



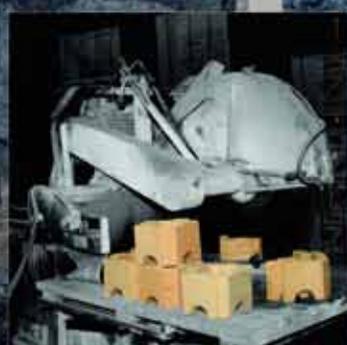
НОВЫЕ

ISSN 1683-4518

ОГНЕУПОРЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕКЛАМА



БОРОВИЧСКИЙ КОМБИНАТ ОГНЕУПОРОВ

160

ЛЕТ СТАБИЛЬНОСТИ

6

ИЮНЬ 2017

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КАЩЕЕВ И. Д.**
Зам. главного редактора **АКСЕЛЬРОД Л. М.**

БЕЛЕНЬКИЙ А. М.	ЛУКИН Е. С.	ФОМИЧЕВ М. С.
БЕЛЯКОВ А. В.	МОЖЖЕРИН В. А.	ШЕВЧИК А. П.
ВЕРЕЩАГИН В. И.	ОДЕГОВ С. Ю.	ШЕШУКОВ О. Ю.
ВИСЛОГУЗОВА Э. А.	ПЕРЕПЕЛИЦЫН В. А.	ШУБИН В. И.
ВОРОНИНА О. Б.	ПИВИНСКИЙ Ю. Е.	ЮРКОВ А. В.
ГОРБАНЕНКО В. М.	ПЫРИКОВ А. Н.	_____
ГОРОХОВСКИЙ А. В.	СМИРНОВ Л. А.	ANEZIRIS CHRISTOS G. (ГЕРМАНИЯ)
ГОРОХОВСКИЙ А. М.	СОКОВ В. Н.	GARTEN VICTORIA (ГЕРМАНИЯ)
ГРИШПУН Е. М.	СОКОЛОВ В. А.	MARTYNENKO VALERY (УКРАИНА)
ДАВЫДОВ С. Я.	СОСКОВЕЦ О. Н.	PISCHEK STEFAN PAUL (АВСТРИЯ)
ДОРОГАНОВ В. А.	СТОЛИН А. М.	RASCHMAN PAVEL (СЛОВАКИЯ)
КАЛЕНДА А. В.	СУВОРОВ С. А.	STONYS RIMVYDAS (ЛИТВА)
КУЗНЕЦОВ Д. В.	СУЗДАЛЬЦЕВ Е. И.	WOHRMEYER CHRISTOPH (ГЕРМАНИЯ)
КУРУНОВ И. Ф.	ТАРАСОВСКИЙ В. П.	
ЛЕБЕДЕВ Ю. Н.	ФИЛОНОВ М. Р.	

Научные редакторы *Г. Г. Гаерик, А. Н. Синицына*
Художник-дизайнер *Т. П. Кошкина*
Компьютерная верстка *Т. П. Кошкиной*
Корректор *Ю. И. Королёва*

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-65789 от 20.05.2016 г.

Адрес редакции:
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4 (п/я № 217)
Тел.: (495) 955-01-83, (495) 955-01-82
E-mail: ogneupor@imet.ru, ognemet@misis.ru



Статьи из журнала переводятся на английский язык и публикуются
в журнале «**Refractories and Industrial Ceramics**»,
издаваемом международным информационно-издательским
консорциумом «Springer»

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Первая оперативная типография»
115114, Москва, 2-й Кожевнический пер., д. 12, стр. 5
Тел.: 8 (495) 604-41-54, 8 (495) 994-49-94

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН, в каталог российских электронных периодических изданий. Журнал входит также в систему РИНЦ, а его переводная версия (Refractories and Industrial Ceramics) — в международную базу цитирования Web of Science (раздел Science Citation Index Expanded).

Ответственность за достоверность информации в публикуемых
материалах и рекламе несут авторы и рекламодатели.
Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов
опубликованных материалов

Подписано в печать 26.06.17. Формат 60×84 1/8.
Бумага мелованная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 8,75.
Заказ

К 160-летию АО «Боровичский комбинат огнеупоров»

- Можжерин А. В.** Динамично развиваемся и уверенно движемся вперед.....3
- Можжерин А. В., Сакулин А. В., Маргишвили А. П., Гершкович С. И., Коржавин А. Ю., Витовский А. В., Мусевич В. А., Журавлев С. Г., Попович В. Н., Никонов С. В., Букарева О. В.** Опыт применения огнеупоров АО БКО в ПАО «Северсталь».....4
- Сакулин А. В.** На уровне современных требований.....12
- Маргишвили А. П., Гершкович С. И., Иксанова А. Н., Белова И. Г., Иксанов Ф. Р., Скурихин В. В.** Разработка и внедрение в производство новых огнеупорных материалов и пропантов.....16
- Коржавин А. Ю., Витовский А. В., Мусевич В. А.** Уверенно смотрим в будущее.....25

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

- Вдовин К. Н., Точилкин Василий В., Умнов В. И., Точилкин Виктор В.** Совершенствование огнеупорных конструкций системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш МНЛЗ.....29

СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Бирюкова А. А., Джиеналыев Т. Д., Тихонова Т. А.** Керамические пропанты на основе природного алюмосиликатного сырья Казахстана.....33

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

- Макаров В. Н., Потапов В. Я., Давыдов С. Я., Макаров Н. В.** Метод аддитивного аэродинамического расчета узла классификации фрикционных аппаратов.....40

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

- Шешуков О. Ю., Некрасов И. В., Михеенков М. А., Егиазарьян Д. К., Лобанов Д. А.** Стабилизация рафинировочных шлаков путем корректировки их фазового состава и придания им свойств минеральных вяжущих веществ.....45
- Митина Н. А., Лотов В. А.** Исследование изменения фазового состава, свойств и гидравлической активности при термической обработке магнезиальных материалов.....53
- Кузин В. В., Фёдоров М. Ю., Дашич Предраг.** Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием силовой нагрузки.....60

ЭКОЛОГИЯ

- Аверкова О. А., Логачёв К. И., Грицкевич М. С., Логачёв А. К.** Аспирация аэрозоля в тонкостенный отсос-раструб при набегающем потоке. Часть 2. Динамика пылевых частиц.....66

Abstracts.....71

To the 160th anniversary of JSC «Borovichi Refractory Plant»

- Mozhzhherin A. V.** Dynamically developing and confidently moving forward.....3
- Mozhzhherin A. V., Sakulin A. V., Margishvili A. P., Gershkovich S. I., Korzhavin A. Yu., Vitovsky A. V., Musevich V. A., Zhuravlev S. G., Popovich V. N., Nikonov S. V., Bukareva O. V.** Experience of using refractories AO BKO PAO «Severstal».....4
- Sakulin A. V.** At the level of modern requirements.....12
- Margishvili A. P., Gershkovich S. I., Iksanova A. N., Belova I. G., Iksanov F. R., Skurikhin V. V.** Development and introduction of new refractory materials and proppants into production.....16
- Korzhavin A. Yu., Vitovsky A. V., Musevich V. A.** We look confidently at the future.....25

REFRACTORIES IN THE HEAT UNITS

- Vdovin K. N., Tochilkin Vasilii V., Umnov V. I., Tochilkin Victor V.** Refractory brickwork development for the CCM pouring ladle – tundish system.....29

RAW MATERIALS

- Biryukova A. A., Dzhienalyev T. D., Tikhonova T. A.** Ceramic propping agents based on the natural raw alumina-silicate material of the Republic of Kazakhstan.....33

MANUFACTURING AND EQUIPMENT

- Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V.** The additive aerodynamic calculation of the friction gear's component intended for the particle size classification.....40

SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT

- Sheshukov O. Yu., Nekrasov I. V., Mikheenkov M. A., Egiazarian D. K., Lobanov D. A.** Refinery slag stabilization by means of their phase composition correction and impart to them the mineral binding properties.....45
- Mitina N. A., Lotov V. A.** The investigation of the phase composition, properties and hydraulic activity changing under the magnesia materials' heat treatment.....53
- Kuzin V. V., Fedorov M. Yu., Dasic Predrag.** The stress state under the load between the TiC/TiN-coating layers applied to the nitride ceramics.....60

ECOLOGY

- Averkova O. A., Logachev K. I., Gritskevich M. S., Logachev A. K.** Aerosol aspiration into the thin-wall suction bell mouth in case of incident flow. Part II. The dynamic of dust particles.....66

Abstracts.....71



ДИНАМИЧНО РАЗВИВАЕМСЯ И УВЕРЕННО ДВИЖЕМСЯ ВПЕРЕД...

Уважаемые читатели!

В июле 2017 г. исполняется 160 лет Боровичскому комбинату огнеупоров — предприятию, известному не только в России, но и далеко за ее пределами. По итогам 2016 г. мы заняли первое место в России по количеству выпускаемой продукции среди производителей алюмосиликатных огнеупоров и бокситовых керамических пропантов. АО «Боровичский комбинат огнеупоров» играет важную роль в российской экономике, обеспечивая занятость 4600 человек, и входит в число крупнейших налогоплательщиков Новгородской области. Мы поставляем высококачественные огнеупоры и пропанты на предприятия металлургической, нефтяной, стекольной, химической, атомной и других отраслей промышленности более чем в 17 стран мира. В 2016 г. объем продукции, выпущенной предприятием, составил 500 тыс. т, в 2017 г. мы увеличим итоговые объемы до 550 тыс. т.

Среди наших партнеров — ОАО «Сургутнефтегаз», ПАО «НК Роснефть», ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ПАО «Северсталь», ПАО ММК, УК «РУСАЛ», ПАО «Лукойл», ЕВРАЗ, ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Газпром нефть» и многие другие. Мощный технологический потенциал, собственный научно-исследовательский институт, постоянное обновление оборудования, работа над повышением квалификации сотрудников дают нам возможность выполнять все требования заказчиков, которые усложняются год за годом. Регулярное инвестирование средств акционеров в эффективное развитие предприятия приводит к новым достижениям, которые позволяют нам уверенно чувствовать себя на рынке. Все эти установки успешно сочетаются с системой бережливого производства, которая реализуется на комбинате с прошлого года, доказывая свою эффективность. Результативная деятельность акционерного общества засвидетельствована многочисленными наградами.

Дело, начатое более полутора веков назад, достойно продолжает действующий трудовой коллектив, который остается главной ценностью и основным преимуществом предприятия. Мы гарантируем своим сотрудникам лучшие условия труда, обеспечение современными средствами техники безопасности, соблюдение санитарно-гигиенических норм, разнообразные льготы, в том числе беспроцентный кредит на приобретение жилья востребованным категори-



ям работников и выплату «подъемных» демобилизованным из рядов Российской армии. На протяжении двух десятилетий проводится активная профориентационная деятельность по подготовке кадров. Со студентами вузов и техникумов заключаются договоры, включающие все этапы сотрудничества: от знакомства с предприятием до принятия выпускника на работу. Все это позволяет привлекать к длительной работе на комбинате необходимых специалистов.

Мы несем социальную ответственность перед городом, в котором живем, реализуем программы природоохранных мероприятий, уделяем большое внимание вопросам оказания благотворительной помощи. Для работников и жителей города всегда открыты двери современного физкультурно-оздоровительного комплекса «Олимп» с 25-метровым бассейном, санатория-профилактория, Дома культуры, базы отдыха «Пирос», медико-санитарной части. Новый социальный проект этого года — строительство и запуск первого в Боровичах Ледового дворца с крытой ареной для игры в хоккей с шайбой. Более 2 тыс. человек состоит в нашей ветеранской организации — мы помним и ценим их труд и вклад в развитие комбината. Одаренные школьники получают ежемесячную стипендию имени первого председателя Совета директоров Н. А. Новикова. Наши сотрудники активно участвуют в политической деятельности, являясь депутатами представительных и законодательных органов власти.

Комбинат всегда развивался вместе с нашей страной. У нас были и победы, и трудности, но в любые времена мы продолжали работать, шаг за шагом превращаясь в более мощное предприятие. Сегодня мы ставим перед собой не менее амбициозные цели для того, чтобы еще больше укрепить наши позиции на рынке. Мы не боимся быть первыми и с уверенностью готовы вступить в новое десятилетие!

**Генеральный директор АО БКО
Анатолий Можжерин**





ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОГНЕУПОРОВ АО БКО В ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

К. т. н. **А. В. Можжерин**¹, к. т. н. **А. В. Сакулин**¹, к. т. н. **А. П. Маргишвили**¹,
к. т. н. **С. И. Гершкович**¹, **А. Ю. Коржавин**², **А. В. Витовский**², к. т. н. **В. А. Мусевич**² (✉),
С. Г. Журавлёв³, **В. Н. Попович**³, **С. В. Никонов**³, **О. В. Букарева**³

¹ АО БКО, г. Боровичи Новгородской обл., Россия

² ООО «Торговый дом БКО», г. Боровичи Новгородской обл., Россия

³ ПАО «Северсталь», г. Череповец Вологодской обл., Россия

Рассмотрены результаты сотрудничества между АО БКО и ПАО «Северсталь» в области поставок и эксплуатации широкого спектра огнеупорных материалов. Указаны основные тенденции развития, направленные на совершенствование технологии и оптимизацию параметров физико-химических характеристик огнеупорных материалов. Представлены основные инновационные огнеупорные материалы и реализованные проекты, улучшившие технико-экономические показатели работы тепловых агрегатов в ПАО «Северсталь» по главным переделам металлургических производств, что позволило повысить эффективность процессов выплавки чугуна, стали, добиться снижения удельных показателей при получении единицы готового продукта при общем увеличении ресурсов эксплуатации футеровок.

Ключевые слова: огнеупорные материалы, доменная печь, воздухонагреватель, вращающаяся печь, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, комплексная поставка, рабочий слой футеровки, стойкость, износ, ресурс эксплуатации.

Один из крупнейших интегрированных заводов по производству стали в мире — Череповецкий металлургический комбинат ПАО «Северсталь» находится среди лидеров российских компаний по совокупному производству стали: объем производства более 11,5 млн т стали в год. Комбинат расположен в г. Череповце, который находится на стыке трех экономических районов: Европейского Севера, Северо-Запада и Центра России. Основные виды выпускаемой предприятием продукции: арматура, катанка, круг, уголок, швеллер, шестигранник, судовая сталь, сталь для мостостроения, строительства зданий и сооружений и многие другие продукты. Клиентская база предприятия насчитывает свыше 5 тыс. российских и зарубежных компаний, работающих в основных секторах промышленности, таких как строительство, автомобилестроение, ТЭК, машиностроение, судостроение и др. Численность персонала дивизиона «Северсталь Российская Сталь» — более 37 тыс. человек.

АО БКО и ПАО «Северсталь» имеют многолетнее (с 1959 г.) тесные партнерские отношения в области производства, реализации и эксплуатации большого спектра высококачественных огнеупорных материалов: изделий для доменных печей, чугуновозов, ковшей, элементов металлопроводки, изделий из тиксотропных бетонов, неформованной продукции: мертелей, масс, бетонов широкого назначения. На сегодняшний день ПАО «Северсталь» — лидер в АО БКО по объемам отгрузки огнеупорных материалов (в сравнении с объемами реализации для других крупных заказчиков) как в натуральном, так и в денежном выражении (рис. 1). Поставляемые огнеупорные продукты находят широкое применение в различных металлургических агрегатах ПАО «Северсталь», успешно эксплуатируются, отвечая высоким заявленным требованиям металлургов и гарантированным показателям стойкости. При этом комбинат всегда выполняет сроки поставок огнеупорных материалов во избежание срывов производственных программ цехов и подразделений ПАО «Северсталь».

Долголетнее сотрудничество с ПАО «Северсталь», накопленный опыт, производственные и научные ресурсы позволяют увидеть пути оптимизации и улучшения огнеупоров. Специалисты



В. А. Мусевич

E-mail: vmusevich@aobko.ru



наших компаний уделяют пристальное внимание повышению стойкости и эффективности эксплуатационных характеристик всех огнеупорных материалов, реализуемых на ПАО «Северсталь». Общая стратегическая цель — не только сохранить взаимовыгодное сотрудничество в области поставок огнеупорных материалов, но и расширить ассортимент, номенклатуру и объемы поставок серийной, перспективной и высокотехнологичной продукции.

В настоящее время АО «Боровичский комбинат огнеупоров» является участником программы импортозамещения и увеличения числа поставщиков, осуществляемой ПАО «Северсталь». Общая стратегическая цель — не только сохранить взаимовыгодное сотрудничество в области поставок огнеупорных материалов, но и расширить ассортимент, номенклатуру и объемы поставок серийной, перспективной и высокотехнологичной продукции. Специалисты комбината прошли обучение у Бизнес-Системы «Северсталь» для дальнейшей реализации проекта «Бережливое производство» в условиях нашего предприятия. Данная инициатива направлена на достижение максимальной эффективности труда и производства АО БКО.

Перечислим основные инновационные огнеупорные материалы и решения, улучшившие технико-экономические показатели работы тепловых агрегатов ПАО «Северсталь» по главным передельным металлургическим производствам.

АО БКО традиционно выпускает алюмосиликатные изделия марок ШВ-28, ШВ-37, ШВ-42 и МКВ-72 по ГОСТ 20901–75 с изм. 1–5 для кладки воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья доменных печей. Одним из основных факторов интенсификации доменного процесса является повышение температуры нагрева доменного дутья, что достигается за счет применения высококалорийного топлива, повышения температуры продуктов горения, применения эффективной насадки с повышенной поверхностью нагрева, совершенствования конструкции воздухонагревателей.

В 2013–2016 гг. по заказу коксоаглодоменного производства (КАДП) ПАО «Северсталь» комбинатом реализовано 2 крупных проекта по комплексной поставке огнеупорных материалов для реконструкции воздухонагревателей (ВН) № 1 и 2 доменной печи (ДП) № 5, в том числе 37- и 65-канальные насадочные изделия (с диаметром отверстий 20 мм) марок ШВ-37 и ШВ-42, изделия для форкамеры, воздухопроводов, штуцеров, арок кауперов и др. (рис. 2).

При повышении температуры дутья воздухопроводы испытывают повышенную тепловую нагрузку, а поскольку их футеровка выполнена кольцевой кладкой клиновыми изделиями, при повышенной температуре на них дополнительно будет действовать сжимающая нагрузка за счет теплового расширения. Поэтому изделия, кроме высокой прочности на холоду, должны иметь низкую ползучесть при сжатии (крип) — не более

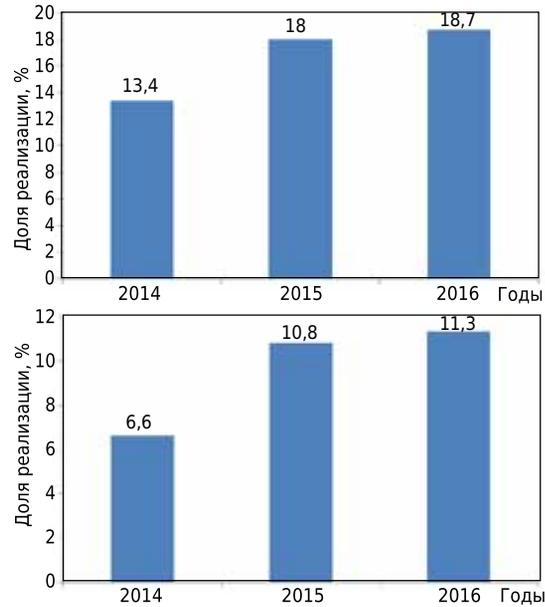


Рис. 1. Доля реализации, %, огнеупорной продукции АО БКО (от общих объемов продаж) в ПАО «Северсталь»: а — в натуральном выражении; б — в стоимостном выражении



Рис. 2. Внешний вид воздухонагревателей доменной печи № 5 ПАО «Северсталь»

0,8 % при 1500 °С с выдержкой 50 ч. Для кладки воздухопроводов горячего дутья в АО БКО разработаны и внедрены изделия марки DRL-150 на основе андалузита, обладающие низкой скоростью ползучести: в интервале 15–25 ч 0,003 %/ч, в интервале 25–50 ч — 0,002 %/ч. Ползучесть при 1500 °С в течение 50 ч составляет 0,6 %. Низкая скорость ползучести изделий марки DRL-150 обусловлена малым количеством стеклофазы, обладающей высокой вязкостью, и формированием плотной структуры вследствие реакции тонкодисперсного глинозема со стеклом, обогащенным кремнеземом и вытесненным из первоначального зерна андалузита, с образованием вторичного муллита (табл. 1).

