению технологии промышленного производства дифференцированно термически упрочненных рельсов. Ил. 3. Табл. 2. Библ. 6.

**Ключевые слова:** железнодорожные рельсы, дифференцированная термическая обработка, режим, химический состав стали.

Simulation of an air-hardening from furnace heating of railway lines / Volkov K.V., Polevoy E.V., Temlyantsev M.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M., Syusyukin A.Y. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 17.

The questions related to the use of new technologies of hardening of rails, in particular, differential heat treatment of long rails has been covered. A series of experiments on the heat-treated rail samples with compressed air from the furnace heat-sensible has been conducted. The purpose of the experiments is to determine the perspective heat treatment modes and chemical composition of the rail steel within the framework of preparation for the development of industrial technology of industrial production of differentially thermally hardened rails. Fig. 3. Table 2. Ref. 6.

**Keywords:** rails, differentiated heat treatment, mode, chemical composition of steel.

#### УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

Исследование с помощью компьютерного моделирования контактного упрочнения алюминиевой прослойки при растяжении магниево-алюминиевых композитов / Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Голик А.А., Пonomарева И.А., Арисова В.Н. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 23.

Проведена верификация моделирования методом конечных элементов с помощью пакета SIMULIA/Abaqus поведения магниево-алюминиевого композита МА2-1-АД1-АМг6 при осевом растяжении. Определена моделированием прочность композита МА2-1-АД1-АМг6 при варьировании температуры испытаний и толщины прослойки АД1. Найдена относительная толщина прослойки, соответствующая переносу разрушения на магниевый сплав. Ил. 5. Табл. 2. Библ. 11.

**Ключевые слова:** магний, алюминий, алюминиевый сплав, мягкая прослойка, деформация, разрушение, моделирование, метод конечных элементов.

Research by means of computer modeling of contact hardening of the aluminum layer at stretching of magnesium-aluminum composites / Gurevich L.M., Trykov Yu.P., Golik A.A., Ponomareva I.A., Arisova V.N. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 23.

The verification of the simulation with finite elements using the package SIMULIA / Abaqus the behavior of magnesium-aluminum composite AZ31B-AD1-AlMg6 under axial tension is carried out. Modeling strength of magnesium-aluminum-aluminum composite AZ31B-AD1-AlMg6 at varying test temperature and thickness of the interlayer AD1 is defined. Relative thickness of the interlayer, the corresponding transfer of destruction on the magnesium alloy is determined. Fig. 5. Table 2. Ref. 11.

**Keywords:** magnesium, aluminum, aluminum alloy, soft layer, deformation, fracture, simulate, finite elements method.

#### УДК 669.162.12:622

Принципы структурообразования за счет расширения функциональных возможностей технологии получения окатышей / Павловец В.М. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 28.

Показаны принципы структурообразования в процессе получения окатышей за счет расширения функциональных возможностей технологии их получения. В их основу положены методы внешнего теплосилового воздействия на влажную железорудную шихту в рабочем пространстве окомкователя. Установлено, что формировать характер и величину пористости окатышей можно изменением массового содержания зародышей с регламентированной поровой структурой. Ил. 5. Табл. 1. Библ. 12.

**Ключевые слова:** железорудные окатыши, влажная шихта, зародыши, окомкователь, структурообразование, тепловое воздействие, расширение функциональных возможностей.

Principles of structure due to the expansion of functional capabilities of the technology to produce pellets / Pavlovets V.M. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 28.

The principles of pattern formation during the production of pellets by expanding the functionality of the technology for their production have been shown. They are based on external methods of heat-exposure to wet iron ore charge in the workspace of a pelletizer. It has been established that the character and the shape of the pellets porosity can be changed by the mass content of nuclei with the controlled pore structure. Fig. 5. Table. 1. Ref. 12.

**Keywords:** iron ore pellets, wet charge, nuclei, pelletizer, structure formation, thermal effects, functional enhancement.