Изделия форкамеры служат в сложном термонапряженном состоянии в условиях переменного теплового режима (нагрев – охлаждение), поэтому к огнеупорам предъявляются повышенные требования по термостойкости. В короткие сроки была





Таблица 1. Физико-химические свойства муллитокорундовых изделий DRL-150 для воздухопроводов горячего дутья бесшахтных воздухонагревателей

Показатели	ТУ 1564-447-53381545-2007 с изм. 1-5	Фактические величины
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ , не менее	80	85,0
Fe ₂ O ₃ , не более	1,2	0,51
Огнеупорность, °С, не ниже	1770	>1790
Открытая пористость, %, не более	19	15,2
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее	2,8	2,91
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	60	87
Ползучесть при 1500 °С, давлении 0,2 МПа и выдержке 50 ч, %, не более	0,8	0,5-0,6
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, °С, не ниже	1600	1630
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	5	18

разработана технология производства изделий марки HRK для форкамер. В сочетании с высокой механической прочностью и низкой пористостью изделия марки HRK обладают высокой устойчивостью к термоударам. При открытой пористости менее 16 % и пределе прочности при сжатии свыше 50 МПа изделия выдерживают более 100 водяных теплосмен (табл. 2).

Перед отправкой продукции производили контрольную стендовую сборку элементов воздухонагревателя (купола, воздушного коллектора, газового коллектора, арок штуцеров), а также совместную приемку с представителями ПАО

Таблица 2. Физико-химические свойства муллитокремнеземистых изделий HRK для форкамеры бесшахтных воздухонагревателей

Показатели	ТУ 1564-255-53381545-2008 с изм. № 1-5	Фактические величины
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ , не менее	52	57,5
Fe ₂ O ₃ , не более	2,0	1,38
Огнеупорность, °С, не ниже	1750	> 1750
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, °С, не ниже	1400	1500
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не ниже	2,35	2,40
Открытая пористость, %, не более	25	17,2
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	40	98,0
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	100	>100

«Северсталь» всех огнеупорных материалов. Выполнение предварительной стендовой сборки (рис. 3) позволило обеспечить:

- проверку качества изготовления изделий;
- тщательную подгонку элементов конструкции;
- более легкую и ускоренную сборку элементов воздухонагревателя в условиях ПАО «Северсталь».

По результатам приемки и контрольной сборки все изделия марок HRK и DRL-150 для футеровки воздухопроводов горячего дутья признаны соответствующими требованиям нормативной документации и рекомендованы для использования при строительстве воздухонагревателей.

При непосредственной футеровке воздухонагревателей ДП № 5 ПАО «Северсталь» специ-



Рис. 3. Процесс стендовой сборки элементов воздухонагревателя: а, б — сборка купола воздухонагревателя; в — собранный купол; г — собранная арка штуцера





алисты комбината и организации — подрядчика строительных работ отметили удобство футеровочных работ после качественно выполненной контрольной сборки элементов воздухонагревателя в условиях АО БКО.

Внедрение насадок марок ШВ-37 и ШВ-42 (в том числе 65-канальной насадки) для бесшахтного воздухонагревателя данной конструкции позволило уменьшить массу воздухонагревателя и увеличить срок службы.

В целом комплексная поставка инновационных огнеупорных материалов с заменой конструкции позволила повысить эффективность эксплуатации воздухонагревателя и увеличить производительность ДП № 5 ПАО «Северсталь».

Среди недавно реализованных крупных инвестиционных проектов можно выделить выигрыш АО БКО тендера на комплексную поставку огнеупорных изделий для реконструкции коксовой батареи № 4 коксоаглодоменного производства (КАДП). Суммарно это более 4 тыс. т продукции, включающей сложный и особо сложный ассортимент изделий марок ШК-28, ШК-37, ШК-41 (рис. 4). Принятию решения о выигрыше тендера способствовали следующие факторы:

- отечественный производитель, собственное производство и технология;
- географическая близость расположения к предприятию-заказчику, что обеспечивает быстроту поставки продукции, возможность полного контроля и аудита производственного процесса представителями ПАО «Северсталь»;
- положительный опыт реализации и поставок аналогичных продуктов в ПАО «Северсталь»;
- высокое качество изделий для коксовых печей;
- 100 %-ная доля ответственности АО БКО за качество и необходимый ресурс эксплуатации огнеупорной продукции в коксовой батарее № 4.

В августе – декабре 2016 г. была осуществлена поэтапная поставка всего перечня изделий для коксовой батареи № 4 КАДП. Замечаний и нареканий при приемке, входном контроле огнеупорной продукции и ее монтаже от ПАО «Северсталь» не поступало.

Предложена и внедрена двухслойная энергосберегающая футеровка вращающейся печи для обжига извести известково-доломитового цеха (ИДЦ) сталеплавильного производства (СП) с использованием передовых высокоглиноземистых огнеупоров для рабочего слоя футеровки и высокопрочных теплоизоляционных огнеупоров для теплоизоляционного слоя футеровки (рис. 5, 6).

В рабочем слое футеровки зоны обжига печи предложено применить муллитовые изделия марки МЛУТ-62 на основе андалузита с улучшенными физико-химическими и термомеханическими характеристиками [1]:

- высокой температурой начала размягчения (выше 1600 °С);
- низкой пористостью, стабильностью объема;
- низкой теплопроводностью;



Рис. 4. Коксовая батарея № 4 КАДП ПАО «Северсталь»



Рис. 5. Вращающаяся печь для обжига извести ИДЦ

- повышенной термической стойкостью (25–30 водяных теплосмен);
- медленной и стабильной эрозией, низким износом.

Применение огнеупоров на основе андалузита (табл. 3) в зоне обжига вращающихся печей различных отраслей промышленности (рис. 6) исключает риск скалывания футеровки, а также обеспечивает продолжительную службу огнеупорной кладки вследствие равномерного и медленного износа. Изделия характеризуются

Таблица 3. Физико-химические свойства изделий МЛУТ-62

Показатели	ТУ 14-194-277-07 с изм. 1	Фактические величины
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ , свыше	62	66,60
Fe ₂ O ₃ , не более	1,1	0,87
Открытая пористость, %, не более	17	13,8
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	50	83,8
Температура начала размягчения, °С, не менее	1600	1670
Остаточные изменения размеров при нагреве при 1500 °С, %, не более	0,6	0,2
Термостойкость, теплосмены, не менее	25	26





Рис. 6. Футеровка вращающейся печи № 6 для обжига извести ИДЦ

3 года, зоны подогрева (горячий конец) 3 года, зоны подогрева (холодный конец) 3 года. В результате увеличиваются межремонтные интервалы вращающихся печей ИДЦ;

- уменьшение массы футеровки по предлагаемому дизайну;
- снижение выбросов CO_2 в атмосферу.

улучшенными термомеханическими и теплофизическими свойствами, химической устойчивостью, что обеспечивает их высокий многолетний технический ресурс.

Расчетные значения эффективности предложенного проекта:

- уменьшение тепловых потерь;
- снижение температуры на корпусе печи. При максимальном износе футеровки температура на корпусе печи не превышает допустимые значения;
- увеличение срока службы футеровки за счет повышенного ресурса применяемых материалов и способа кладки. Срок службы зоны обжига

В настоящее время комплексная футеровка вращающейся печи № 6 для обжига извести ИДЦ находится в эксплуатации 2,5 года (в работе с декабря 2014 г.). Расчетные значения эффективности от внедрения проекта подтверждаются фактически получаемыми показателями и результатами. Дальнейшие совместные шаги — проведение поэтапной замены однослойной футеровки на двухслойную энергосберегающую во всех вращающихся печах ИДЦ СП.

АО БКО является поставщиком огнеупорных материалов для футеровки 380-т сталеразливочных ковшей конвертерной стали (КС) сталеплавильного производства ПАО «Северсталь» (рис. 7). При этом осуществляются комплекты поставки продукции, в том числе вспомогательных и ремонтно-восстановительных материалов.

Рассмотрим эффективность огнеупорных материалов, применяемых в 380-т сталеразливочных ковшах:

1. Для оборотки сталеразливочного ковша успешно применяются бетонная смесь марки Borcast 55S и пластичная ремонтная масса марки BorPlast-65, которые используются для заполнения пространства между верхним кольцом рабочей футеровки и металлическим кожухом ковшей.

2. Использование в арматурной футеровке комбинированной кладки из изделий марки ШКУ-37 в зоне стены металла и марки КБУ в шлаковой зоне позволило повысить общую стойкость контрольного слоя до уровня не менее 8 кампаний.

Для увеличения стойкости арматурной футеровки 380-т сталеразливочных ковшей в АО БКО разработана технология изготовления усовершенствованных огнеупоров муллитокремнеземистого состава марки КБУ (табл. 4, рис. 8) с инновационным дизайном (SU-формат). Изделия обладают улучшенными физико-химическими характеристиками: повышенными огнеупорностью и термостойкостью, уменьшенными долей Fe_2O_3 и пористостью. Теплопроводность предложенных огнеупоров обеспечивает минимальную температуру на кожухе сталеразливочных ковшей [2].

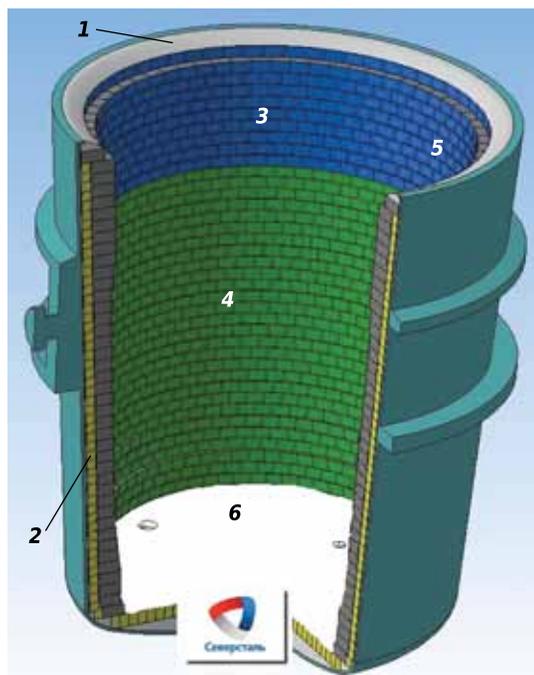


Рис. 7. Условная схема футеровки 380-т сталеразливочного ковша конвертерного производства с применением огнеупоров АО БКО: 1 — бетон и пластичная масса; 2 — изделия в зоне арматурного слоя; 3 — изделия шлакового пояса; 4 — изделия в зоне металла; 5 — мертель для кладки ремонтного комплекта шлакового пояса; 6 — бетон для футеровки дна





Преимущества использования изделий КБУ предложенного радиального формата следующие:

- ковш футеруется огнеупорами одного универсального формата, что способствует удобству и сокращению времени кладки;

- обеспечивается перекрытие вертикальных швов, следовательно, минимизируется вероятность прохода металла, повышается строительная прочность кладки;

- снижаются теплотери во время эксплуатации.

3. Внедрение в рабочей футеровке оксидоуглеродистых изделий оптимизированного состава и улучшенного дизайна обеспечило достижение средней стойкости 102 плавки (табл. 5, рис. 9). Данные огнеупорные изделия производятся на совместном предприятии АО БКО – «Yingkou Jinhonguan Meilu Ceramics Co.», Ltd. Предприятие годовой мощностью до 100 тыс. т углеродсодержащих изделий и масс было организовано с китайскими акционерами на базе сырьевого карьера магнезита с запасом 25 млн т и завода по плавке высококачественного магнезита. Совместное предприятие обладает современным высокотехнологичным смесительным и прессовым оборудованием, выпуск огнеупорной продукции с заявленным уровнем качества и набором физико-химических характеристик осуществляется под постоянным и пристальным контролем технических служб комбината [3].

4. Использование периклазошпинельного мертеля марки МПШ-65 для кладки рабочего слоя футеровки позволило усилить сопряжение элементов, снизить вероятность проникновения шлака и расплава металла в узлы сопряжения между огнеупорными изделиями, а также исключить вероятность раскрытия швов футеров-

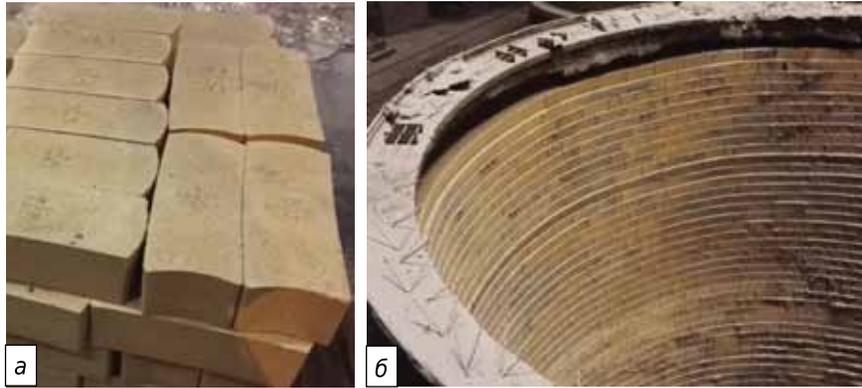


Рис. 8. Радиальные изделия марки КБУ: а — внешний вид; б — изделия в арматурном слое футеровки

Таблица 4. Техническая характеристика изделий марки КБУ

Показатели	ТУ 14-194-300-10 с изм. № 1	Фактические величины
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ , не менее	55	61
Fe ₂ O ₃ , не более	4	2,5
Открытая пористость, %, не более	20	15,2
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	35	68
Огнеупорность, °С, не ниже	1750	1750
Остаточные изменения размеров при нагреве при 1400 °С, %, в пределах	От -0,4 до +1,0	0
Термическая стойкость, теплосмены, не менее	4	6

ки в процессе эксплуатации 380-т сталеразливочных ковшей.

5. В АО БКО освоены и постоянно совершенствуются технологии получения сухих бетонных смесей для изготовления монолитных футеровок. В настоящее время мощность производства превышает 5000 т в год. Для заливки рабочей футеровки дна 380-т сталеразливочных ковшей предложен огнеупорный бетон марки BORCAST-96WTP (табл. 6). Текущая достигнутая стойкость футеровки дна ковшей при проведении тестовых испытаний 102 плавок

Таблица 5. Техническая характеристика оксидоуглеродистых материалов*

Показатели	Огнеупор		
	ПУ-6 для шлакового пояса	ПШУ-65 для стены	ПУ-3М для обортовки
Массовая доля, % (на прокаленное вещество):			
MgO, не менее	86 / 90	65 / 70	80 / 83
Al ₂ O ₃ , не менее	- / 5,5	10 / 13	- / 2
Антиокислительные добавки	Al + Si	Al + Si	-
Массовая доля углерода С, %, не менее	13 / 16	8 / 10	5 / 7
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее	2,95 / 2,99	3,00 / 3,05	2,85 / 2,89
Открытая пористость, %, не более	6,0 / 3,1	6,0 / 4,5	8,0 / 6,9
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее	30 / 48	35 / 59	30 / 41

* Числитель — норматив, знаменатель — усредненные значения показателей из многочисленных выборок.





Рис. 9. 380-т сталеразливочный ковш: а — собранный перед эксплуатацией; б — перед ломкой футеровки после достижения стойкости 102 плавки

(рис. 9, 10). В настоящее время проводится опытно-промышленная апробация.

Следует отметить, что сухие бетонные смеси линейки BORCAST успешно эксплуатируются в футеровке дна сталеразливочных ковшей других металлургических предприятий (ПАО «ТагМет», АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ООО «УГМК-Сталь» и др.), отвечая гарантированным показателям стойкости.

Комбинат реализует широкий спектр огнеупорных изделий для промежуточных ковшей ПАО «Северсталь». Для непрерывной разливки стали на слябовых МНЛЗ СП успешно осуществляются серийные поставки следующих изделий:

- труб защиты струи металла марки ТКГУ (гарантийная стойкость не менее 3 плавок);
- стопоров-моноблоков марки СКГУ (гарантийная стойкость не менее 14 плавок);

Таблица 6. Техническая характеристика бетонной смеси BORCAST-96WTP*

Показатели	Норма	Усредненные значения из многочисленных выборок
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ + MgO, не менее	96	97,2
Fe ₂ O ₃ , не более	1,0	0,3
CaO, не более	2,0	1,2
SiO ₂ , не более	1,0	0,5
Предел прочности при сжатии после обжига при 1500 °С, МПа, не менее	100	138
Остаточные изменения размеров при нагреве, %, не более, при 1500 °С	0,8	0,5
Кажущаяся плотность после обжига при 1500 °С, г/см ³ , не более	3,0	3,1
Максимальная температура применения, °С	-	1780
Массовая доля влаги, %, не более	0,7	0,3
Максимальный размер зерна, мм	-	6
* Низкоцементный бетон, для которого рекомендуется гидравлически твердеющее связующее; применяется виброукладка.		

- стаканов-дозаторов марки КУСД-80 (гарантийная стойкость не менее 14 плавок);
- погружаемых стаканов марки ПС-КГЦД (гарантийная стойкость не менее 600 т).

Осуществляются серийные поставки тиксотропных бетонных изделий для футеровки промежуточных ковшей цеха разливки конвертерной стали СП: турбостопы (металлоприемники), фильтрационные перегородки, бойные плиты.

Использование огнеупорных металлоприемников марки МКрБТ (рис. 11) производства АО БКО (для 27-т и 55-т промежуточных ковшей) обеспечивает снижение обреза непрерывнолитой заготовки в результате быстрого достижения стационарного режима непрерывной разливки, происходит также значительное снижение количества первичных экзогенных неметаллических включений корундового состава вследствие ассимиляции их поверхностью огнеупорного блока. Гарантийная стойкость металлоприемников марки МКрБТ выполняется и составляет не менее 14 и 16 плавков соответственно.

АО БКО имеет успешный опыт реализации программы импортозамещения в условиях ПАО «Северсталь». В 2010 г. выигран тендер на комплексную поставку огнеупорной продукции для футеровки реактора установки регенерации соляной кислоты цеха травления металла производства плоского проката. Проведена масштабная работа по реализации проекта: проведены первичная разработка расширенного дизайна; комплексная поставка огнеупоров для футеровки реактора верхней и нижней части, газохода, циклона, свода и подины; осуществлен шеф-надзор футеровки.

По итогам кампании футеровки получены следующие результаты:

- стойкость соответствует гарантийным обязательствам (5 лет);
- эксплуатационные характеристики соответствуют нормативным показателям;
- успешно проведено замещение импортных аналогов со сроком службы 3 года.

АО БКО — современное, эффективное и постоянно развивающееся предприятие со значитель-



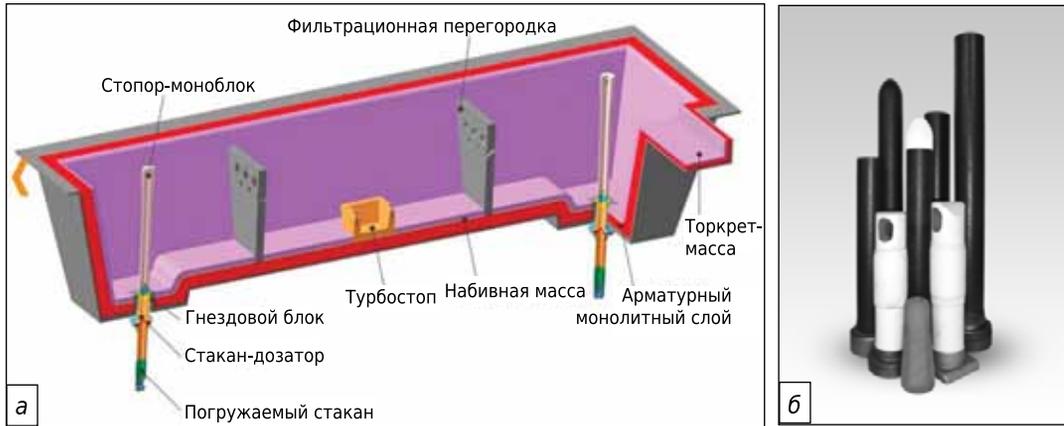


Рис. 10. Огнеупорные изделия для промежуточных ковшей: а — условная схема расположения элементов сталепроводки; б — внешний вид изделий разливочного припаса производства АО БКО



Рис. 11. Турбостоп марки МКрБТ: а — внешний вид; б — в собранном промежуточном ковше

Таблица 7. Техническая характеристика турбостопов марки МКрБТ

Показатели	ТУ 14-194-291-09	Фактические величины
Массовая доля, % :		
Al ₂ O ₃ , не менее	59,5	55
Fe ₂ O ₃ , не более	1,8	3
CaO	1,2	1-2
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	58	45

ной научно-технической базой и высококвалифицированными кадрами. Совместная планомерная деятельность технических специалистов АО БКО (ООО ТД БКО) и ПАО «Северсталь» по оптимизации огнеупоров и повышению стойкости узлов и рабочих агрегатов коксохимического, доменного, сталеплавильного и других производств приносит положительные результаты. Коллектив предприятия внедряет эффективные материалы, улучшает качество поставляемых огнеупорных материалов на каждом переделе, осуществляет непрерывный мониторинг службы продукции в условиях ПАО «Северсталь», проводит совместную работу по снижению удельных затрат и

оптимизации процессов металлургического производства, что способствует укреплению стратегического партнерства между компаниями.

Библиографический список

1. **Сакулин, А. В.** Разработка современных высокоэффективных огнеупорных материалов / А. В. Сакулин, В. В. Скурихин, Л. Ю. Громова, О. С. Федорова // Новые огнеупоры. — 2012. — № 6. — С. 14–19.
2. **Можжерин, А. В.** Совершенствование дизайна и материалов футеровок сталеразливочных ковшей / А. В. Можжерин, А. П. Маргишвили, В. А. Мусевич [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 31–33.
3. **Можжерин, А. В.** Перспективы поставок огнеупорных материалов ОАО БКО на ОАО НЛМК, совершенствование продукции и повышение эффективности металлургических процессов / А. В. Можжерин, А. П. Маргишвили, В. А. Мусевич, А. П. Дука // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 6–9. ■

© А. В. Можжерин, А. В. Сакулин, А. П. Маргишвили, С. И. Гершкович, А. Ю. Коржавин, А. В. Витовский, В. А. Мусевич, С. Г. Журавлёв, В. Н. Попович, С. В. Никонов, О. В. Букарева, 2017 г.





НА УРОВНЕ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ

К. т. н. **А. В. Сакулин** (✉)

АО БКО, г. Боровичи Новгородской обл., Россия

Среди основных направлений, заданных корпоративной стратегией АО «Боровичский комбинат огнеупоров», выделены: разработка и внедрение новой огнеупорной продукции с учетом изменений, происходящих у потребителей, и основных тенденций развития науки и производства с целью достижения конкурентного преимущества среди российских и зарубежных предприятий по производству огнеупоров и пропантов; производство «традиционной» продукции АО БКО в объемах, удовлетворяющих потребности рынка огнеупорной продукции; обеспечение комплексного подхода в удовлетворении потребностей клиентов, включающее проектирование тепловых агрегатов, поставку огнеупорной продукции, контроль и обслуживание в процессе эксплуатации; обеспечение высокого качества огнеупорной продукции и услуг, полностью удовлетворяющих требованиям потребителей; постоянные обновление и модернизация производственной базы комбината; способность быстрого удовлетворения потребностей клиентов в поставках огнеупорной продукции; диверсификация производства по отраслям и регионам.

ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СТРАТЕГИЯ

Основная цель производственной стратегии — повышение конкурентоспособности компании за счет достижения оптимального соотношения себестоимости и качества продукции, а также сокращения длительности производственного цикла. Производственная стратегия базируется на прогнозе развития рынков огнеупорной продукции и услуг России и других стран СНГ.

Приоритеты деятельности, заданные производственной стратегией:

- глубокая модернизация существующих технологических процессов, приоритетное развитие новых, востребованных потребителями продуктов и услуг;
- создание гибких производственных линий, которые позволят оперативно реагировать на заказы потребителей, выпускать как небольшие, так и крупные партии продукции;
- развитие собственной сырьевой базы, в том числе за счет использования старых месторождений;
- внедрение энергосберегающих технологий.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

С развитием производства необходимо отказаться от использования устаревших релейных схем включения оборудования и включения каждой единицы оборудования вручную при отсутствии контроля за работой оборудования и диагностики отказов примитивными блокировками только между соседними звеньями в технологической цепочке. Назрела необходимость модернизации существующих схем управления оборудованием и обдуманного выбора концепции управления новым производством.

В эру «до автоматизации» на предприятии автоматизированными были только технологически сложные объекты — прессы ЦСП и грануляторы на производстве пропантов, т. е. объекты, которые были приобретены как единое целое от фирм-разработчиков (в основном фирмы «Laeis» и «Eirich»). Это были локальные системы управления, не связанные друг с другом и другими элементами в технологической цепочке производства.

Современное производство автоматизировано. Автоматизация производства — это процесс в развитии машинного производства, при котором функции управления и контроля, ранее вы-



А. В. Сакулин
E-mail: asakulin@aobko.ru



полнявшиеся человеком, передаются приборам и автоматическим устройствам. Введение автоматизации позволяет значительно повысить производительность труда и качество выпускаемой продукции, сократить долю рабочих, занятых в различных сферах производства.

До внедрения средств автоматизации замещение физического труда происходило посредством механизации основных и вспомогательных операций производственного процесса. Автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП) предназначена для стабилизации заданных режимов технологического процесса путем измерения значений технологических параметров, их обработки, визуального представления и выдачи управляющих воздействий в режиме реального времени на исполнительные механизмы как в автоматическом режиме, так и в результате действий технолога и оператора. Производится анализ состояния технологического процесса с выявлением предаварийных ситуаций и предотвращением аварий путем переключения технологических узлов в безопасное состояние как в автоматическом режиме, так и по инициативе оперативного персонала. Административно-технический персонал комбината обеспечивается необходимой информацией о технологическом процессе для решения задач контроля, учета, анализа, планирования и управления производственной деятельностью.

Радикально ситуация с автоматизацией изменилась в 2005 г., с момента запуска участка ОШГП-2 по производству пропантов. На этом участке автоматизацией был охвачен весь производственный цикл — от помола сырья до упаковки готовой продукции. С этого момента производством стали управлять ОПЕРАТОРЫ (рис. 1) с компьютера — автоматизированного рабочего места (АРМ).

На комбинате реализована интеграция систем АСУ ТП в информационную систему предприятия и в систему управления предприятием. Так, данные по выработке и технологическим параметрам производства передаются в систему АХАРТА. Для контроля производства со стороны руководителей и специалистов отделов предназначена система мониторинга. Она включает табличные отчеты и графики контролируемых параметров технологического процесса, а также наблюдение за производством в режиме реального времени посредством WEB-технологий.

Автоматизация огнеупорного производства проводится поэтапно. Автоматизированы основные переделы получения высокоглиноземистого шамота на брикетном участке ДОУ ЦСП; прием, переработка и передача огнеупорных порошков на участке помола ЦСП. Для точного учета сырья, использованного для изготовления продукции, в ЦСП выполнен ряд работ по введению в эксплуатацию специализированного оборудования, обеспечивающего автоматизированный учет



Рис. 1. АРМ операторов АСУ ТП ОШГП-2

всех поступающих на помольный участок цеха шамотов, а также глин и шамотов на формовочный участок. Дозаторы «Мультидоз» немецкой фирмы «Шенк» (всего их установлено 7 единиц) обеспечивают взвешивание всех проходящих через них сыпучих материалов с точностью до килограмма (рис. 2).

Бункеры порошков молотых шамота и глины помольного участка оснащены новыми питателями (рис. 3) с плавно регулируемой производи-



Рис. 2. Дозаторы «Мультидоз» фирмы «Шенк» на отметке 23 м формовочного участка ЦСП



Рис. 3. Питатели молотой глины с регулируемой подачей порошка на ленту





тельностью. Это позволяет не только обеспечить оптимальную нагрузку на дозаторы фирмы «Шенк» для увеличения точности взвешивания, но и составлять при необходимости смеси шамотов и глин в требуемом соотношении. Дозаторы и питатели являются частью автоматизированной поточно-транспортной системы подачи порошков шамота и глины из помольного участка в формовочный, поэтапный запуск в эксплуатацию которой начался в 2013 г.

При помощи автоматизированной системы один оператор из новой операторной на отметке 23 м (рис. 4) дистанционно управляет участком формовки простым щелчком компьютерной мыши. Кроме того, оператор может видеть, с какой производительностью подает-



Рис. 4. АРМ оператора АСУ ТП на отметке 23 м формовочного участка ЦСП

ся материал, сколько его отгрузили, уровень материала в 28 бункерах. Информация передается также на АРМ формовочного участка. В перспективе — полная автоматизация работы смесительного и прессового оборудования, запуск первой роботизированной линии садки изделий на печные вагонетки, реконструкция туннельных печей ЦСП № 1 и 3 с автоматизацией управления обжигом. Первый опыт уже получен — на туннельной печи № 2 с 2012 г. работает локальная АСУ ТП.

МОДЕРНИЗАЦИЯ

Модернизация направлена на сохранение лидирующих позиций АО БКО в производстве пропантов и огнеупоров. Модернизация затрагивает как отдельные технологические агрегаты, так и технологические линии.

Модернизация трубных мельниц производства пропантов позволила увеличить их производительность в 1,5–2,0 раза при сохранении тонины помола материала, что создало хороший задел для общего увеличения объемов производства пропантов до 300 тыс. т в год. Для увеличения количества выпускаемых пропантов введен в строй участок дополнительного гранулирования с тремя линиями грануляторов «Айрих».

Модернизация технологических смесительных линий приготовления огнеупорной массы для прессования огнеупорных изделий позволяет оперативно реагировать на заказы потребителей, выпускать как небольшие, так и крупные партии продукции с минимизацией затрат времени на переход с одной марки продукции на другую. Модернизация включает: улучшение работы бункерного хозяйства с созданием возможности складирования и хранения небольшого количества разнообразных материалов; установку современных дозирующих устройств; автоматизацию процесса приготовления массы с компьютеризацией ввода рецептуры, последовательности и времени обработки шихты, подачи готовой массы на пресс (рис. 5, 6).



Рис. 5. Пульт управления линией приготовления огнеупорной массы пресса ДАО-242

Разработанные новые алюмосиликатные изделия с повышенным техническим ресурсом необходимо прессовать на гидравлических прессах. В связи с этим имеющийся в ЦСП парк гидравлических прессов (прессы «Лайс-1600», их российские аналоги ДО-542Н, ДАО-242) пополняется двумя прессами «Лайс-1600». Установка этих прессов завершится во втором квартале текущего года. Предусмотрено гибкое подключение этих прессов к линиям подачи массы.

Расширены возможности ЦСП по механической обработке алюмосиликатных огнеупорных изделий в рамках выполнения операций по резке и шлифовке, что позволяет выполнять не только «подгонку» изделий по размерам, но и успешную реализацию различных вариантов стендовой сборки разных конструкций, начиная от послышной сборки днища стекловаренной печи и заканчивая поэлементной сборкой конструкций форкамеры воздухонагревателя Калугина (рис. 7).

Все огнеупорные изделия, выпускаемые в ЦСП, отгружаются в пакетированном виде. Упаковка пакетов с огнеупорными изделиями в пленку производится на упаковочной машине «Lachenmeier» (рис. 8).

В рамках реализации программ импортозамещения с металлургическими предприятиями осво-





Рис. 6. Автоматические весовые дозаторы



Рис. 8. Упаковочная линия «Lachenmeier»



Рис. 7. Стендовая сборка арок воздушного коллектора форкамеры воздухонагревателя Калугина

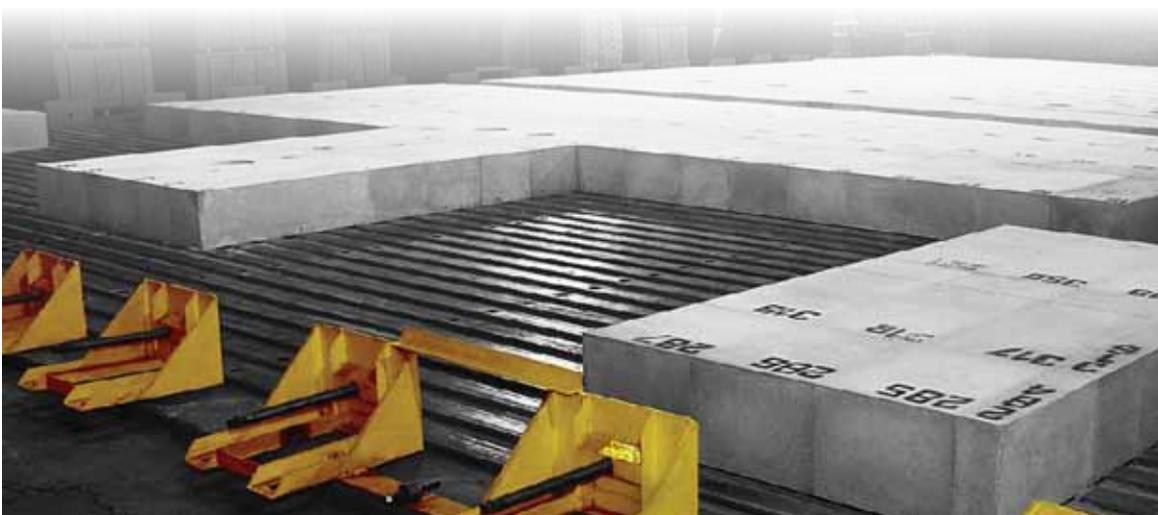
но производство изделий и смесей из низкоцементных огнеупорных бетонов различного назначения, в том числе желобных масс для доменных печей, бетонов для стен и дна сталеразливочных ковшей и др. Для обеспечения выпуска этой продукции перезапущен участок по производству порошков плавящего корунда, включая легированные марки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация производственной стратегии направлена на удовлетворение возросших требований

потребителей к качеству огнеупорной продукции и пропантов. Мы отслеживаем тенденции рынка и, играя на опережение, проводим техническую политику, направленную на выпуск продукции на уровне современных требований, развиваем и внедряем сервисные и дополнительные услуги, позволяющие нашей продукции конкурировать с продукцией лучших мировых производителей. ■

© А. В. Сакулин, 2017 г.





РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО НОВЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОПАНТОВ

К. т. н. **А. П. Маргишвили** (✉), к. т. н. **С. И. Гершкович**, к. т. н. **А. Н. Иксанова**,
И. Г. Белова, к. т. н. **Ф. Р. Иксанов**, к. т. н. **В. В. Скурихин**

АО БКО, г. Боровичи Новгородской обл., Россия

Для устойчивого развития предприятия в условиях жесткой конкуренции на комбинате проводится политика реконструкции и технического перевооружения производства, организации выпуска высокоэффективных огнеупоров и увеличения их доли в общем объеме продукции, диверсификации производства, повышения качества выпускаемой продукции.

Разработкой и внедрением в производство инновационных видов продукции и совершенствованием действующих технологических процессов на комбинате занимаются два подразделения: Центр совершенствования технологий и производства (ЦСТИП) и технологический отдел центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ). Координирует их деятельность технический отдел. Спектр задач, которые приходится решать сотрудникам этих подразделений, широкий и зависит как от тенденций развития металлургической отрасли, на которую ранее в основном было ориентировано огнеупорное производство, так и от переориентации предприятия на расширение рынков сбыта, для чего разрабатываются и осваиваются технологии производства изделий для цветной металлургии, цементной, стекольной и нефтегазодобывающей промышленности.

Результаты профессиональной деятельности ЦСТИП и технологического отдела ЦЗЛ в решении задач исследовательского, производственного и контрольно-производственного направлений легли в основу пятилетней Программы перспективного развития АО БКО на 2016–2021 гг.

Производство алюмосиликатных керамических пропантов для нашего предприятия — одно из базовых направлений диверсификации

производства продукции (рис. 1). В настоящее время физические объемы выпуска пропантов наполовину превышают объемы производства огнеупоров. Торговая марка пропантов BORPROP стала брендовой для российских нефтяников.

Для устойчивого ведения технологического процесса важно стабильное обеспечение сырьевыми материалами. В последние годы наблюдается устойчивая тенденция снижения сортности и изменения химического и минерального составов глинистого сырья основного поставщика. Чтобы не допустить снижения объемов производства и ухудшения качества продукции в ЦСТИП постоянно проводятся работы по поиску способов нейтрализации неблагоприятных факторов, применения альтернативных видов сырья и специальных добавок, ведутся разработки новых технологических приемов при производстве пропантов. В настоящее время интенсивно идет работа по улучшению одной из важнейших характеристик пропанта — снижению насыпной массы, значение которой определяет тип и, соответственно, стоимость жидкости гидроразрыва.



Рис. 1. Смесители-грануляторы «Eirich» в технологической схеме производства пропантов



А. П. Маргишвили
E-mail: amargishvili@aobko.ru



Проведенные работы позволили снизить насыпную массу пропанта с 1,80–1,85 до 1,69–1,71 г/см³, что благоприятно сказывается на снижении себестоимости добычи нефти.

По данным испытаний независимой лаборатории FracTech, основные свойства пропантов марки Vogpro производства АО БКО за последние 5 лет при ежегодном росте объемов производства имели устойчивую тенденцию к улучшению по ряду важнейших показателей, таких как сопротивление раздавливанию, проводимость и проницаемость.

Разработки ЦСТИП в области расширения сырьевой базы производства пропантов совместно с целенаправленной работой всех подразделений комбината по выявлению и вовлечению в производство внутренних резервов повышения производительности оборудования позволили приступить к амбициозному проекту разового увеличения в 2018 г. производства пропантов в Боровичах на треть по сравнению с объемами выпуска в 2017 г.

Диверсификация огнеупорного производства выражается в расширении перечня и марочности выпускаемой продукции и имеет целью более полное удовлетворение требований потребителей. В настоящее время в силу известных причин дополнительной движущей силой диверсификации стало импортозамещение.

Изделия для разливы стали

Объединенная вагонная компания в 2012 г. запустила вагоностроительный завод в Тихвине и по физическому объему выпуска новых полувагонов опередила даже многолетнего лидера отрасли — нижнетагильский Уралвагонзавод. Завод выпускает вагоны и полувагоны нового поколения с повышенной грузоподъемностью за счет большей нагрузки на ось — 250 кН (25 тс) и увеличенным до 800 тыс. км межремонтным пробегом.

В рамках программы замещения импортной огнеупорной продукции для Тихвинского вагоностроительного завода (ТВСЗ) освоено производство изделий марки HShS для разливы стали, ранее поставлявшейся из одной из европейских стран.

По результатам проведенной АО ТВСЗ оценки поставщиков АО «Боровичский комбинат огнеупоров» удостоен наивысшей оценки — «Отличный поставщик».

Высокоглиноземистые изделия для сифонной разливы стали

Повышение эффективности процессов производства и разливы стали сифонным способом на металлургических и литейных предприятиях, производящих сортовые, кузнечные и специальные слитки, зависит от технологии и применяемых огнеупорных материалов. Однородный химический состав, плотная макроструктура конечной продукции, низкая степень загрязне-

ния неметаллическими включениями, газами, вредными примесями, а также необходимые физические свойства — наивысшие показатели качества. Процесс разливы высококачественных марок стали является завершающим и ответственным этапом получения слитков.

Боровичский комбинат огнеупоров успешно освоил производство высокоглиноземистых изделий марок МЛС-67 и МЛПС-67, предназначенных для сифонной разливы металла, в том числе крупносерийной и при производстве дорогостоящих высококачественных сталей. Эти высококачественные изделия изготовлены методом полусухого прессования и обладают преимуществами, положительно влияющими на улучшение качества отливаемых слитков. Изделия изготавливаются с высокой точностью и обеспечивают:

- плотность укладки и стыковки при наборе литниковой системы, в том числе из-за отсутствия мертвеля в узлах сопряжения конструкций;
- повышение ресурса эксплуатации и стойкости в сравнении с шамотной продукцией, в том числе за счет использования бандажированных изделий;
- минимизацию загрязнения разливаемой стали неметаллическими включениями.

В настоящее время разработанная продукция успешно поставляется на многочисленные предприятия (ООО «ОМЗ-Спецсталь», ЗАО «Росметаллкомплект», ОАО «Тяжпрессмаш», АО ВМЗ и др.), составляя конкуренцию аналогичной продукции иностранных поставщиков. При этом непрерывно осуществляется внедрение высокоглиноземистых сифонных изделий на другие рынки. Постоянно увеличивается номенклатура и усложняется ассортимент выпускаемой продукции в соответствии с требованиями заказчиков.

Муллитокорундовые пробки

На комбинате освоено производство высокоглиноземистых (муллитокорундовых) стопорных пробок с массовой долей Al₂O₃ свыше 72 % (марка МКСП-72) полусухим способом формования (рис. 2).