#### УДК 669. 015.7

Очистка дымовых газов от оксидов серы / Соловьев А.К., Михеев В.О., Пуликов П.С. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 33.

Рассмотрены методы снижения выбросов оксидов серы энергетическими установками, сжигающими топливо. Представлена принципиальная технологическая схема сероочистной установки, работающей по мокрому известняковому методу. Ил. 1. Библ. 2.

**Ключевые слова:** сероулавливание в энергетике, абсорбционная очистка дымовых газов, методы сероулавливания.

Cleaning of flue gases from sulfur oxides / Soloviev A.K., Mikheev V.O., Polikov P.S. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 33.

The methods of reducing emissions of sulfur oxides by energy plants burning fuel have been considered. The schematic flow diagram of desulphurization plant running on wet lime method has been represented. Fig. 1. Ref. 2.

**Keywords:** sulphurocatching in energy, absorption flue gas cleaning, methods of sulphurocatching.

#### УДК 621.791

Порошковая проволока для плазменной наплавки прокатных валков в среде азота / Вострецов Г.Н., Бич Т.А., Бащенко Л.П. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 36.

Сформулированы основные требования, предъявляемые к термическому циклу наплавки, с целью изучения возможности получения качественного наплавленного металла с высокими служебными свойствами. Ил. 6. Табл. 1. Библ. 5.

**Ключевые слова:** высоколегированные теплостойкие стали, наплавленный металл, плазменная наплавка.

Cored wire for PTA rolls in a nitrogen atmosphere / Vostretsov G.N., Bich T.A., Baschenko L.P. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 36.

The main requirements presented to the thermal cycle building-up metal with high quality and auxiliary properties have been formulated. Fig. 6. Table 1. Ref. 5.

**Keywords:** high-alloy heat-resistant steels, built-up metal, plasma welding.

#### УДК 621.783.231.1

Потери металла с окалиной после реконструкции печи с шагающими балками / Сюсюкин А.Ю. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 41.

Определены потери металла с окалиной после реконструкции печи при нагреве заготовки размером 300×365×7900 мм из стали марки Э76ХФ для производства 100-м рельсов. Реконструкция печи позволила снизить потери металла с окалиной, которые в настоящий момент составляют в среднем 1,0 – 1,2 % потерь чистого железа. До реконструкции печи потери металла с окалиной доходили до 1,5 – 1,6 %. При времени нагрева около 4 ч величина окалинообразования не превышает 0,7 %. Ил. 3. Табл. 2. Библ. 5.

**Ключевые слова:** потери металла с окалиной, нагрев, печь, реконструкция.

Metal losses with scale after the reconstruction of walking beam furnace / Syusyukin A.Y. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 41.

Metal losses with scale after the reconstruction of the furnace by heating the workpiece of 300×365×7900 mm in size from the steel of E76HF brand for the production of 100 m rails have been identified. The reconstruction of the furnace has made it possible to reduce the losses of metal with the scale, which currently account for an average of 1,0 – 1,2 % losses of pure iron. Before the furnace reconstruction the metal losses with scale reached 1,5 – 1,6 %. When the heating time is about 4 hours, the value of scale formation does not exceed 0,7 %. Fig. 3. Table 2. Ref. 5.

**Keywords:** losses of metal with scale, heating, furnace, reconstruction.

#### УДК 536.2.083:519.876.5

Условия стагнации воздушного слоя для теплоизоляции / Стерлигов В.В., Плюснина Е.А. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 44.

Теоретически обоснована возможность создания нового типа теплоизоляции. Выполнено численное моделирование и экспериментальная проверка способа реализации предлагаемого вида теплоизоляции. Ил. 3. Библ. 5.

**Ключевые слова:** теплоизоляция, стагнация, воздух.

Conditions of air-stagnation for thermal insulation purposes / Sterligov V.V., Plyusnina E.A. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 44.

The work is devoted to the problem of the thermal insulation stipulated with stagnation of air, including theoretical foundation, as well as the experimental approbation of the stated hypothesis. Fig. 3. Ref. 5.