Опытные партии изделий различного формата прошли положительную апробацию в про-



Рис. 2. Муллитокорундовые пробки





изводственных условиях ООО «ОМЗ-Спецсталь» и ПАО НЛМК. В ООО «ОМЗ-Спецсталь» с применением экспериментальной продукции отлиты крупнотоннажные слитки без замечаний по эксплуатации пробок.

Инновационные алюмосиликатные изделия

В огнеупорную продукцию реализованы преимущества технического оснащения комбината и технологического сопровождения производства. Инновационные алюмосиликатные изделия (рис. 3, табл. 1–3) получили новые названия, не



Рис. 3. Инновационные алюмосиликатные изделия

связанные с их назначением при использовании, так как они могут применяться в футеровках различных тепловых агрегатов. Выпускаются изделия серий:

- ALBOR — шамотные изделия различного состава;
- HALBOR — муллитокремнеземистые изделия;
- BOREX — муллитовые и муллитокорундовые изделия.

Примеры использования инновационных алюмосиликатных изделий:

- ALBORN, ALBOR 500, HALBOR 400, HALBORAR для футеровки различных зон вращающихся печей производства портландцемента;
- ALBOR 350, ALBOR 500, HALBOR 600, BOREX-65 ALS, BOREX-72 и BOREX-72-21 для футеровки стен воздухонагревателей доменных печей и как насадочные;
- ALBOR 350, ALBOR 500, BOREX-62 ALS, BOREX-65ALS, BOREX-69ALS для кладки стен регенераторов стекловаренных печей и как насадочные;
- HALBOR 50 AF и HALBOR 60 AF для арматурной футеровки сталеразливочных ковшей, заменяя муллитокорундовые изделия МКБ-75 из китайского боксита;
- HALBOR-45 ALS для футеровки вращающейся печи прокалики кокса заводов «РУСАЛ».

Таблица 1. Физико-химические свойства инновационных алюмосиликатных изделий серии ALBOR

Показатели	ALBOR 280	ALBOR 320	ALBOR 340	ALBOR 350	ALBOR 390	ALBORN	ALBOR 400	ALBOR 500
Массовая доля, %:								
Al ₂ O ₃ , не менее	30	30	33	37	35	37	37	42
Fe ₂ O ₃ , не более	–	–	–	–	–	–	–	1,7
Открытая пористость, %	32	24	21	22	19	20	18	14–20
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	10	20	25	20	30	35	35	40
Огнеупорность, °С, не ниже	1650	1690	1730	1730	1710	1730	1730	1750
Остаточные изменения размеров, %, при нагреве при температуре, °С, не более:								
1450	–	–	–	–	–	–	–	0,4
1400	–	–	–	–	0,3	0,3	0,3	–
1350	–	–	–	0,2	–	–	–	–
1300	–	–	–	–	–	–	–	–
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1280	1320	1340	1350	1390	1400	1400	1500
Термостойкость, теплосмены, не менее	–	–	–	4	4	4	4	6

Таблица 2. Физико-химические свойства инновационных алюмосиликатных изделий серии HALBOR

Показатели	HALBOR 400	HALBOR AR	HALBOR 50 AF	HALBOR 60 AF	HALBOR 600	HALBOR -45 ALS	HALBOR -46 ALS
Массовая доля, %:							
Al ₂ O ₃ , не менее	45	45	50	60	52	45	46
Fe ₂ O ₃ , не более	–	1,5	–	3	1,5	1,5	1,5
SiC	–	5–10	–	–	–	–	–
Открытая пористость, %	16	17	18	19	22	17	17
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	45	50	40	45	40	35	50
Огнеупорность, °С, не ниже	1750	–	1750	1770	1750	–	–
Остаточные изменения размеров, %, при нагреве при 1400 °С, не более	0,2	–	1,0	0,4–1,0	–	–	–
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1400	1430	1420	1440	1600	1400	1490
Термостойкость, теплосмены, не менее	5	5	5	6	50	25	–





Таблица 3. Физико-химические свойства инновационных алюмосиликатных изделий серии BOREX

Показатели	BOREX-62	BOREX-65	BOREX-62 ALS	BOREX-65 ALS	BOREX-69 ALS	BOREX-72	BOREX-72-21	BOREX-75
Массовая доля, %:								
Al ₂ O ₃ , не менее	62	64	62	65	69	72	72	75
Fe ₂ O ₃ , не более	1,5	2,5	1,1	1,0	1,0	1,2	1,2	2,2
Открытая пористость, %, не более	24	22	17	17	19	24	21	23
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	25	30	50	50	50	30	50	40
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1450	1500	1600	1650	1650	1550	1550	1450
Остаточные изменения размеров, %, при нагреве при температуре, °С, не более:								
1500	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	–	–	–
1600	–	–	–	–	–	0,8	0,8	2,0
Термостойкость, теплосмены, не менее	–	–	25	20	30	4	4	3

Разработка огнеупорных изделий для кладки печей обжига анодов

Известно, что ОК «РУСАЛ» обеспечивает собственным производством только 30 % обожженных анодов от общей потребности. С учетом того, что потребность в обожженных анодах будет возрастать, компания намерена наращивать собственное производство для полного обеспечения своей потребности в обозримой перспективе.

При выполнении разработок огнеупорных алюмосиликатных изделий для кладки печей обжига анодов последовательно решались две задачи:

- первоочередная — предложение о замене ранее применявшихся для ремонта анодных печей Саяногорского алюминиевого завода изделий МЛС-62 производства КНР на отечественные (импортозамещение),
- перспективная — предложение отечественных изделий для строительства новых анодных печей по проектам ведущих европейских специализированных проектных организаций, требования которых к огнеупорам существенно более высокие, чем к применяемым в России и других странах СНГ.

Изделия BorABF были предложены в качестве решения первоочередной задачи для ОК «РУСАЛ». Это плотные изделия муллитокремнеземистого состава (рис. 4). Физико-химические свойства изделий BorABF: массовая доля Al₂O₃ не менее 50 %, Fe₂O₃ не более 1,7 %, открытая пористость не более 15 %, предел прочности при сжатии не менее 50 МПа, температура начала размягчения не ниже 1450 °С, остаточные изменения размеров при 1400 °С не более 0,4 %, термическая стойкость (1300 °С – вода) не менее 4 теплосмен.

Благодаря взаимодействию с сырьевым подразделением ОК «РУСАЛ» для производства разработанных изделий был применен гаианский боксит, что обеспечило снижение себестоимости и цены на предлагаемые изделия до требуемого уровня. Выпуск и испытание в службе опытной партии изделий проводили в 2014 г. Мониторинг службы изделий осуществляло ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Плотная структура изделий способствовала снижению скорости проникновения корроди-



Рис. 4. Кладка простенка анодной печи изделиями BorABF

ентов к внутренней поверхности изделий, что обеспечило повышенную стойкость [1]. После 6 мес эксплуатации опытных простенков было принято решение о полной замене китайских изделий на изделия АО БКО. С 2015 г. комбинат стал основным поставщиком огнеупорных изделий для АО «Саяногорский алюминиевый завод». *Андалузитовые изделия* не один десяток лет применяются для строительства и ремонта печей обжига анодов за рубежом. Благодаря уникальным свойствам андалузита изделия, изготавливаемые с его применением, отличаются высокой устойчивостью к неблагоприятным факторам, воздействующим на футеровку: высокой механической нагрузке за счет большого размера основных элементов конструкции печи — обогреваемых простенков, повышенной температуре в камере обжига (около 1300 °С), циклическим термическим нагрузкам в сочетании с перепадом температур по толщине простенка, воздействию восстановительной среды (углеродная засыпка и продукты ее окисления) и натрий-фторидных испарений от криолита, содержащегося в анодных огарках, входящих в состав анодной массы в количестве от 5 до 20 % [2]. Требования к огнеупорным изделиям устанавливают специализированные инженеринговые компании (СИК) по проектированию и строительству печей для обжига анодов алюминиевых электролизеров; требования к изделиям приведены в табл. 4. Там же приведе-





Таблица 4. Физико-химические свойства андалузитовых изделий для анодных печей

Показатели	Марка изделия и место применения в печи					
	BOREX-62 ALS, торцевые стены		HALBOR-46 ALS, греющие простенки		ALBOR 500, под камер обжига	
	требования СИК	показатели изделий АО БКО	требования СИК	показатели изделий АО БКО	требования СИК	показатели изделий АО БКО
Температура начала деформации под нагрузкой $T_{0,5}$, °C (ISO 1893)	≥1600	1660	≥1480	1555	≥1420	1461
Кажущаяся плотность, г/см ³	≥2,45	2,65	≥2,30	2,35	≥2,25	2,32
Открытая пористость, %	≤17,0	14,9	≤17,0	17,0	≤16,0	15,4
Предел прочности при сжатии, МПа	≥50	106,7	≥45	75,1	≥50	54,7
Термостойкость, теплосмены (DIN 51068)	≥25	>30	≥15	23	-	20
Термическое расширение в интервале 20 °C – 1000 °C	≤0,7	0,50	≤0,7	0,56	≤0,7	0,67
Ползучесть при сжатии при 1280 °C (0,2 МПа, 0–25 ч), деформация Z_{25} , %	≤0,3	0,08	≤0,3	0,05	-	-
Скорость деформации V_{15-25} , % в час	≤0,005	0,003	≤0,005	0,0002	-	-
Химический анализ, %:						
Al ₂ O ₃	≥55	65,73	≥46	52,89	≥42	48,58
Fe ₂ O ₃	≤1,0	0,71	≤1,5	0,86	≤2,0	1,12
CaO + MgO	≤0,6	0,12	≤0,6	0,42	-	0,36
Na ₂ O + K ₂ O	≤0,6	0,37	≤0,6	0,60	-	0,64
Предел прочности при изгибе при 1300 °C, МПа	≥6,0	При 1350 °C 6,7	≥6,0	7,52	-	-

ны результаты сертификационных испытаний изделий АО БКО в независимых лабораториях ICAR (Франция) и DIFK (Германия).

Положительные результаты сертификационных испытаний вместе с положительным заключением аудиторской проверки специалистов инжиниринговой компании позволяют получить сертификат и квалификацию одобренного поставщика. АО БКО выполнило необходимые условия, что дает возможность поставок продукции по проектам СИК не только в России, но и за рубежом.

Разработки в области огнеупорных бетонов

Современные тенденции развития экономики предполагают радикальное снижение энергетических и тепловых потерь, материалоемкости продукции, рациональное и эффективное использование всех видов ресурсов. В производстве и применении огнеупоров эта задача в значительной мере решается за счет применения неформованных огнеупорных материалов [3]. Это связано с тем обстоятельством, что неформованные огнеупоры превосходят формованные по таким показателям, как затраты на производство, эффективность укладки, долговечность, безопасность, расход материалов и др. Доля неформованных огнеупоров в общем объеме производимых огнеупоров возрастает.

АО «Боровичский комбинат огнеупоров», являясь одним из крупнейших производителей огнеупорной продукции России, следуя этим тенденциям, наращивает производство неформованных огнеупорных материалов. Наиболее востребованными среди неформованных огнеупоров, разработанных и выпускаемых АО БКО, являются огнеупорные бетоны, применяемые:

- в черной металлургии для футеровки агрегатов доменного (желоба доменной печи) и сталелитейного (дуговая сталеплавильная печь, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш) производств;

- в цветной металлургии для футеровки агрегатов производства вторичного алюминия (плавильная печь, миксер);

- в стекольной промышленности для футеровки стекловаренных печей;

- в цементной промышленности для футеровки циклона и теплообменника, декарбонизатора, загрузочной камеры, колосникового холодильника.

Бетоны для доменного производства

С 2012 г. комбинат приступил к освоению нового направления: разработке и изготовлению карбидкремниевых бетонных смесей для выполнения монолитных футеровок желобов доменных печей. Первой в этой линейке смесей является марка Borcast-75SiC, прошедшая этап от разработки до испытаний в условиях потребителя.

Смесь прошла испытания в доменном цехе ОАО ММК в футеровке качающегося чугунного желоба ванн доменной печи в период февраль – май 2012 г. Стойкость футеровки без промежуточных ремонтов составила 178949 т пропущенного чугуна, удельный расход желобной смеси 0,06 кг/т. На основании акта испытаний смесь Borcast-75SiC была рекомендована к расширенным промышленным испытаниям в футеровке главного горнового желоба ММК.

С целью повышения служебных свойств (термической стойкости, пропускной способности, коррозионной устойчивости) состав смеси Borcast-75SiC был доработан и предложен к





дальнейшим испытаниям в главном желобе доменной печи. Усовершенствованному составу присвоена марка Borcast-SiC3 (см. табл. 5).

Смесь проходила испытания в главном горновом желобе № 1 доменной печи № 10 в период с августа 2012 по январь 2013 г. На основании результатов ее опытно-промышленных испытаний установлено, что смесь обеспечивает удовлетворительную стойкость в качестве монолитной футеровки главного желоба, при этом удельный расход ее опытного состава превышает нормативный показатель (0,26 кг/т).

Поэтому исследования по доработке состава в 2013 г. были продолжены. Исходя из опыта российских компаний, активно и успешно предлагающих огнеупорные бетоны для монолитной футеровки желобов доменных печей, а также из-за различий в механизме износа зон шлака и металла нами предложен комбинированный метод футеровки (по зонам) главного желоба доменной печи (рис. 5).

Анализируя результаты предыдущих испытаний смесей в условиях потребителя, нами разработаны следующие марки смесей: Borcast-SiC3 для футеровки зоны шлака и Borcast-SiC3 72-16 для футеровки зоны чугуна (табл. 6). В период с января 2014 по июль 2014 г. прошли испытания смесей в горновом желобе № 1 доменной печи № 4 Магнитогорского металлургического комбината (ММК). Промышленные испытания показали удовлетворительные результаты: гарантированная стойкость достигнута, снижено количество промежуточных ремонтов с 2 до 1, удельный расход снижен с 0,297 до 0,268 кг/т.

Тщательно проанализировав механизм износа бетона в главном желобе ММК, провели усовершенствование состава смеси с целью увеличения гарантированной стойкости футеровки не менее 300 тыс. т пропущенного чугуна.

В условиях ЦСТиП разработаны составы желобных смесей с новой пофракционной композицией карбида кремния в сочетании с реактивными глиноземами, высокоглиноземистыми цементами ($Al_2O_3 > 70\%$) и диспергирующими добавками, которые позволили обеспечить улучшенные реологические свойства, снизить водопотребность смесей и как результат повысить прочность бетона. Подбор типа и крупности зерна синтетического заполнителя позволил повысить коррозионную устойчивость образцов и их термостойкость.

В период с декабря 2014 по июль 2015 г. прошли испытания оптимизированных смесей в горновом желобе № 2 доменной печи № 9 ММК. В табл. 7 и на диаграмме рис. 6 представлены стойкость футеровок главного желоба ММК из смесей АО БКО и удельный расход смесей за весь период разработок и испытаний

Межремонтная стойкость футеровки, выполненной смесями производства АО БКО, составила 431,672 т чугуна при гарантированной стойкости 300 тыс. т с 1 промежуточной под-

Таблица 5. Физико-химические свойства бетонов Borcast-75SiC и Borcast-SiC3

Показатели	Норма для марки	
	Borcast-75SiC	Borcast-SiC3
Массовая доля, %:		
Al ₂ O ₃ , не менее	75	55
SiC, не менее	8	25
CaO, не более	2	1,5
Предел прочности при сжатии после термообработки (1300 °С), МПа, не менее	70	70
Кажущаяся плотность после термообработки (1300 °С), г/см ³ , не менее	3,0	2,80
Массовая доля влаги при отгрузке, %, не более	0,7	0,7
Зерновой состав, %:		
остаток на сетке № 7, не более	10	10
проход через сетку № 0063, не менее	30	25

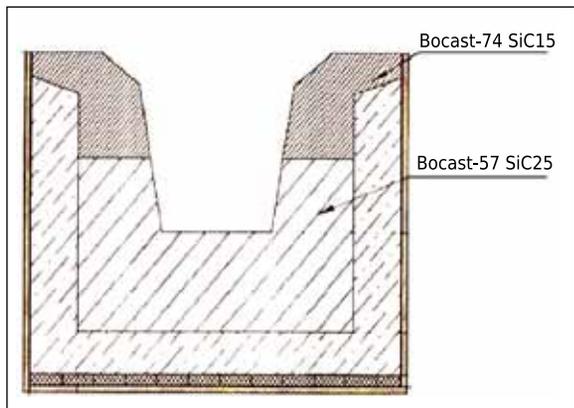


Рис. 5. Схема комбинированной футеровки главного желоба доменной печи

Таблица 6. Физико-химические свойства бетонов Borcast-SiC3 для зоны шлака и Borcast-SiC3 72-16 для зоны чугуна

Показатели	Норма для марки	
	Borcast-SiC3	Borcast-SiC3 72-16
Массовая доля, %:		
Al ₂ O ₃ , не менее	55	72
SiC, не менее	25	16
CaO, не более	1,5	1,5
Предел прочности при сжатии после термообработки (1000 °С), МПа, не менее	30	30
Кажущаяся плотность после термообработки (1000 °С), г/см ³ , не менее	2,80	2,80
Массовая доля влаги при отгрузке, %, не более	0,7	
Зерновой состав, %:		
остаток на сетке № 7, не более	10	
проход через сетку № 0063, не менее	25	





Таблица 7. Результаты службы футеровок главного желоба № 2 доменной печи № 9 ММК из огнеупорных бетонов АО БКО

Футеровка из смесей	Гарантированная стойкость, тыс. т чугуна	Фактическая стойкость, тыс. т чугуна	Количество промежуточных подливок	Количество горячих ремонтов	Удельный расход желобной смеси, кг/т
АО БКО	240	301,361	2	1	0,297
	240	269,116	1	1	0,268
	300	431,672	1	3	0,206

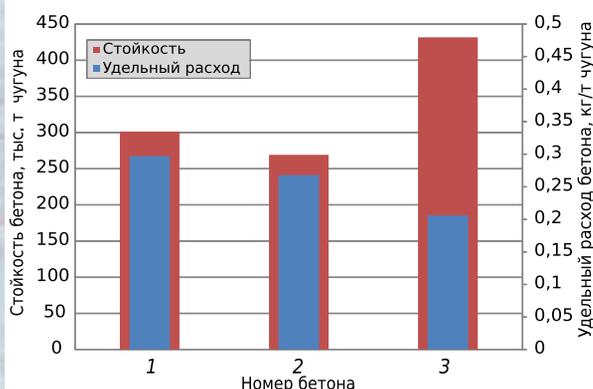


Рис. 6. Стойкость футеровок и удельный расход огнеупорного бетона главного желоба № 2 доменной печи № 9 ММК: 1 — бетон Borcast-SiC3; 2 — бетоны Borcast-SiC3 для зоны шлака и Borcast-SiC3 72-16 для зоны чугуна; 3 — оптимизированные составы смесей Borcast-SiC3 для зоны шлака и Borcast-SiC3 72-16 для зоны чугуна

Таблица 8. Физико-химические свойства бетонов Borcast-74 SiC15 и Borcast 57 SiC25

Показатели	Норма для марки	
	Borcast-74 SiC15 (зона чугуна)	Borcast-57 SiC25 (зона шлака)
Массовая доля, %:		
Al ₂ O ₃ , не менее	74	57
CaO, не более	1,5	1,5
SiC, не менее	15	25
Предел прочности при сжатии после обжига (1000 °С), МПа, не менее	30	
Кажущаяся плотность после обжига (1000 °С), г/см ³ , не менее	2,70	2,65
Массовая доля влаги при отгрузке, %, не более	0,7	
Зерновой состав, %:		
остаток на сетке № 10, не более	10	
проход через сетку № 0063, не менее	25	

ливкой и 3 горячими ремонтами набивной массой. Удельный расход желобной смеси составил 0,206 кг/т, что ниже нормативного значения 0,26 кг/т и находится на уровне расхода при серийном применении смесей.

На основании результатов испытаний и оценки экономической эффективности применения в условиях ПАО ММК смеси марки Borcast-

SiC3 для зоны шлака и Borcast-SiC3 72-16 для зоны чугуна рекомендованы к серийному применению для футеровки горновых желобов доменных печей.

В настоящее время оптимизированным составам смесей присвоены марки Borcast-74 SiC15 для зоны чугуна и Borcast-57 SiC25 для зоны шлака.

В связи с постоянно совершенствующимся процессом выплавки чугуна в ЦСТИП проводятся исследования по оптимизации вещественного состава шихты смесей для футеровки главных желобов доменного производства с целью получения универсальной смеси без разделения на зоны.

Результаты работ в области бетонов для доменного производства потребовали восстановления в АО БКО собственного участка плавки огнеупорных материалов с применением новых технологий производства.

Бетоны для сталеплавильного производства

Специалистами АО БКО разработан ряд бетонных смесей серии Borcast для рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей и арматурного слоя промежуточных ковшей, отличающихся содержанием оксида алюминия (от 70 до 96 %) и способом укладки (саморастекание и вибрирование).

Бетоны характеризуются длительным временем «живучести», низким количеством воды затворения, небольшой усадкой и высокой прочностью как после сушки, так и после обжига при 1300 °С, высокими термомеханическими свойствами.

В период 2011–2012 гг. специалистами научного центра разработана и внедрена бетонная смесь глиноземамагнезиального состава марки Borcast-96WTA для изготовления монолитной футеровки дна сталеразливочного ковша, гнездовых блоков сталеразливочного узла, элементов свода крышки дуговых сталеплавильных печей.

Опытно-промышленные испытания смеси глиноземамагнезиального состава на различных металлургических предприятиях позволили получить межремонтную стойкость бетонной футеровки 50 плавов.

В условиях жесткой конкуренции среди поставщиков бетонных смесей исследования по совершенствованию состава были продолжены. Растущие требования к качеству и стойкости бетона в период 2012–2014 гг. инициировали





Таблица 9. Физико-химические свойства бетонных смесей семейства Borcast для сталеплавильного производства

Показатели	Borcast-96 WTA (корундошпинельная виброукладываемая)	Borcast-80 S (муллитовая саморастекающаяся)	Borcast-70 ST (муллитовая саморастекающаяся термостойкая)	Borcast-70 WT (муллитовая виброукладываемая термостойкая)
Массовая доля, %:				
Al ₂ O ₃ + MgO, %, не менее	96	–	–	–
Al ₂ O ₃ , %, не менее	–	80	70	70
Fe ₂ O ₃ , не более	1,0	1,2	1,1	1,1
SiO ₂ не более	1,0	–	–	–
CaO	1–2	1–2	1–2	1–2
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее:				
после сушки при 110 °С	50	–	–	–
после обжига при 1300 °С	80	60	45	40
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее, после обжига при 1300 °С	2,90	2,70	2,65	2,55
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены	–	–	30	30
Зерновой состав, %:				
остаток на сетке № 7, не более	10	10	10	10
проход через сетку № 0063, не менее	20	30	30	30

разработку нового вида продукции глиноземшпинельного состава для монолитной футеровки дна сталеразливочного ковша с гарантированной стойкостью не менее 100 плавов за одну кампанию.

В результате проведенных исследований разработан новый состав с использованием нового типа связующего, которому присвоена марка Borcast-96 WTP.

Физико-химические свойства бетона Borcast-96 WTP представлены ниже:

Массовая доля, %:	
Al ₂ O ₃ + MgO, не менее.....	96
CaO, не более.....	2,0
Fe ₂ O ₃ , не более.....	1,0
SiO ₂ , не более.....	1,0
Предел прочности при сжатии после обжига при 1500 °С, МПа, не менее.....	100
Кажущаяся плотность после обжига при 1500 °С, г/см ³ , не более.....	3,10
Остаточные изменения размеров при нагреве, %, при 1500 °С, не более.....	0,8
Массовая доля влаги при отгрузке, %, не более.....	0,7
Зерновой состав, %:	
остаток на сетке № 6, не более.....	10
проход через сетку № 0063, не менее.....	20

Введение нового типа связующего обеспечивает высокую коррозионную стойкость. Равномерное распределение компонентов за счет сбалансированного зернового состава позволяет повысить плотность упаковки и предел прочности при сжатии после высокотемпературного обжига, при этом снижается общий объем пор.

Необходимо, однако, отметить увеличение практически в 2 раза газопроницаемости бетона BORCAST-96 WTP относительно этого показателя бетона BORCAST-96 WTA, что благоприятно влияет на сушку бетонной футеровки в услови-

ях потребителя (газопроницаемость определяется в АО БКО на приборе ПСХ 12SP).

В ходе опытно-промышленных испытаний смеси Borcast-96 WTP (2014–2016 гг.) подробно изучен процесс сушки бетонных футеровок различных тепловых агрегатов предприятий с целью его интенсификации. Для обеспечения безаварийной сушки в состав бетона вводится органическое волокно.

Добавка является эффективным средством для увеличения проницаемости бетона и трещиностойкости конструкций за счет создания в его структуре связанной многоканальной системы пор. Для получения такой системы пор используются волокна с определенными техническими параметрами, влияющими на начало и скорость термоокислительной деструкции.

Для повышения строительной прочности и термостойкости по запросу потребителя бетон может быть армирован стальной фиброй как из обычной, так и из низкоуглеродистой стали.

Опыт использования разработанной бетонной смеси марки Borcast-96 WTP в условиях металлургических предприятий позволил обеспечить сушку и разогрев футеровки без взрывного растрескивания, при этом межремонтная стойкость бетонной футеровки сталеразливочного ковша в условиях конвертерного производства ПАО «Северсталь» достигла 101 плавки. Схема футеровки представлена на рис. 7.

С использованием научно-исследовательского потенциала и высокоточного измерительного оборудования ЦСТИП успешно решаются задачи по оптимизации состава низкоцементных бетонов для выполнения монолитных футеровок, адаптированных к условиям эксплуатации у потребителей.



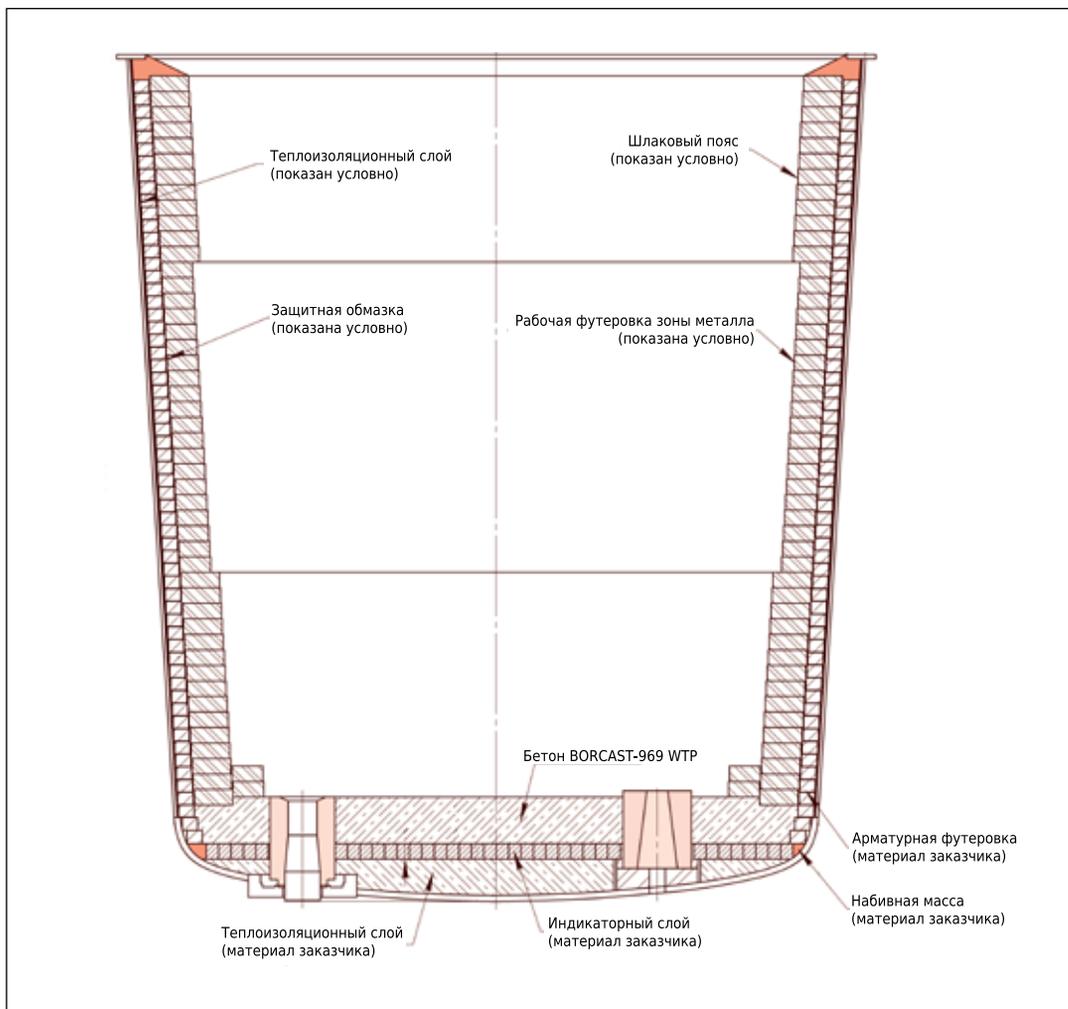


Рис. 7. Схема футеровки сталеразливочного ковша с дном из бетона BORCAST-96 WTP

Заключение

Несмотря на солидный возраст, акционерное общество «Боровичский комбинат огнеупоров» динамично развивается и уверенно смотрит в будущее. Расширяя спектр своей деятельности, разрабатывает и производит новые виды продукции, по своим техническим и ресурсным характеристикам превосходящие отечественные и зарубежные аналоги.

Только при постоянном движении вперед, поиске комплексных решений и инноваций повышается конкурентоспособность продукции, выпускаемой на комбинате. Коллектив предприятия с уверенностью смотрит в будущее, ведь реализация новых проектов дает неоценимый опыт и открывает новые перспективы.

Библиографический список

1. **Прошкин, А. В.** BorABF — огнеупорные изделия для кладки печей обжига анодов / А. В. Прошкин [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2016. — № 1/2. — С. 3–14.
2. **Вальц, В.** Применение андалузита в печах обжига анодов / В. Вальц, Х. Паскаль // Аллюминий Сибири-2006 г. : сб. науч. статей / Красноярск : Бона компани, 2006. — С. 289–298.
3. **Пивинский, Ю. Е.** Неформованные огнеупоры : справочное изд. В 2 томах. Т. 1. Кн. 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. — М. : Теплоэнергетик, 2003. — С. 14–20. ■

© А. П. Маргишвили, С. И. Гершкович,
А. Н. Иксанова, И. Г. Белова, Ф. Р. Иксанов,
В. В. Скурихин, 2017 г.





УВЕРЕННО СМОТРИМ В БУДУЩЕЕ

А. Ю. Коржавин, А. В. Витовский, к. т. н. В. А. Мусевич (✉)

ООО «Торговый дом БКО», г. Боровичи Новгородской обл., Россия

АО «Боровичский комбинат огнеупоров» имеет более чем полуторавековой опыт и традиции производства высококачественной огнеупорной продукции. Комбинат — старейшее предприятие отечественной огнеупорной отрасли, в июле этого года отмечающий 160-летний юбилей. В настоящее время это одно из современных крупнейших предприятий по изготовлению огнеупоров с полным производственным циклом. Суммарные производственные мощности комбината составляют более 500 тыс. т огнеупорной продукции и пропантов в год. АО БКО — планомерно и стабильно развивающееся предприятие с богатой научно-технической базой и высококвалифицированными кадрами.

Боровичский комбинат огнеупоров осуществляет свою деятельность по двум направлениям:

- производство и поставка формованной и неформованной огнеупорной продукции;
- производство и поставка алюмосиликатных пропантов.

Основным направлением работы комбината в области качества является стремление поддерживать статус безупречного поставщика огнеупорной продукции и пропантов. Для этого комбинат одним из первых в огнеупорной промышленности в ноябре 1998 г. получил сертификат Госстандарта на соответствие системы качества требованиям ГОСТ Р ИСО 9002–96, затем последовательно проводилась сертификация системы менеджмента качества (СМК) на соответствие ГОСТ Р ИСО 9001–94, ГОСТ Р ИСО 9001–2001, ГОСТ Р ИСО 9001–2008, ГОСТ ISO 9001–2011.

В декабре 2015 г. сертификационный аудит СМК проектирования, производства и поставки огнеупорной продукции АО БКО на соответствие

требованиям международного стандарта ISO 9001 был проведен компанией ЗАО «Бюро Веритас Сертификейшн Русь». Система менеджмента качества производства пропантов сертифицирована на соответствие требованиям международных стандартов API Q1 «Спецификация на программы качества для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности» Американского института нефти.

Огнеупоры производства АО БКО находят свое применение практически во всех отраслях промышленности: черной и цветной металлургии, машиностроении, цементной и известковой промышленности, стекольной, целлюлозно-бумажной, лесной, сахарной промышленности, энергетике и др. Ассортимент продукции насчитывает более 43 наименований и свыше 3500 типоразмеров изделий. География реализации продукции предприятия охватывает не только территорию РФ, но и страны дальнего и ближнего зарубежья. Общее количество предприятий-потребителей составляет более 1100 наименований. Крупнейшими потребителями продукции являются: ПАО «Северсталь», ПАО НЛМК, предприятия группы «Трубная металлургическая компания», ООО «ЕВРАЗ Холдинг» и «Металлоинвест», УК «РУСАЛ», ПАО ММК, «Евроцемент» и многие другие.

В связи с интенсификацией технологий металлургических и других промышленных процессов предъявляются все более высокие требования к используемым в тепловых агрегатах огнеупорным материалам, обеспечивающим снижение удельных затрат и расходов огнеупоров на всех переделах. Цементная, стекольная отрасли промышленности также заинтересованы в повышении рентабельности производств и технико-экономических показателей функционирования предприятий. Это заставляет специалистов комбината постоянно совершенствовать огнеупорную продукцию, используя последние достижения науки и техники. В центре совершенствования технологий и производства (ЦСТП) комбината на передовом оборудо-



В. А. Мусевич

E-mail: vmusevich@aobko.ru





вании ведутся исследования показателей физико-химических и технических свойств огнеупоров, разрабатываются инновационные технологии, которые успешно внедряются в промышленное производство. В дальнейшем для обеспечения необходимой минимальной равномерности разных зон рабочих футеровок тепловых агрегатов проводится оптимизация дизайна кладок в сочетании с выбором огнеупорных изделий (в том числе новых) с усовершенствованными свойствами и подбором необходимых сырьевых ингредиентов для производства огнеупорной продукции. Такие показатели достигаются адаптацией свойств огнеупорных материалов и изделий к существующим жестким условиям эксплуатации.

Совместная планомерная деятельность специалистов комбината и потребителей его продукции по оптимизации огнеупорных материалов и повышению стойкости футеровок узлов и рабочих агрегатов различных производств позволяет реализовывать оптимальные решения для обеспечения требуемого ресурса эксплуатации огнеупорных конструкций в условиях высокой конкуренции на рынке, удовлетворять всем требованиям потребителей и выполнять гарантируемые обязательства. Внедрение новых технологий производства, собственная научно-исследовательская база, расширение состава оборудования, постоянное повышение квалификации сотрудников дают возможность выполнять все требования заказчиков. Глубокий анализ рынка огнеупоров и пропантов России, ближнего и дальнего зарубежья, выявление новых потребностей, исследование и развитие маркетинговых стратегий, поддержание и расширение реализации традиционных шамотных и алюмосиликатных материалов и пропантов, продвижение на рынок инновационных и перспективных продуктов, поиск новых клиентов — все это осуществляется с целью оптимальной загрузки производства с извлечением максимальной прибыли акционерным обществом.

Для укрепления позиций на рынке, получения конкурентного преимущества производство АО БКО в последние годы переориентировано на увеличение выпуска огнеупорных изделий сложного и особо сложного ассортимента, новых и внедряемых перспективных видов продукции. Активно проводится политика импортозамещения огнеупорными материалами собственного производства. Разработана и реализуется масштабная программа по внедрению на предприятиях клиентов передовых инновационных огнеупорных продуктов, которые в полной мере могут конкурировать с импортными аналогами и превосходить их по качеству и ресурсу эксплуатации в футеровках различных тепловых агрегатов. Проводимая работа

приносит положительные результаты: повысилась эффективность экономических показателей не только предприятий клиентов, но и собственного производства. Поставленная стратегическая цель — взаимодействие с потребителями позволяет не только сохранить взаимовыгодные отношения при удовлетворении их потребности в поставляемых материалах высокого качества, но и расширить ассортимент, номенклатуру и объемы поставок.

Внедрение новых видов огнеупорной продукции, инновационных высококачественных материалов достигается путем поэтапной замены традиционных рядовых шамотных и алюмосиликатных огнеупоров по нормативным документам. Техническими специалистами комбината разработана линейка перспективных огнеупорных материалов, обладающих повышенными физико-химическими характеристиками и увеличенным ресурсом эксплуатации, максимально адаптированных к условиям эксплуатации в конкретном тепловом агрегате. Несколько примеров реализованных и внедренных проектов:

1. Разработка и внедрение передовых изделий марок HRK-150 и DRK для кладки воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья доменных печей, освоение выпуска 65-канальной насадки марок ШВ-37 и ШВ-42. Успешная реализация масштабных комплексных проектов на поставку этих огнеупорных материалов для ремонта и реконструкции воздухонагревателей доменных печей ПАО «Северсталь» (2 проекта), ПАО ММК, фирмы «Třinec Zelezárny» a.s. (Чехия), текущая реализация проектов для АО ЕВРАЗ НТМК и ПАО НЛМК.

2. Внедрение новых огнеупоров марок ALBOR и HALBOR за счет традиционных серийных для футеровки отдельных зон вращающихся печей для обжига цементного клинкера на многих цементных предприятиях позволило повысить ресурс эксплуатации рабочих футеровок на 10–15 % и достичь ожидаемого положительного экономического эффекта.

3. Внедрение предложенной комплексной футеровки вращающихся печей для обжига извести с использованием передовых высокоглиноземистых и теплоизоляционных огнеупоров. Эффективность реализованных проектов: существенное снижение тепловых потерь, понижение температуры на корпусе печей, общее увеличение ресурса стойкости по зонам кладки, снижение массы огнеупорной футеровки и уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

4. Использование усовершенствованных алюмосиликатных изделий линейки КБУ в арматурных футеровках сталеразливочных ковшей металлургических предприятий ПАО «Северсталь», АО ВТЗ, ПАО СТЗ, ПАО ЧМК, АО ЕВРАЗ ЗСМК, ПАО ОЭМК и др. Разработанные изделия максимально





адаптированы к существующим условиям сталеплавильного процесса (повышенная доля плавок с использованием вакуумирования) и предназначены для продления ресурса безаварийной эксплуатации арматурного слоя футеровки за счет улучшенных физико-химических характеристик материала. Теплопроводность предложенных огнеупоров обеспечивает минимальную температуру на броне сталеразливочных ковшей. Изделия предложенной конфигурации (радиальный SU-формат) облегчают процесс кладки арматурного слоя футеровки, минимизируют общее количество швов, формируют «гладкий» слой футеровки, в том числе повышая строительную прочность.

5. Совместный бизнес-проект АО БКО и компании «РУСАЛ» по выпуску товарного высококачественного глиноземистого сырья. Проект является взаимовыгодным, экономически эффективным мероприятием, что позволяет комбинату осуществлять выпуск инновационных муллитовых изделий по собственной технологии из шамота, который обладает уникальными характеристиками: высокой плотностью и низкой пористостью, пониженным содержанием Fe_2O_3 и оптимизированным количеством Al_2O_3 на выходе. Производимые высокоглиноземистые изделия из боксита предназначены для эксплуатации в многокамерных печах открытого типа обжига анодов для получения алюминия в АО «РУСАЛ Саяногорск». Оптимизированные муллитовые изделия обладают показателями физико-химических характеристик, достаточными для обеспечения повышенных сопротивляемости к воздействию агрессивных газовых сред и щелочеустойчивости, что позволяет добиваться максимальной стойкости футеровки. В сравнении с китайскими аналогами разработанная АО БКО продукция эксплуатируется в печах обжига анодов АО «РУСАЛ Саяногорск» эффективней.