**Keywords:** thermal insulation, stagnation, air.

#### УДК 661.665

Применение нанокарбонитрида хрома в композиционных гальванических покрытиях на основе никеля / Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 48.

Проведено исследование физико-механических свойств композиционного материала никель – нанокарбонитрид хрома, получаемого совместным электроосаждением. Установлена технологическая целесообразность его применения в качестве упрочняющей фазы на основе сравнения достигаемых свойств композиционных покрытий с микропорошками. Применение карбонитрида хрома способствует снижению концентрации электролита – суспензии, повышению катодной плотности тока и микротвердости покрытий. Ил. 3. Табл. 2. Библ. 4.

**Ключевые слова:** нанокарбонитрид хрома, композиционные гальванические покрытия, свойства покрытий, электроосаждение.

Application of chromium nanocarbonitride in galvanic composition coatings on the basis of nickel / Shiryaeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskii G.V., Rudneva V.V. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 48.

A study of physical and mechanical properties of the composite material nickel- chromium nanocarbonitride received by joint electrolytic deposition has been carried out. Technological feasibility for its use as a strengthening phase achieved by comparing the properties of composite coatings with micropowders has been established. Application of the chromium carbonitride contributes to the concentration reduction of the electrolyte - suspension, as well as the increase of cathode current density and microhardness of the coatings. Fig. 3. Table 2. Ref. 4.

**Keywords:** chromium nanocarbonitride, galvanic composition coatings, coating properties, electrolytic deposition.

## УДК 662.732

Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна: производство, свойства, применение / Аникин А.Е., Галевский Г.В. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 52.

Проведен анализ технологий производства полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений, сравнительный анализ свойств этих полукоксов, а также областей их применения. В настоящее время одним из самых перспективных способов получения буроугольного полукокса считается технология «ТЕРМОКОКС». Буроугольный полукокс Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна обладает преимуществами по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений: пониженная зольность, повышенное содержание в золе оксидов кальция и магния, повышенное содержание фиксированного углерода, пористость, удельная поверхность и реакционная способность. Проведенный анализ состояния производства, свойств и областей применения полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений позволяет сделать вывод, что наиболее перспективно производство и потребление буроугольного полукокса Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна ввиду его улучшенных свойств по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений, технологической возможности его крупнотоннажного производства, относительно низкой стоимости, а также значительной потребности в нем многих областей промышленности. Ил. 3. Табл. 1. Библ. 34.

**Ключевые слова:** буроугольный полукокс, углеродистый восстановитель, неспекающиеся угли, металлургические процессы, восстановление, технологии производства полукокса, свойства полукокса, стоимость полукокса, ТЕРМОКОКС.

Brown-coal semi-coke of Berezovsky deposit of Kansk-Achinsk basin: production, properties, application / Anikin A.E., Galevsky G.V. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 52.

The analysis of production technologies of semi-cokes from domestic low- metamorphized coal of various fields, the comparative analysis of the semi-cokes properties, as well as the areas of their application is carried out. Currently, one of the most perspective ways of receiving brown-coal semi-coke is considered to be the “TERMOCOKE” technology. Brown-coal semi-coke of Berezovsky deposit of Kansk-Achinsk basin has the advantages in comparison with semi-cokes from domestic low- metamorphized coal of other fields. They are low ash-content, high content in ashes of calcium oxide and the magnesium, high content of fixed carbon, porosity, specific surface and reactionary ability. The carried-out analysis of the production conditions, the properties and the application area of semi-cokes from domestic low-metamorphized coal of various fields allows drawing a conclusion that the production and consumption of brown-coal semi-coke of Berezovsky deposit of Kansk-Achinsk basin is the most perspective one, in view of its improved properties in comparison with semi-cokes from domestic low-metamorphized coal of other fields, a technological capability of its large-capacity production, regarding its low cost, and also considerable need for it in many areas of industry. Fig. 3. Table 1. Ref. 34.

**Keywords:** brown-coal semi-coke, carbonaceous reducer, free-burning coal, metallurgical processes, restoration, production technology of semi-coke, semi-coke properties, cost of semi-coke, TERMOCOKE.



#### УДК 504.540.62.4

Опыт использования осадков сточных вод для проведения биологической рекультивации шламохранилища ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» / Водолеев А.С., Черданцева Е.С., Куренский И.А. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 60.

Дана эколого-технологическая характеристика промышленных отходов ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и оценка возможности использования в рекультивационных целях осадков сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений. По результатам анализа химического состава органоминерального субстрата (шлак + ОСВ) установлено превышение в нем ПДК мышьяка, свинца, цинка, никеля, меди и сурьмы. Усвоение растениями тяжелых металлов максимально в первые годы размещения ОСВ, с годами концентрация их снижается и становится ниже фонового уровня. С точки зрения выноса токсичных элементов потенциальную опасность представляет цинк. Содержание питательных элементов в сформированных техноземах при размещении ОСВ повышается, улучшаются агрохимические параметры субстрата в сформированном корнеобитаемом слое, что обеспечивает успешное произрастание многолетних трав и создание устойчивого травостоя. Библ. 3.

**Ключевые слова:** промышленные отходы, рекультивация, осадки сточных вод, тяжелые металлы, химический анализ, растительный материал, устойчивый травостой.

Experience of sludge usage for biological recultivation of slime storage of «EVRAZ ZSMK» / Vodoleev A.S., Cherdanceva E.S., Kurensky I.A. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 60.

Eco-technical characteristics of industrial waste of “EVRAZ ZSMK” and the possibility assess of the use in recultivation purposes of sewage sludge (SS) of municipal wastewater are given in the article. According to the analysis of organic-substrate (slag + SS) is set the excess of the MPC in it of arsenic, lead, zinc, nickel, copper and antimony. Assimilation by plants of heavy metals is possible in the early years of the SS placement; over the years, their concentration decreases and becomes lower than the background level. Zinc is considered to be potentially dangerous from the point of view of the toxic elements removal. The nutrients content increases in formed technogenic lands when placing SS, agro-chemical parameters of the substrate formed in the root zone improve, it in turn ensures the successful growing of perennial grasses and creating sustainable grass. Ref. 3.

**Keywords:** industrial waste, recultivation, sewage sludge, heavy metals, chemical analysis, plant material, sustainable grass.

#### УДК 628.474.76

Математическая модель для прогнозных расчетов образования и извлечения свалочного газа на закрытых свалках ТБО / Волынкина Е.П., Домнин К.И. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 62.

Закрытые свалки ТБО – источник свалочного газа (СГ), содержащего 40 – 60 % метана, который является парниковым газом и одновременно хорошим топливом. Для технико-экономической оценки и проектирования систем сбора СГ необходимо надежное прогнозирование его количества. Выполнено сравнение существующих математических моделей для прогнозных расчетов образования и извлечения СГ: Американской, Украинской, Восточно-Европейской. Существующие модели были разработаны для климатических условий и высоких стандартов захоронения отходов развитых западных стран и их применение в странах с другим составом отходов и неразвитой системой управления ТБО приводит к существенным погрешностям. Кроме этого, существующие модели не могут применяться для закрытых свалок ТБО. Для условий закрытых российских свалок предложено использовать скорректированную Восточно-Европейскую модель с учетом состояния свалочных грунтов на момент сооружения системы дегазации. В результате насосного теста в условиях закрытой свалки г. Новокузнецка экспериментально показано, что данные экспериментальных исследований наиболее близки к расчетному значению по предложенной модели, в то время как модельные оценки по известным моделям существенно завышены. Ил. 1. Табл. 3. Библ. 6.

**Ключевые слова:** свалочный газ, математическая модель, прогнозный расчет, свалка ТБО.

Mathematical model for the calculations of the generation and recovery of landfill gas on the closed landfills MSW / Volynkina E.P., Domnin K.I. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 62.