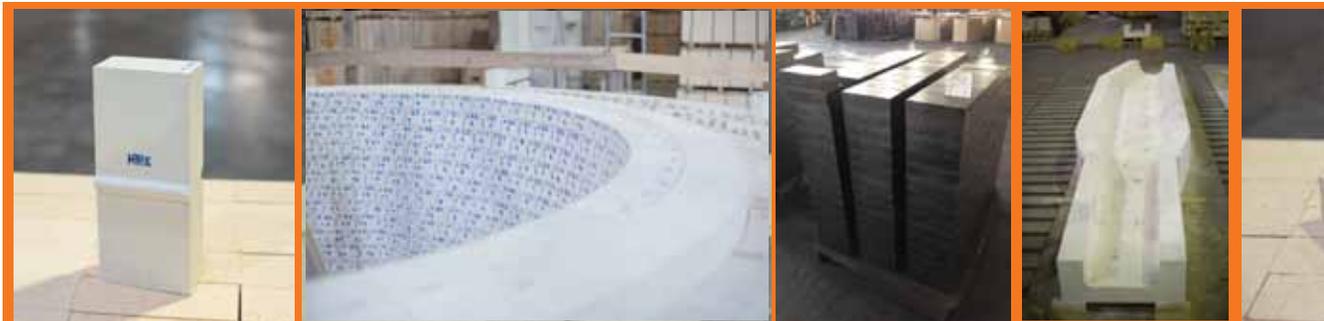
Таким образом, комбинат проводит динамичную работу по расширению объема и спектра поставок новых высокоэффективных огнеупорных материалов, ликвидных и рентабельных продуктов, реализация которых позволяет повысить эффективность экономических показателей работы АО БКО. При этом существенный вклад вносят следующие направления:

- выпуск крупноблочных изделий для днищ стекловаренных печей, по требованию заказчика проводится предварительная стендовая сборка во время приемки продукции;
- производство широкого спектра традиционных шамотных и алюмосиликатных неформованных материалов: глин, каолинов, мертелей, масс, заполнителей;
- выпуск широкой линейки теплоизоляционных огнеупорных материалов.

С 2002 г. АО БКО производит оксидоуглеродистые изделия для футеровки сталеразливочных ковшей, установок внепечной обработки стали типа ковш-печь, конвертеров, дуговых сталеплавильных печей. В силу экономических факторов и необходимости использования высококачественных сырьевых материалов производственная площадка по выпуску данных изделий была перенесена в КНР с последующей организацией совместного предприятия (СП) АО БКО — «Yingkou Jinhongyuan Meilu Ceramics Co.» Ltd. Предприятие мощностью до 100 тыс. т углеродсодержащих изделий и масс было организовано с китайскими акционерами на базе сырьевого карьера магнезита с запасом 25 млн т, завода по плавке высококачественного магнезита. Совместное предприятие обладает современным высокотехнологичным смесительным и прессовым оборудованием. При этом выпуск огнеупорной продукции на СП осуществляется под постоянным и пристальным контролем технических служб комбината. Производство изделий для футеровки конвертеров и ДСП (в том числе длинномерных) проводится на прессе «Лайс 2500» с применением вакуумирования. Это позволяет выпускать изделия заявленного уровня качества и с набором физико-химических характеристик, необходимых для выполнения гарантийных обязательств по стойкости футеровок металлургических агрегатов. География поставок оксидоуглеродистых огнеупоров производства АО БКО постоянно расширяется, осваиваются новые рынки сбыта как за счет гибкой маркетинговой политики, так и благодаря высокому качеству изделий, которое подтверждается положительными результатами эксплуатации на металлургических предприятиях России. Для обеспечения одинаковой стойкости и равномерного износа всех элементов футеровок проводится оптимизация их дизайна в сочетании с выбором огнеупоров. В результате подбора изделий оптимальных марок для различных зон футеровок, основанного на непрерывном мониторинге эксплуатации агрегатов и реализации зонального принципа построения футеровок, стойкость их рабочих зон удовлетворяет условиям эксплуатации у потребителей.

Важным аспектом увеличения сроков и ресурса безаварийной эксплуатации тепловых агрегатов и общего повышения стойкости футеровок являются комплексные поставки огнеупорных материалов, в том числе вспомогательных и ремонтно-восстановительных. При этом внедряются различные инновационные решения, позволяющие повысить эффективность использования того или иного огнеупорного продукта, нести расширенные обязательства по гарантированной стойкости. Комплексные поставки огнеупорных материалов для различных тепловых агрегатов могут вклю-





чать изделия для рабочего и арматурного слоев футеровки, мертеля для кладки данных изделий, различные виды масс (набивные, пластичные и выравнивающие), изделия для шиберного и сталеразливочного трактов, другие материалы.

В 2017–2018 гг. в АО БКО запланированы расширение и модернизация участка по выпуску сухих бетонных масс и изделий из бетонов, направленные на увеличение производственных мощностей. Тиксотропные изделия и сухие бетонные смеси, предназначенные для эксплуатации в футеровках различных тепловых агрегатов, производятся комбинатом с 1998 г. на основе импортных и отечественных сырьевых ингредиентов. Собственными силами и с привлечением сторонних специалистов проводится работа по совершенствованию технологии изготовления этих огнеупорных продуктов с целью повышения их стойкости и эксплуатационных характеристик. Комбинатом закуплено высокотехнологичное оборудование, которое позволяет определять комплекс служебных характеристик и свойств огнеупоров, с большой долей надежности прогнозировать стойкость изделий в тепловых агрегатах потребителей. Постоянно расширяется перечень контролируемых и нормируемых показателей качества огнеупорной продукции. Огнеупоры нового поколения обладают высокими показателями механической прочности, эрозионной и коррозионной стойкости в условиях эксплуатации в высокотемпературных средах различной химической природы (расплавы, шлаки и др.), износоустойчивости, термостойкости и др. Расширен ассортимент выпускаемых бетонных смесей, предназначенных для эксплуатации в сталеразливочных ковшах (прошла успешная серийная эксплуатация на ПАО «ТатМет», АО ЕВРАЗ ЗСМК, ПАО «Северсталь», АО ОМЗ, ООО «УГМК-Сталь» и др.), неформованных материалов для литейных дворов доменных цехов ПАО ММК, ПАО «Тулachermet», АО ЕВРАЗ ЗСМК. Освоены и постоянно совершенствуются технологии изготовления изделий различной (в том числе сложной) конфигурации из огнеупорных бетонных масс (в том числе крупногабаритных изделий): сводов для дуговых сталеплавильных печей, турбостопов, гнездовых блоков, лотков питателей печей стекловаренного и литейных производств.

Впервые в России в 1998 г. АО БКО было начато производство пропантов, предназначенных для интенсификации добычи в нефтегазовой отрасли. Почти за 20 лет производственные мощности выросли до 300 тыс. т пропантов в год. Сегодня комбинат является крупнейшим производителем в этом сегменте рынка, выпуская алюмосиликатные и магнезиальные пропанты различных видов: осмоленные, легкие, сверхпрочные. Керамические

пропанты торговой марки Borproр поставляются для нужд компаний ПАО НК «Роснефть», ОАО «Сургутнефтегаз», ПАО «Газпром нефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Газпром», НК «РуссНефть», ПАО «Татнефть», ООО «Иркутская нефтяная компания» и др. В 2017 г. запланировано развитие производственных мощностей в Боровичах до 400 тыс. т в год.

В связи с ужесточением конкуренции идет непрерывная работа по освоению новых и перспективных зарубежных рынков для реализации пропантов. Это прежде всего рынки ближнего зарубежья, Индии, стран Южной Америки и др. Высокое качество производимой продукции в 2016 г. подтверждено проведенным Американским институтом нефти аудитом. Несоответствий и нарушений в области СМК в АО БКО не выявлено, по результатам аудита получен сертификат API сроком на 3 года.

Для расширения сфер влияния АО БКО активно принимает участие в специализированных выставках и конференциях. Регулярное участие в таких профильных мероприятиях позволяет более тесно контактировать с потребителями продукции, при непосредственном общении услышать и рассказать о передовых разработках и тенденциях в области производства и реализации огнеупорных материалов. Доклады и статьи, публикуемые специалистами предприятия в профильных и специализированных журналах, способствуют популяризации выпускаемой продукции, поднятию имиджа и престижа, расширению авторитета комбината.

Сегодня АО «Боровичский комбинат огнеупоров» — уникальное динамично развивающееся предприятие полного производственного цикла, крупнейший налогоплательщик и работодатель, надежный и добросовестный деловой партнер. Специалисты комбината внедряют эффективные и новые конструкционные материалы, улучшают качество поставляемых огнеупоров, осуществляют непрерывный мониторинг службы продукции, организуя постоянную «обратную связь» с потребителями продукции, проводят совместную работу по снижению удельных затрат и оптимизации процессов производства на предприятиях клиентов.

160 лет трудной, но интересной работы нескольких поколений огнеупорщиков позволили добиться высоких результатов и принесли комбинату славу одного из самых успешных предприятий огнеупорной отрасли России. На комбинате многочисленная команда единомышленников, которая чувствует свою силу и уверенно смотрит в будущее! ■

© А. Ю. Коржавин, А. В. Витовский,
В. А. Мусевич, 2017 г.



Д. Т. Н. К. Н. Вдовин¹, Василий В. Точилкин¹, В. И. Умнов²,
 д. т. н. Виктор В. Точилкин¹ (✉)

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

² ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия

УДК 621.746.047:669.054.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОГНЕУПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ СТАЛЕРЕЗЛИВОЧНЫЙ КОВШ – ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОВШ МНЛЗ

Рассмотрено огнеупорное оборудование системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Разработаны конструкции элементов устройства для защиты струи металла при разливке стали. Рассмотрены конструкции устройства с применением вставок из пластичных огнеупоров, предотвращающие прохождение воздуха в струю металла при разливке и обеспечивающие рациональные параметры подачи аргона в кольцевую выемку огнеупорной трубы. В результате обеспечивается стабильность процесса разливки и повышение качества разливаемого металла.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, сталеразливочный ковш, промежуточный ковш, поток металла, огнеупорная конструкция, аргон.

Система сталеразливочный ковш – промежуточный ковш является важнейшим технологическим элементом МНЛЗ и при разливке стали в значительной степени определяет стабильность процесса, оказывая большое влияние на повышение качества разливаемого металла [1].

На металлургических предприятиях в последние годы проводят реконструкцию действующих установок или сооружают новые, используя более совершенные разработки в области технологии непрерывной разливки. Неотъемлемой частью реконструкции является разработка и совершенствование устройств и систем для защиты стали от вторичного окисления на участке сталеразливочный ковш – промежуточный ковш (рис. 1) [2–4].

Манипуляторы и устройства для защиты металла от вторичного окисления различаются по принципу действия и видам приводов и служат в конечном итоге одной цели — защите струи металла от окисления [3, 4]. В качестве самой защиты при разливке металла используют жаростойкие неметаллические трубы [2, 5]. В устройствах и манипуляторах используют различные принципы подвода-отвода защитных труб к отверстию в шиберном или ином затворе на сталеразливочном ковше и применяют ряд манипуляторов.

Защита струи, выходящей из сталеразливочного ковша, — действенное решение благодаря простоте, эффективности и гибкости этой подсисте-

мы, которую можно применить на любой МНЛЗ, начиная от слябовой до сортовой для непрерывнолитых заготовок небольших размеров.

Подсистема защитной трубы сталеразливочного ковша (рис. 1, а) представляет собой керамическую трубу, имеющую коническое соединение с удлиненным стаканом шиберного затвора сталеразливочного ковша.

Защитную трубу выполняют из огнеупорных материалов, позволяющих использовать ее повторно после очистки канала кислородом [2]. В

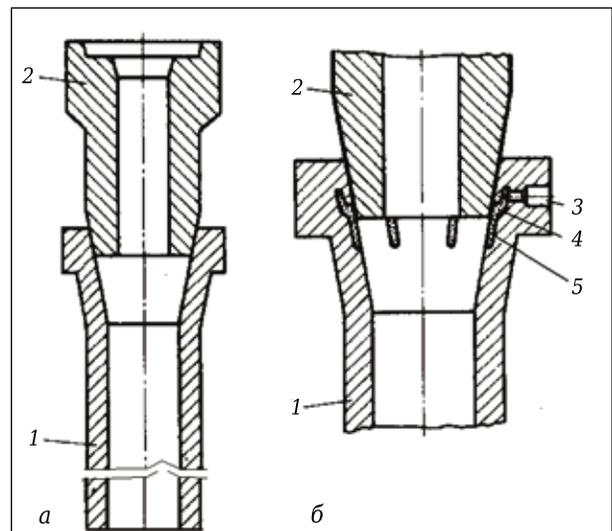


Рис. 1. Установка защитной трубы сталеразливочного ковша: а — без подачи аргона; б — с подачей аргона; 1 — защитная труба; 2 — разливочный стакан; 3 — отверстие для подачи аргона; 4 — уплотнительное устройство; 5 — пазы для подачи аргона

✉
 Виктор В. Точилкин
 E-mail: toch56@mail.ru

процессе разливки стали защитная труба поддерживается захватом манипулятора, закрепленным на тележке промежуточного ковша (ПК) или на металлоконструкциях разливочного участка. К недостаткам таких устройств защиты относится низкое качество разливаемого металла вследствие попадания в него газов, в частности азота [2]. Между внутренней поверхностью огнеупорной трубы и поверхностью стакана шибберного затвора в процессе разливки возникают зазоры. В результате происходит интенсивное насыщение разливаемого металла газами, в частности азотом, что приводит к снижению качества непрерывно литой заготовки.

Подсистема защитной трубы сталеразливочного ковша позволяет реализовать следующие преимущества [2]:

- улучшить качество стали в результате значительного сокращения вторичного окисления металла между сталеразливочным и промежуточным ковшами и подвода металла под уровень в промежуточном ковше, что уменьшает турбулентность металла и облегчает отделение неметаллических включений;

- уменьшить зарастание погружаемого стакана на ПК частицами оксида алюминия, что способствует увеличению времени разливки через ковш до его замены;

- уменьшить образование настывлей в промежуточном ковше и повысить стойкость его футеровки;

- повысить безопасность работы, так как не происходит разбрызгивание металла;

- многократно использовать защитные трубы.

Дальнейшее усовершенствование защитной трубы, которое позволяет получать более чистую

сталь, заключается в создании систем с применением аргона [4–6]. Труба (рис. 1, б) спроектирована с таким расчетом, что аргон вводится в кольцевую полость на ее верхнем фланце и по ряду пазов поступает в струю металла [5, 7]. При этом внутри защитной трубы создают положительное давление, что устраняет опасность подсоса воздуха между стаканом шибберного затвора и защитной трубой, а также способствует отделению неметаллических включений в промежуточном ковше. Кроме того, сокращается опасность подсоса воздуха между плитами скользящего затвора сталеразливочного ковша.

На рис. 2 изображен общий вид разработанного устройства для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ (поперечный разрез) [4, 7]. Устройство содержит огнеупорный стакан 1, с подводящим каналом 2 и наружной конусообразной поверхностью 3, огнеупорную трубу 4. Верхняя часть отверстия трубы 4 выполнена по форме контактирующего с ней участка конусообразной поверхности 3 стакана 1 и содержит кольцеобразную выемку 5 и отверстие 6 для подвода аргона, прокладку 7, расположенную по контактирующему участку стакана 1 и трубы 4. Верхняя часть прокладки 7 имеет верхнюю торцевую поверхность, расположенную по торцевой поверхности огнеупорной трубы 4. Нижняя торцевая поверхность прокладки 7 расположена над кольцеобразной выемкой огнеупорной трубы 4. Верхняя торцевая поверхность прокладки 7 выполнена с наружным диаметром D не менее 1,2 диаметра d отверстия огнеупорной трубы 4 в верхней своей части. Прокладка 7 выполнена из пластичного огнеупорного материала. Такое конструктивное выполнение прокладки 7 обеспечивает надежную фиксацию трубы 4 относительно стакана 1, исключение прохождения воздуха в струю металла и рациональные параметры подачи аргона в кольцевую выемку 5 трубы 4. При этом надежная фиксация трубы 4 исключает возможность ее смещения относительно стакана 1 в течение всего цикла разливки стали из сталеразливочного ковша, что также приводит к повышению качества разливаемого металла.

В процессе установки огнеупорной трубы 4 относительно конусообразной поверхности 3 стакана 1 возможно смещение нижней торцевой поверхности прокладки 7, что приводит к частичному или полному перекрытию кольцеобразной выемки 5 и отверстия 6 для подачи аргона. В результате происходит подсос воздуха в струю металла при разливке. Это приводит к интенсивному насыщению разливаемого металла газами, в частности азотом, и к снижению качества непрерывно-литой заготовки. Выполнение верхней торцевой поверхности прокладки 7 диаметром D не менее 1,2 диаметра d отверстия огнеупорной трубы 4 в верхней своей части позволяет избежать указанных недостатков. При использовании данного устройства на МНЛЗ предварительно на трубу 4 в верхней

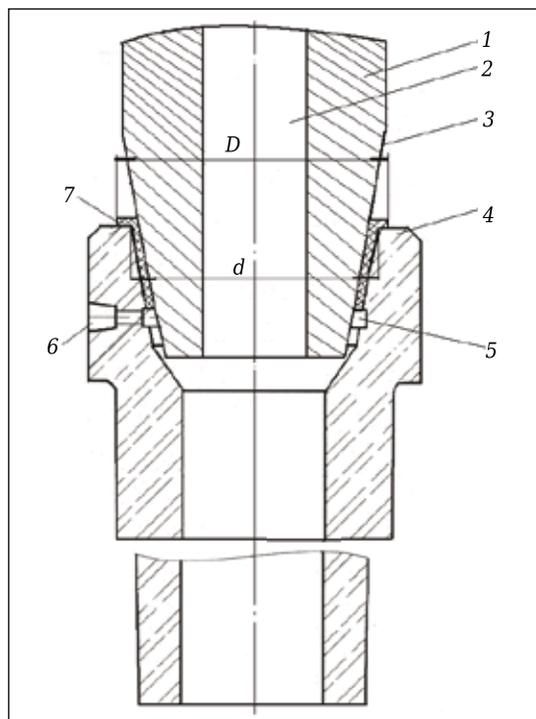


Рис. 2. Устройство для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ

части устанавливают прокладку 7. Используя манипулятор, трубу 4 фиксируют на стакане 1. При этом форма выполнения сопрягаемых поверхностей и соответствие геометрических размеров конструктивных элементов позволяют обеспечить надежную фиксацию трубы 4 в стакане 1. Затем из отверстия 6 подают аргон, а через подводящий канал 2 стакана 1 подают жидкий металл [5].

На рис. 3 представлено модернизированное устройство. Отличительная особенность его — выполнение нижней торцевой поверхности 4 прокладки 2 в виде наклонной конусной поверхности, прилегающей к стакану 1. Рациональное расположение нижней торцевой поверхности 4 прокладки 2 над кольцевой выемкой позволяет обеспечить подачу аргона по всей поверхности трубы в зоне кольцевой выемки и оптимальную отсечку воздуха [8]. Кроме того, надежная фиксация трубы 3 в стакане 1, а также осевая центровка их полостей обеспечивают в процессе разливки формирование струй металла технологически заданной конфигурации без нарушения сплошности, при этом исключаются боковые смещения струй металла в трубе 3 и разрыв ее огнеупорного материала. Это также позволяет повысить качество разливаемого металла за счет исключения попадания в него частиц огнеупорных материалов [9].

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ АРГОНА

При разработке системы подачи аргона [8, 10] для подсистемы защитной трубы при подаче стали в ПК следует обратить внимание на три аспекта, связанных с подачей газа:

- чистоту подаваемого газа аргона;
- стабильность давления газа при продувке;
- минимальный расход газа при получении положительных результатов продувки.

Давление p в системе подачи аргона определяем по зависимости

$$p = p_a + \rho_m g h_m + \rho_{ш} g h_{ш} + \Delta p_l + \Delta p_c + \Delta p_3,$$

где p_a — атмосферное давление; $\rho_m, \rho_{ш}$ — плотности металла и шлака соответственно; $h_m, h_{ш}$ — высота уровней в сталеразливочном ковше металла и шлака соответственно; Δp_l — потери давления по длине трубопровода; Δp_c — потери давления на выходе из сопла; Δp_3 — запас давления; g — ускорение свободного падения.