MSW landfills are the source of landfill gas (LFG) containing 40 – 60 % methane, which is greenhouse gas and at the same time a good fuel. For technical and economic evaluation and design of systems for collecting LFG need a reliable prediction of its quantity. The comparison of existing mathematical models for the calculations of the

LFG generation and recovery was made: the American, Ukraine and Central-Eastern Europe LFG Models. It is shown that the existing models have been developed for the climatic conditions and high standards of waste disposal developed Western countries and their application in countries with other composition of the waste and poor solid waste management system leads to significant errors. In addition, the existing models can't be used for closed landfills. For the conditions of the closed Russian landfills is proposed to use the Adjusted Central-Eastern Europe LFG model based the landfill soil composition at the time of construction of the degassing system. As a result of the pumping test in the conditions of the Novokuznetsk landfill experimentally is shown that the experimental results are the closest to the calculated value for the proposed model, while the model estimates from the known models significantly overestimated. Fig. 1. Table 3. Ref. 6.

**Keywords:** landfill gas, mathematical model, prediction calculation, MSW landfill.

#### УДК 669.1.004.82

Получаемые из тонкодисперсных углеродистых материалов и других отходов брикеты и гранулы для технологических целей / Ливенец В.И. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 71.

Изучены перспективы получения и использования брикетирования и грануляции различных пылевидных отходов (в том числе углеродистых) в технологических процессах (например, для ферросплавного и литейного производств). Табл. 2. Библ. 5.

**Ключевые слова:** брикеты в технологии, углеродистые отходы

Briquettes and pellets for technological purposes derived from fine carbon materials and other wastes / Livenets V.I. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 71.

The prospects for obtaining and usage of briquetting and granulation of different powdered production wastes, including of carbonaceous, in the technological processes, for example, for the iron-alloy and foundry production are studied in the paper. Table 2. Ref. 5.

**Keywords:** briquette, carbon wastes.

#### УДК 662.74

Каталитическая очистка выбросов участка кристаллизации нафталиновой фракции / Павлович Л.Б., Краутер А.А. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 73.

Исследованы экологические риски от выбросов в атмосферу с участка кристаллизации нафталиновой фракции. Разработана технология сбора выбросов коллекторной системой и каталитической очисткой на шлаковых катализаторах. Ил. 2. Табл. 1. Библ. 3.

**Ключевые слова:** нафталиновая фракция, переработка, выбросы, экологический риск, коллекторная система, каталитическая очистка, катализатор шлаковый.

Catalytic emission purification of crystallization naphthalene fraction area / Pavlovich L.B., Krauter A.A. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 73.

The ecological risks from emissions from the crystallization naphthalene fraction area have been examined. The technology for collecting emissions by the collector system and catalytic purification on the slag catalysts has been worked out. Fig. 2. Table 1. Ref. 3.

**Keywords:** naphthalene fraction, recycling, emissions, environmental risk, collector system, catalytic purification, slag catalysts.

#### УДК 657.6

Проблемы формирования модифицированного мнения аудитора в современных условиях / Козлов В.П., Жигадло И.Ю. // Вестник СибГИУ. – № 3 (9). – С. 76.

Изложены проблемы, связанные с формированием модифицированного мнения о достоверности отчетности. Формирование объективного мнения аудитора о достоверности финансовой отчетности оказывает большое влияние на принятие пользователями корректных экономико-управленческих решений. В то же время современная регулятивная база не дает ясного понимания процесса формирования модифицированного мнения. Современные стандарты вводят понятие «всеобъемлемости» обстоятельств, которые влияют на достоверность отчетности, при этом нормативные акты не содержат методики количественной и качественной оценки «всеобъемлемости». Следует также отметить, что в современных условиях возникают противоречия между очень важной категорией аудита – существенностью – и вновь введенным понятием «всеобъемлемость». Кроме того, отсутствуют связи между действующими аудиторскими стандартами, которые посвящены аудиторскому заключению. Все это вызывает определенные трудности у аудиторов при оформлении результатов проверки. Представлено видение решения проблем и противоречий, имеющихся в регулятивной базе современного аудита, предложена методика расчета порогового значения «всеобъемлющей» ошибки. Ил. 1. Табл. 4. Библ. 11.