Задача, связанная с определением течения по трубопроводам аргона и истечения его через сопло в расплавленный металл, имеет некоторые сложности, связанные со сжимаемостью газа и, следовательно, меняющимся давлением и удельным объемом газа по длине трубопровода. Поэтому в газодинамике [11, 12] предпочитают иметь дело при расчетах не с давлением, а с массовым расходом газа. При установившемся процессе в соответствии с уравнением неразрывности потока газа [13, 14] массовый расход

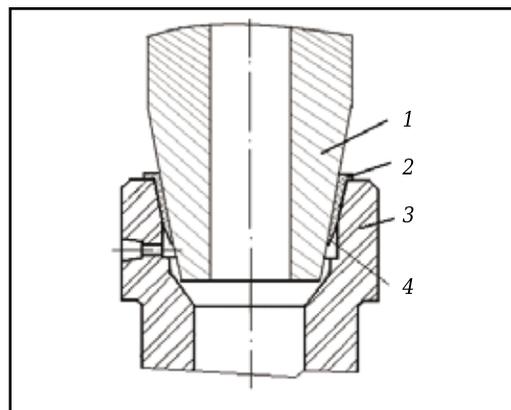


Рис. 3. Модернизированное устройство для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ: 1 — стакан; 2 — прокладка; 3 — защитная труба; 4 — нижняя торцевая поверхность прокладки

аргона G плотностью ρ , протекающего через отверстие площадью f со скоростью u , определяется соотношением:

$$G = f \rho u = \text{const.}$$

Уравнения движения идеального газа при политропном режиме имеет вид [12, 14]:

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + g z_1 = \frac{u_2^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} + g z_2,$$

где u_1, u_2 ; p_1, p_2 и ρ_1, ρ_2 — скорость, давление и плотность газа в сечениях газового потока на входе в трубопровод и на выходе из трубопровода в отверстие подсистемы защитной трубы соответственно; n — показатель политропы; z_1 и z_2 — нивелированные высоты рассматриваемых точек газового потока.

Пренебрегая разностью высот, получим

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2}.$$

Принимая $u_1 = 0$ (т. е. пренебрегаем скоростью газа в расходном резервуаре) и учитывая для идеального газа соотношение $\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$, получим скорость газового потока на входе в отверстие подсистемы защитной трубы

$$u_2 = \sqrt{\frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)}.$$

Массовый расход газа

$$G = f \rho_2 \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)},$$

или, учитывая вышеприведенное соотношение для идеального газа, объемный расход газа

$$Q = f \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot p_1 \rho_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right)}.$$

Для разрабатываемой подсистемы защитной трубы с подачей аргона определены параметры

продувки. Подаваемое давление в аргонопроводе 0,25–0,3 МПа, расход газа при этом должен составлять 0,25–0,4 л/мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что конструкция модернизированного устройства для защиты струи металла при разливке на машине непрерывного литья заготовок исключает прохождение воздуха в струю металла при разливке и обеспечивает рациональные параметры подачи аргона в кольцевую выемку огнеупорной трубы, что позволяет повысить качество разливаемого металла.

Библиографический список

- Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2012. — 540 с.
- Маки, Ж.** Последние достижения в области разливочных огнеупорных систем / Ж. Маки, С. Задковски, Р. Брук // Достижения в области непрерывной разливки стали : тр. междунар. конгресса / пер. с англ. Д. П. Евтеева, И. Н. Колыбанова. — М. : Металлургия, 1987. — С. 77–90.
- Точилкин, В. В.** Электромеханические манипуляторы для транспортирования и ориентации устройств, обеспечивающих защиту струи стали при разливке / В. В. Точилкин, К. Н. Вдовин // Изв. вузов. Электромеханика. — 2004. — № 2. — С. 111, 112.
- Вдовин, К. Н.** Новые вставки из пластичных огнеупоров для защиты струи металла при разливке на МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 41–43.
Vdovin, K. N. New plastic refractory linings for protecting a metal stream during pouring into a CBCM / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, O. A. Marochkin [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 318–320.
- Вдовин, К. Н.** Применение пластичных огнеупоров усовершенствованной конструкции для защиты струи металла при разливке на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, О. А. Марочкин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 3–5.
- Вдовин, К. Н.** Анализ работы системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш сортовой МНЛЗ и совершенствование огнеупорных конструкций приемной камеры промежуточного ковша / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, Виктор В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 5. — С. 3–5.
Vdovin, K. N. Analysis of operation of a steel-pouring ladle-tundish system for a section CBCM and improved refractory structures for the tundish receiving chamber / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, Viktor V. Tochilkin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — T. 57, № 3. — P. 221–223.
- Пат. на полезную модель РФ 102552, МПК В 22 D 41/08.** Устройство для защиты струи металла при разливке на машине непрерывного литья заготовок / Бигеев В. А., Вдовин К. Н., Точилкин В. В. и др. ; заявлено 07.10.10 ; опубл. 30.10.11, Бюл. № 7.
- Вдовин, К. Н.** Разработка систем подачи аргона для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, С. Н. Ушаков, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // Технология металлов. — 2013. — № 6. — С. 38–40.

Разработаны конструкции устройств защиты струи металла для сортовой МНЛЗ. Совместная подача аргона как в стык устройства для защиты струи металла, так и в элементы промежуточного ковша (пороги, перегородки) позволяет решить задачу комплексной подачи аргона в элементы промежуточного ковша [1, 8]. Все это позволяет обеспечить стабильность процесса разливки и повышение качества разливаемого металла.

Разработаны аналитические зависимости по определению параметров подачи аргона для эффективной работы системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш, оснащенной защитной трубой.

- Вдовин, К. Н.** Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Виктор В. Точилкин, Василий В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 3–5.

- Vdovin, K. N.** Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four-strand continuous caster / K. N. Vdovin, Viktor V. Tochilkin, Vasilii V. Tochilkin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 6–8.

- Вдовин, К. Н.** Разработка элементов приемной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Е. А. Мельничук, А. В. Неведов, В. В. Точилкин // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2014. — № 3. — С. 23–27.

- Vdovin, K. N.** Intake chamber of the tundish in a continuous slab-casting machine / K. N. Vdovin, E. A. Melnichuk, A. V. Nefedov, V. V. Tochilkin // Steel in translation. — 2014. — Vol. 44, № 3. — P. 186–189.

- Вдовин, К. Н.** Разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 3–7.

- Vdovin, K. N.** Designing refractories for the tundish of a continuous caster / K. N. Vdovin, V. V. Tochilkin, I. M. Yachikov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — T. 56, № 6. — P. 569–573.

- Точилкин, В. В.** Пневмопривод металлургических манипуляторов : монография / В. В. Точилкин, А. М. Филатов. — Магнитогорск : МГТУ, 2005. — 211 с.

- Вдовин, К. Н.** Создание имитатора рабочей среды для повышения износостойкости огнеупоров при разливке стали на сортовых МНЛЗ / К. Н. Вдовин, О. А. Марочкин, В. В. Точилкин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 10–13.

- Vdovin, K. N.** Creating a stream simulator to improve the wear resistance of refractories during the casting of steel on continuous section casters / K. N. Vdovin, O. A. Marochkin, V. V. Tochilkin // Refractories and industrial ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 435–437.

- Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячиков. — Магнитогорск : Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 348 с. ■

Получено 19.12.16

© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, В. И. Умнов, Виктор В. Точилкин, 2017 г.

К. т. н. **А. А. Бирюкова** (✉), **Т. Д. Джиеналыев**, **Т. А. Тихонова***АО «Институт металлургии и обогащения (ИМиО)», г. Алматы,
Республика Казахстан*

УДК 666.762.1:666.3.022(574)

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПРОПАНТЫ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ КАЗАХСТАНА

Исследована возможность получения керамических пропантов на основе природного алюмосиликатного сырья Казахстана. Показано, что аркалыкские огнеупорные глины и краснооктябрьские бокситы являются высокоосновным алюмосиликатным сырьем с содержанием Al_2O_3 48,3 и 62,0 % (на прокаленное вещество) соответственно. Бокситы характеризуются высоким содержанием примесей железа (22,3 %). Изучено влияние содержания краснооктябрьского боксита и предварительной термообработки сырья на процессы спекания и упрочнения керамических композиций при спекающем обжиге в интервале 1350–1500 °С. Установлено, что оптимальной для получения облегченных керамических пропантов является сырьевая смесь, состоящая из огнеупорной глины с добавкой 20–30 % боксита. Показана эффективность термообработки сырья при 1000 °С для повышения плотности и прочности керамических образцов. Получены для нефтегазодобывающей промышленности облегченные алюмосиликатные пропанты со свойствами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ Р 51761–2013 на алюмосиликатные пропанты.

Ключевые слова: *алюмосиликатный пропант, огнеупорная глина, высокожелезистый боксит, мулитообразование, спекание, предел прочности при сжатии.*

ВВЕДЕНИЕ

Большую часть производимых в мире огнеупорных и керамических изделий составляют алюмосиликатные материалы, сочетающие в себе высокую огнеупорность, коррозионную стойкость и повышенную прочность. Алюмосиликатная керамика применяется во многих отраслях промышленности: в черной и цветной металлургии, в стекольной и цементной отраслях, в строительной индустрии, в машиностроении [1–11].

Нетрадиционное применение алюмосиликатной керамики получила в нефтегазодобывающей промышленности в качестве пропантов [12–14].

При разработке трудноизвлекаемых нефтяных скважин применяют метод гидроразрыва пласта (ГРП), суть которого заключается в искусственном создании новых и расширении имеющихся в пласте трещин. В образованные трещины жидкостями разрыва транспортируется искусственно полученный зернистый материал (пропант), закрепляющий трещины в раскрытом состоянии после снятия избыточного давления. В результате этого значительно повышается нефтеизвлечение за счет приобщения к выработке слабо дренируемых зон и пропластков. С использованием технологии ГРП добиваются увеличения дебита углеводородов в несколько раз, продолжительность эффекта может сохраняться от 2 до 5 лет. Выбор того или иного вида пропантов

зависит от особенностей месторождения, глубины скважины и нефтеносного пласта, от способа осуществления ГРП.

Керамические пропанты обладают термостойкостью и высокой механической прочностью при малом размере зерен (0,2–1,0 мм). Они разнообразны по составу: высокоглиноземистые, алюмосиликатные, магнезиальносилкатные и др. По плотности различают плотные, средней плотности и легкие пропанты. Пропанты могут быть получены практически из любого природного и техногенного сырья [12–20].

Наиболее востребованными в современных условиях являются коррозионно-стойкие облегченные пропанты с высокой прочностью. Применение их не требует использования дорогостоящих жидкостей разрыва пласта с высокой вязкостью, что делает процедуру ГРП экономически выгодной.

Целью данной работы являлось получение керамических пропантов из природного алюмосиликатного сырья Казахстана

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе в качестве алюмосиликатного сырья были использованы огнеупорная глина Аркалыкского и боксит Краснооктябрьского месторождений.

Исследование химического и минерального составов исходных материалов и структурно-фазовых преобразований при термообработке керамических композиций на их основе проводили с привлечением химического, рентгеноструктурного и микроскопического методов анализа.



А. А. Бирюкова
E-mail: biryuk.silikat@mail.ru

Образцы керамики изготавливали с применением приемов, принятых в технологии керамических и огнеупорных материалов.

Определение технических свойств керамики проводили по следующим стандартам: ГОСТ 2409–80 «Материалы и изделия огнеупорные. Метод определения водопоглощения, кажущейся плотности, открытой и общей пористости», ГОСТ 4071–80 «Изделия огнеупорные. Метод определения предела прочности при сжатии», ГОСТ Р 51761–2013 «Пропанты алюмосиликатные».

Микроскопические исследования проб проводили с использованием микроскопов МИН-8 и OLYMPUS в проходящем свете в иммерсионной среде и в полированных шлифах в отраженном свете с помощью программы «StreamBasic R».

Рентгеноструктурный анализ исходного сырья и синтезированных композиций проводили на дифрактометре «D8 Advance» (BRUKER), Cu K α -излучение.

Химический анализ применяемых материалов проведен в специализированной лаборатории по сертифицированным методикам на современном оборудовании. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1.

Химический и минеральный составы алюмосиликатного сырья детально изучены и представлены в работе [20].

Огнеупорная глина по химическому составу относится к высокоосновному сырью с содержанием Al₂O₃ в прокаленном состоянии 48,3 мас. % и средним содержанием красящих оксидов (Al₂O₃ + TiO₂) 4,6 мас. %. По минеральному составу глина представляет собой полиминеральное сырье с преимущественным содержанием каолинита (межплоскостное расстояние *d* равно 0,715, 0,484, 0,357, 0,224) и примесью

гиббсита (*d* равно 0,484, 0,436, 0,238, 0,192). В грубодисперсной части в качестве непластичной примеси фиксируется наличие кварца (*d* равно 0,245, 0,224) и гематита (*d* равно 0,269, 0,251, 0,168).

Бокситы. Краснооктябрьский боксит по химическому составу является высокоосновным сырьем, а по минеральному — гематит-гиббсит-каолинитовой породой. Основной минерал — гиббсит (*d* равно 0,719, 0,484, 0,437, 0,318, 0,205), примеси — каолинит (*d* равно 0,715, 0,484, 0,357, 0,205), гематит (*d* равно 0,367, 0,269, 0,251, 0,184), кварц (*d* равно 0,338, 0,246, 0,188).

Огнеупорную глину в исследованных композициях использовали в качестве основного компонента, боксит добавляли для увеличения количества глинозема, нейтрализующего отрицательное разупрочняющее действие кристобалита, образующегося при полиморфном превращении примесного кварца и кристаллизации аморфного кремнезема, выделяющегося из структуры каолинита. Введение боксита в состав шихты позволяет увеличить содержание муллита в структуре обожженного материала, что должно благоприятно сказаться на упрочнении керамики.

Высокое содержание железистых примесей (см. табл. 1) в данном случае может обуславливать хорошее спекание керамических композиций с их участием и формирование прочных структур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью определения интервала спекания и оптимальной температуры обжига сырья исходные материалы были обожжены при температурах 1200–1500 °С. Состав и свойства обожженного сырья приведены в табл. 2.

Таблица 1. Химический состав исходных материалов, мас. %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	$\Delta m_{\text{прк}}$
Боксит:									
природный	7,6	47,8	17,3	< 0,1	1,14	0,03	0,03	3,5	22,5
прокаленный	9,7	62,0	22,3	0,1	1,4	–	–	4,5	–
Глина огнеупорная:									
природная	37,2	40,4	1,93	< 0,1	0,83	0,32	0,12	2,7	16,40
прокаленная	44,5	48,3	2,3	0,1	0,9	–	–	3,2	–

Таблица 2. Состав и свойства обожженных керамических образцов из боксита и огнеупорной глины

Температура обжига, °С	Линейная усадка, %	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Предел прочности при сжатии, МПа
<i>Краснооктябрьский боксит</i>				
1200	13,9	19,2	2,58	53,1
1300	15,2	12,4	2,67	67,3
1350	18,8	5,4	2,98	145,1
1400	19,1	2,7	3,10	190,5
1450	18,7	0,8	2,89	150,7
<i>Аркалыкская глина</i>				
1200	11,4	15,8	2,43	47,3
1300	14,0	9,2	2,57	51,0
1350	17,2	6,4	2,60	65,3
1400	18,4	5,8	2,65	96,7
1450	18,5	3,6	2,67	120,6
1500	18,8	0,9	2,70	145,0

Наибольшее уплотнение образцов керамики из боксита происходит при температуре обжига 1400 °С. Керамические образцы, обожженные при 1450 °С, имеют стекловидный блеск, являющийся признаком пережога. Образцы претерпевают значительную усадку, обладают низким водопоглощением (0,8 %) и прочностью несколько меньшей, чем у образца, обожженного при 1400 °С (150 МПа). Следовательно, для получения плотной прочной керамики на основе боксита оптимальной температурой обжига является 1400 °С.

Образцы из огнеупорной глины спекаются при более высокой температуре, которая составляет 1450–1500 °С. После обжига при максимальной температуре образцы имеют водопоглощение 0,9 %, предел прочности при сжатии 135 МПа. Керамику на основе аркалыкской глины следует обжигать при 1500 °С.

Согласно требованиям стандарта на алюмосиликатные пропанты сырье должно содержать не менее 50 % Al_2O_3 и не более 8 % Fe_2O_3 . Для определения оптимального состава шихты нами был сделан расчет химического состава исследуемых композиций на основе аркалыкской огнеупорной глины и краснооктябрьского боксита в соотношении от 0 до 100 (табл. 3).

Результаты расчета (см. табл. 3) показывают, что согласно требованиям стандарта для получения алюмосиликатных пропантов пригодны сырьевые смеси (композиции) огнеупорной глины и боксита от АБ10 до АБ30 (см. табл. 3).

Оценку влияния количественного содержания краснооктябрьского боксита на процессы спекания и упрочнения керамической композиции на основе аркалыкской глины проводили путем обжига образцов, полученных из полусухих порошков методом прессования на гидравлическом прессе под давлением 15 МПа, в температурном интервале 1350–1450 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч. Результаты экспериментов представлены в табл. 4 и на рис. 1.

Экспериментальные данные показывают, что оптимальными для получения облегченных пропантов на основе алюмосиликатного сырья Казахстана являются композиции на основе огнеупорной глины с добавкой 20–30 % высокожелезистого боксита (см. табл. 4). Температура спекающего обжига образцов керамики при этом снижается с 1450–1500 до 1400 °С. Полученные образцы керамики имеют водопоглощение 1,9–0,9 %, предел прочности при сжатии 165–190 МПа.

Таблица 3. Химический состав композиций на основе огнеупорной глины и боксита

Шифр композиций*	Содержание боксита, мас. %	Содержание оксидов, мас. %							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
<i>Исходное сырье</i>									
А	–	44,53	48,5	3,20	2,30	0,85	0,1	0,38	0,14
Б	100	9,70	62,0	4,5	22,4	1,4	0,1	–	–
<i>Композиции с добавкой боксита</i>									
АБ10	10	41,2	49,8	3,3	4,3	0,9	0,1	0,30	0,10
АБ20	20	37,6	51,4	3,5	6,3	0,95	0,1	0,30	0,11
АБ30	30	34,26	52,43	3,59	8,25	1,0	0,1	0,27	0,10
АБ40	40	30,62	53,82	3,74	10,32	1,07	0,1	0,25	0,08
АБ50	50	27,3	55,3	3,79	12,13	1,13	0,1	0,18	0,07
АБ60	60	23,6	56,7	3,93	14,32	1,18	0,1	0,15	0,06
АБ70	70	20,24	57,89	4,11	16,26	1,23	0,1	0,12	0,05

* А — аркалыкская глина, Б — краснооктябрьский боксит.

Таблица 4. Состав и свойства образцов керамики на основе огнеупорной глины и боксита после спекающего обжига в интервале 1350–1450 °С

Шифр образца	Свойства керамики			
	линейная усадка, %	водопоглощение, %	кажущаяся плотность, г/см ³	предел прочности при сжатии, МПа
Температура обжига 1350 °С				
А100	17,2	6,4	2,60	65,3
АБ10	18,1	6,2	2,65	103,7
АБ20	18,7	3,3	2,67	120,5
АБ30	18,7	2,5	2,68	130,9
Температура обжига 1400 °С				
А100	18,4	5,8	2,68	96,7
АБ10	18,7	4,9	2,72	132,1
АБ20	18,7	1,9	2,73	165,7
АБ30	18,8	0,9	2,76	190,4
Температура обжига 1450 °С				
А100	18,4	3,6	2,68	120,6
АБ10	18,5	3,1	2,71	148,9
АБ20	18,7	0,9	2,72	163,4
АБ30	18,7	0,9	2,74	175,7

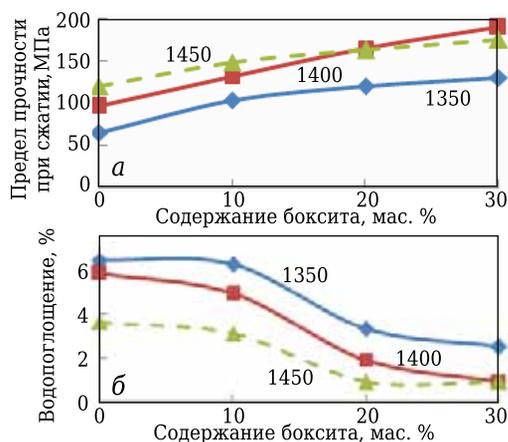


Рис. 1. Влияние количественного содержания боксита в композициях с аркалыкской глиной на их спекание при обжиге в интервале 1350–1450 °С. Зависимость предела прочности при сжатии (а) и водопоглощения (б) от содержания боксита в композиции. Температура обжига указана на кривых, °С

Анализ полученных данных позволил прогнозировать оптимальные параметры (состав и температуру обжига) технологии керамических пропантов на основе аркалыкской глины с добавкой 20–30 % высокожелезистого краснооктябрьского боксита для получения керамических пропантов с планируемым пределом прочности при сжатии, позволяющим пропантам выдерживать разрушающее давление не менее 52 МПа.

Одним из путей активации процесса упрочнения керамических материалов является предварительная термообработка сырьевых компонентов, которая проводится с целью удаления химически связанной воды, разрушения кристаллической решетки каолинита и приведения компонентов в химически активное состояние за счет повышения поверхностной энергии дефектной структуры материала.