**Ключевые слова:** всеобъемлемость, категория, существенные искажения, ошибочное мнение, модифицированная достоверность, отчетность, заключение, стандарты.

Problems of formation of the modified opinion of the auditor in modern conditions / Kozlov V.P., Zhigadlo I.Yu. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 76.

In article the problems connected with the formation of the modified opinion on the reporting reliability are stated. The formation of objective opinion of the auditor on the reliability of financial statements has a great influence on adoption of correct economical and administrative decisions of its users. At the same time the modern regulatory base doesn't give clear understanding of the formation process of the modified opinion. Modern standards enter concept of the “comprehensiveness” of circumstances, which influence the reporting reliability. Thus, regulations don't contain a technique of quantitative and quality standard of the “comprehensiveness”. It is also necessary to note that in modern conditions there are contradictions between very important categories of audit – importance – and again entered the “comprehensiveness”. Besides, there are no communications between the existing auditor standards which are devoted to an audit report. All this causes certain difficulties in auditors at registration of the check results. The author of the article represents the vision of the solution of the problems and contradictions, which are available in regulatory base of modern audit and offers a method of calculation of threshold value of a “comprehensive” mistake. Fig. 1. Table 4. Ref. 11.

**Keywords:** comprehensiveness, category, material distortions, wrong, modified opinion, reliability, reporting, conclusion, standards.

#### УДК 378.147

Опыт организации методической работы студентов на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ / Михайличенко Т.А., Стерлигов В.В. // Вестник СибГИУ. – 2014. – № 3 (9). – С. 84.

Рассмотрены принципы организации самостоятельной работы студентов в свете новых образовательных стандартов, обобщен опыт их реализации на кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ. Представлены и проанализированы наиболее эффективные технологии активного обучения для подготовки студентов-теплотехников. Библ. 2.

**Ключевые слова:** реформа образования, федеральные государственные образовательные стандарты, компетентностный подход, инновационно-ориентированный специалист, технологии активного обучения.

Experience of methodological work of the students at the department of heat-power engineering and ecology SibGIU / Mikhailichenko T.A., Sterligov V.V. // Bulletin of SibSIU. – 2014. – № 3 (9). – P. 84.

The principles of organization of independent studies by students in the frameworks of new federal state educational standards have been considered. The experience of the implementation of these principles at the Department of heat power engineering and ecology of Siberian State Industrial University has been summed up. The most effective technologies for active learning have been discussed while training students of heat power profile. Ref. 2.

**Keywords:** education reform, federal state educational standards, competence-based approach, innovative-focused specialist, technologies for active training.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

1. Металлургия и материаловедение.
2. Горное дело и геотехнологии.
3. Машиностроение и транспорт.
4. Энергетика и электротехнологии.
5. Химия и химические технологии.
6. Архитектура и строительство.
7. Автоматизация и информационные технологии.
8. Экология и рациональное природопользование.
9. Экономика и управление.
10. Образование и педагогика.
11. Гуманитарные науки.
12. Социальные науки.
13. Отклики, рецензии, биографии.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения и акт экспертизы.

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

В редакцию следует направлять два экземпляра текста статьи на бумажном носителе, а также на электронном. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте ответственному секретарю журнала на e-mail: [konovserg@gmail.com](mailto:konovserg@gmail.com) с пометкой «статья в Вестник СибГИУ».

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

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

пространенных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (\*.xls, \*.vsd и др.). На обратной стороне рисунка должны стоять порядковый номер, соответствующий номеру рисунка в тексте, фамилии авторов, название статьи.

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

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

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

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

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

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное на-

звание книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

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

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

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

включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

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

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

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

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ и представлены на сайте СибГИУ ([www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)) в разделе Наука и инновации, подразделе Научные издания.