Выбор температур предварительной термообработки сырья был сделан на основании результатов рентгенофазового анализа проб исходной огнеупорной глины, термообработанных при 800, 900, 1000, 1200 °С. Начало образования муллита было отмечено на дифрактограмме пробы глины, термообработанной при 900 °С. Интенсивное муллитообразование отмечено в пробе после прокаливания при 1200 °С.

Оптимальную температуру термоактивации сырья выбирали из двух величин — 900 и 1000 °С. Согласно данным рентгенофазового анализа в

пробах, обожженных при 900 и 1000 °С, отмечено разрушение структуры каолинита (основного минерала глины) и появление муллитовой фазы. Термообработанное сырье представлено криптокристаллическим материалом, что является предпосылкой для интенсивного муллитообразования и хорошего спекания керамики в последующем спекающем обжиге.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМООБРАБОТКИ СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА КЕРАМИКИ

Была проведена предварительная термообработка сырьевой смеси из аркалыкской глины с добавкой 30 % краснооктябрьского боксита в температурном интервале 900–1000 °С. Термообработку сырья проводили в свободно насыпанном состоянии. Термообработанную смесь измельчали мокрым помолом в мельнице до прохождения шликерной массы через сито 0,063 мм. Массу выпаривали, сушили при 105–110 °С и просеивали через сито 0,063 мм. Из полученного сухого порошка с применением связующего в виде 0,5 %-ного раствора карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) были сформованы образцы-цилиндры диаметром 36 мм на гидравлическом прессе под давлением 15 МПа.

Образцы керамики после спекающего обжига подвергали испытаниям для определения свойств, характеризующих процесс спекания (табл. 5). Влияние температур предварительной термообработки сырьевой смеси 900 и 1000 °С на процесс спекания образцов керамики почти одинаково. Показатели водопоглощения и предела прочности при сжатии мало различаются.

Фазовый состав и структуру керамических образцов изучали с помощью рентгенофазового и микроскопического методов анализа продуктов обжига при 1400 °С (рис. 2, 3). На дифрактограмме продуктов обжига установлены рентгеновские рефлексы, характерные для муллита, однако присутствуют также кварц, оксиды железа, шпинели сложного состава (см. рис. 2).

Изучение образцов из предварительно термообработанной при 1000 °С смеси огнеупорной глины и боксита с помощью электронного микроскопа показало, что при повышении температуры спекающего обжига с 1350 до 1400 °С структура керамики уплотняется (см. рис. 3).

Интенсивное спекание образцов керамики происходит вследствие увеличения количества

Таблица 5. Свойства алюмосиликатной композиции на основе термоактивированной смеси огнеупорной глины и боксита в соотношении 70:30 после спекающего обжига при 1400 °С

Температура термоактивации, °С	Свойства образцов				
	линейная усадка, %	открытая пористость, %	водопоглощение, %	кажущаяся плотность, г/см ³	предел прочности при сжатии, МПа
900	2,2	6,3	2,3	2,65	135,7
1000	1,6	5,4	1,8	2,67	141,6

силикатного расплава с участием оксидов железа и других примесных минералов сырья, что способствует рекристаллизации муллита и выделению новых железосодержащих фаз при охлаждении образцов после обжига. На рис. 3 хорошо видны светлые игольчатые выделения железосодержащих минералов, появившиеся в результате распада твердых растворов.

Таким образом, установлено, что для получения пропантов с планируемым пределом прочности на сжатии не менее 52 МПа следует использовать термообработанную при 1000 °С сырьевую смесь огнеупорной глины с добавкой 20–30 % боксита. Оптимальная температура обжига керамических пропантов 1400 °С.

Керамические пропанты на основе алюмосиликатного сырья Казахстана получали по технологической схеме, включающей термообработку сырья при 1000 °С с целью полного разложения исходных минералов, мокрый помол до размера частиц менее 0,063 мм, обезвоживание шликера, сушку, смешивание и гомогенизацию компонентов. Пропанты получали из порошков с применением в качестве связующего 1,5 %-ного раствора КМЦ в лабораторных условиях в турболопастном грануляторе.

Гранулирование проводили до получения гранул с насыпной плотностью 0,9–1,0 г/см³ в сухом состоянии. Количество связующего составляло 20–30 %. Гранулы-пропанты сушили до остаточной влажности 1–3 % с последующим промежуточным фракционированием материала. Спекорящий обжиг гранул проводили при 1400 °С.

Обожженные гранулы-пропанты фракционировали в соответствии с ГОСТ Р 51761–2013

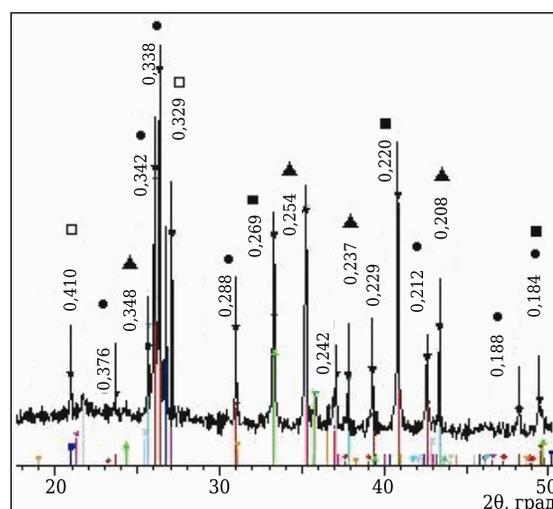


Рис. 2. Дифрактограмма композиции на основе огнеупорной глины с добавкой 30 % боксита, термообработанной при 1000 °С, после спекорящего обжига при 1400 °С: ● — муллит, ▲ — корунд, ■ — гематит, □ — кварц

на алюмосиликатные пропанты, затем были определены их свойства. Составы и свойства опытных гранул-пропантов приведены в табл. 6.

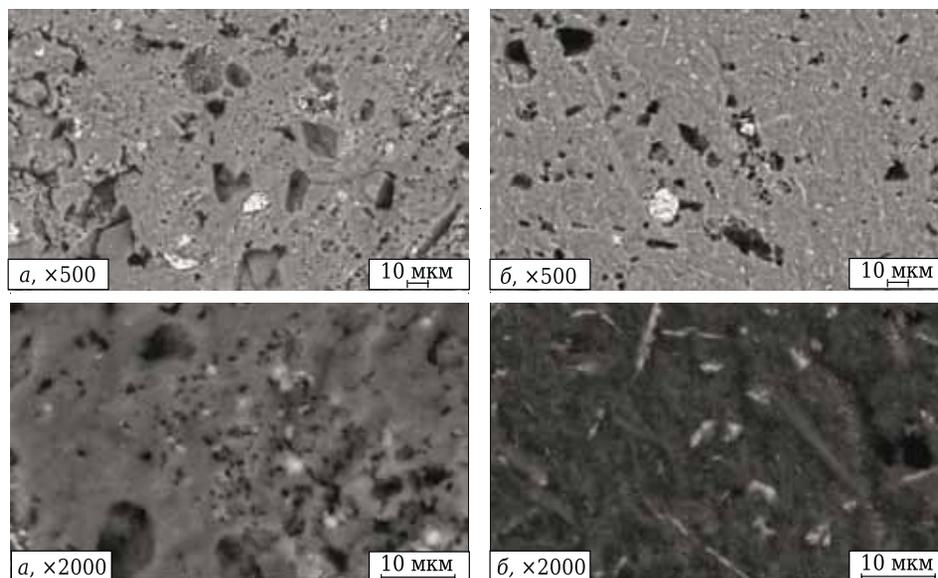


Рис. 3. Микроструктура образцов керамики на основе смеси огнеупорной глины с добавкой 30 % боксита, термообработанной при 1000 °С, после спекорящего обжига при температуре, °С: а — 1300; б — 1400

Таблица 6. Состав и свойства керамических пропантов на основе аркалыкской глины и краснооктябрьского боксита, обожженных при 1400 °С

Шифр состава	Соотношение глина/боксит	Температура обжига, °С	Свойства пропанта		Содержание оксидов в пропанте, мас. %	
			насыпная плотность, г/см ³	доля разрушенных гранул*, %	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
А	100/0	1500	1,56	24,5	48,5	2,3
АБ10	90/10	1450	1,58	24,0	49,8	4,3
АБ20	80/20	1380	1,61	19,1	51,14	6,3
АБ30	70/30	1350	1,63	15,6	52,43	8,25

* Согласно требованиям ГОСТ Р 51761–2013 доля разрушенных гранул при сжимающей нагрузке 52 МПа для фракции 16–20 не должна превышать 25 %.

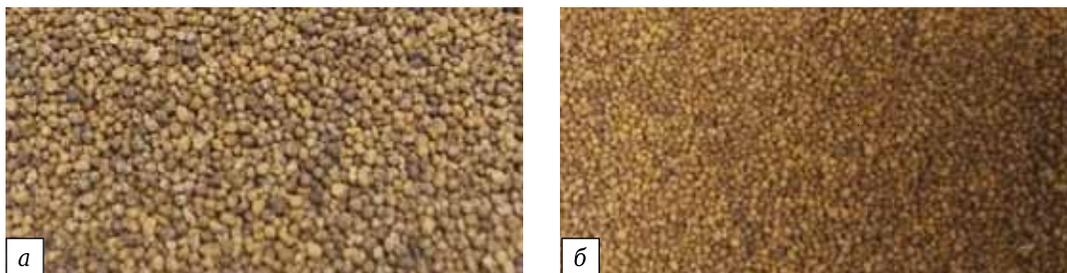


Рис. 4. Натурные образцы керамических пропантов, полученных на основе алюмосиликатного сырья Казахстана: а — фракция 12–18; б — фракция 16–20

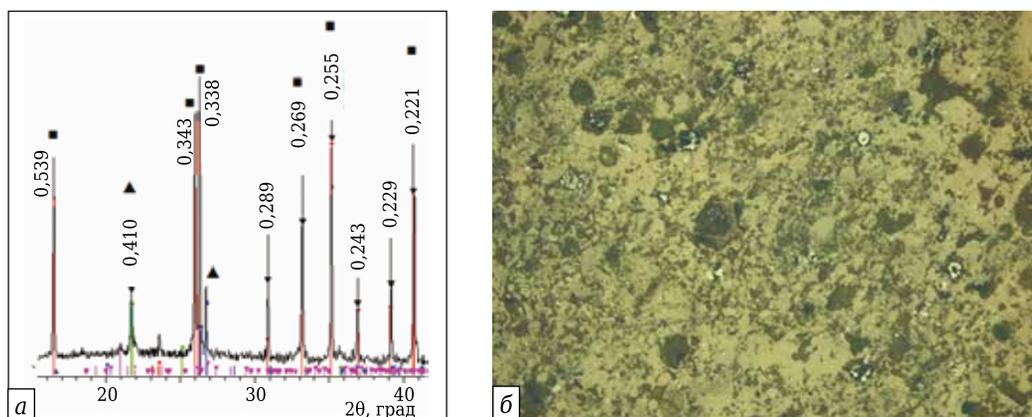


Рис. 5. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) пропантов, полученных из предварительно термоактивированной при 1000 °С сырьевой смеси после спекающего обжига при 1400 °С: а — ■ — муллит, ▲ — кварц; б — свет отраженный. × 100

Для определения сопротивления пропантов раздавливанию были испытаны гранулы фракции 16–20*.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что все испытанные составы композиций пригодны по прочности для получения алюмосиликатных пропантов со свойствами, удовлетворяющими требованиям указанного выше стандарта, однако пропанты, полученные из огнеупорной глины или с добавкой 10 % боксита не удовлетворяют по содержанию оксида алюминия. Опытные пропанты, полученные из аркалыкской глины с добавкой 20–30 % краснооктябрьского боксита по всем параметрам удовлетворяют требованиям стандарта на облегченные алюмосиликатные пропанты.

На рис. 4 представлены натурные образцы гранул пропантов фракций 12–18 и 16–20.

Фазовый состав и структура опытных алюмосиликатных пропантов были изучены рентгенофазовым и микроскопическим (РЭМ) методами анализа (рис. 5).

Таким образом, установлено, что для получения керамических пропантов на основе казахстанского сырья со свойствами, соответствующими требованиям ГОСТ Р 51761–2013 на данную продукцию, необходимо применение шихты на

основе аркалыкской глины с добавлением 20–30 % краснооктябрьского боксита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние предварительной термообработки природного алюмосиликатного сырья Казахстана на процессы спекания и упрочнения керамики на его основе. Установлено, что оптимальной температурой термоподготовки сырья является 1000 °С.

Изучено влияние количественного содержания краснооктябрьского боксита на свойства алюмосиликатной керамики из аркалыкской огнеупорной глины. Для получения облегченных алюмосиликатных пропантов оптимальными являются композиции из аркалыкской глины с добавкой 20–30 % краснооктябрьского боксита.

Получены облегченные алюмосиликатные пропанты на основе казахстанского сырья со свойствами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ Р 51761–2013 на алюмосиликатные пропанты.

Библиографический список

1. Мигаль, В. П. Муллитовые изделия для лещади доменных печей / В. П. Мигаль, А. П. Маргшивили, В. В. Скурихин [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 3. — С. 39–46.

* Здесь и далее обозначение по ASTM E 11-04.

2. **Швецов, Р. Н.** Разработка безусадочной муллитокорундовой массы для футеровки сталеразливочного ковша / Р. Н. Швецов, Ю. Ю. Третьякова, Л. Д. Пилипчак // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 10. — С. 30–36.
3. **Плетнев, П. М.** Экспериментальные составы корундомуллитовых огнеупоров на основе отечественного сырья / П. М. Плетнев, Д. С. Тюлькин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 3. — С. 10–14.
4. **Россихина, Г. С.** Исследование огнеупорных бетонных материалов алюмосиликатного состава методом петрографии / Г. С. Россихина, Н. Н. Щербакова, М. П. Щедрин // Стекло и керамика. — 2007. — № 11. — С. 28–31.
5. **Хлыстов, А. И.** Повышение стойкости и долговечности алюмосиликатных огнеупоров в углеродсодержащей среде / А. И. Хлыстов, С. В. Соколова, Д. В. Марков // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 11. — С. 47.
6. **Франкен, М.** Огнеупоры для алюминиевой промышленности. Плавильные печи и миксеры / М. Франкен, П. Ван Беркель // Огнеупоры и техническая керамика. — 2009. — № 6. — С. 35–42.
7. **Хоменко, Е. С.** Современная технология получения шамота высоких марок на основе качественного каолинового сырья / Е. С. Хоменко, О. А. Миршавка, В. В. Коледа, Р. Ю. Чернышева // Огнеупоры и техническая керамика. — 2013. — № 9. — С. 20–24.
8. **Викулин, В. В.** Корундомуллитовый материал для огнеприпаса и плавильных тиглей / В. В. Викулин, М. Ю. Русин, Т. М. Храновская // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 6. — С. 40–43.
9. **Азаров, С. М.** Многослойная пористая алюмосиликатная керамика / С. М. Азаров, Т. А. Азарова, Н. В. Ратько [и др.] // Стекло и керамика. — 2009. — № 3. — С. 23–25.
10. **Бирюкова, А. А.** Пористая керамика алюмосиликатного состава на основе корунда / А. А. Бирюкова, Т. А. Тихонова, А. В. Паничкин [и др.] // Комплексное использование минерального сырья. — 2013. — № 4. — С. 87–99.
11. **Корнилов, А. В.** Получение облицовочных плиток из низкокачественного глинистого сырья / А. В. Корнилов, Е. Н. Пермяков, Т. З. Лыгина, Ш. Х. Хайдаров // Стекло и керамика. — 2009. — № 3. — С. 13–15.
12. **Усова, З. Ю.** Керамический пропант на основе бора алюминия / З. Ю. Усова, В. М. Погребенков // Огнеупоры и техническая керамика. — 2012. — № 1/2. — С. 28–32.
13. **Пат. 2244695 РФ, МПК С 04 В 35/622.** Способ получения легковесных высокопрочных керамических гранул / Горбатов В. Ю., Титов С. В.; патентообладатель ООО «КМК»; заявл. 08.01.04; опубл. 20.01.05.
14. **Пат. 2389710 РФ, МПК С 04 В 35/64, С 09 К 8/80.** Способ получения алюмосиликатного пропанта и состав для его получения / Вакалова Т. В., Погребенков В. М., Решетова А. А.; патентообладатель ФГОУ ВПО НИ ТПУ; заявл. 06.04.09; опубл. 20.05.10, Бюл. № 14.
15. **Пат. 2392251 РФ, МПК С 04 В 35/64, С 09 К 8/80.** Способ получения алюмосиликатного пропанта и состав для его получения / Вакалова Т. В., Погребенков В. М., Решетова А. А.; патентообладатель ФГОУ ВПО НИ ТПУ; заявл. 29.04.09; опубл. 20.06.10, Бюл. № 17.
16. **Пат. 2507178 РФ, МПК С 04 В 35/10.** Способ получения пропанта и способ гидравлического разрыва пласта с использованием полученного пропанта / Першикова Е. М., Усова З. Ю., Найдукова С. А.; патентообладатель Шлюмберже Текнолоджи Б. В.; заявл. 28.04.08; опубл. 20.02.14, Бюл. № 5.
17. **Пат. 2381202 РФ, МПК С 04 В 35/622.** Способ изготовления керамических пропантов / Алексеев В. В., Шмотьев С. Ф., Плинер С. Ю.; патентообладатель ООО «ФОРЕС»; заявл. 30.11.07; опубл. 10.02.10, Бюл. № 4.
18. **Снегирев, А. И.** Технология производства и свойства сферических гранул в системе MgO–Al₂O₃–SiO₂ / А. И. Снегирев // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 10. — С. 21–23.
19. **Пат. 2476476 РФ, МПК С 09 К 8/80, С 04 В 35/622.** Способ изготовления керамического пропанта и пропант / Алексеев В. В., Пейчев В. Г., Баламыгин Д. И.; патентообладатель ООО «ФОРЕС»; заявл. 10.06.11; опубл. 27.02.13, Бюл. № 6.
20. **Бирюкова, А. А.** Влияние фторсодержащих добавок на синтез и свойства муллитовой керамики на основе алюмосиликатного сырья Казахстана / А. А. Бирюкова, Т. А. Тихонова, С. Т. Акчулакова [и др.] // Комплексное использование минерального сырья. — 2016. — № 1. — С. 80–87. ■

Получено 05.12.16

© А. А. Бирюкова, Т. Д. Джиеналиев,
Т. А. Тихонова, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**ЕАМС — Европейский конгресс
по высокотехнологичным материалам**

г. Стокгольм, Швеция
22–24 августа 2017 г.

www.vbripress.com/eamc

Д. т. н. **В. Н. Макаров**, д. т. н. **В. Я. Потапов**, д. т. н. **С. Я. Давыдов** (✉),
к. т. н. **Н. В. Макаров**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.928:622.273+622.44

МЕТОД АДДИТИВНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА УЗЛА КЛАССИФИКАЦИИ ФРИКЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Предложен метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации частиц компонентов материалов в зависимости от их физических свойств, объединенных интегральным критерием «парусности», и параметров управляемого направленного воздушного потока. Получены уравнения определения положения приемного бункера узла аэрационной классификации фрикционного барабанно-полочного сепаратора в зависимости от критериев аэродинамического подобия, обеспечивающего максимальное качество стратификации исходного сырья и, как результат, повышение качества строительных материалов. Подтверждена эффективность аэрационной классификации с использованием управляемого воздушного потока.

Ключевые слова: «парусность», интегральный критерий «парусности», физические характеристики, фрикционный сепаратор, аэрационная классификация, критерий аэрационного подобия.

Одним из путей повышения эффективности классификации и, как результат, повышения качества строительных материалов является создание ресурсоэффективных разделительных аппаратов и совершенствование структуры, технологии подготовки и разделения исходного сырья [1–5].

При разработке и проектировании аппаратов необходимо учитывать конструктивные особенности их структурных единиц, способствующие качественному разделению и классификации исходного сырья по его физическим характеристикам, возможность целенаправленного управления внешними факторами, влияющими на эффективность процесса разделения его компонентов в зависимости от их состава.

С позиции совершенствования разделения и классификации многокомпонентного исходного сырья, включающего в себя частицы, отличающиеся «парусностью», т. е. существенным влиянием на траекторию их движения аэродинамических сил, наиболее перспективно использование аэрационной классификации.

Аэрационная классификация — процесс разделения частиц многокомпонентного материала, которые отличаются «парусностью» под воздействием плотности энергии, определяемой кинетической энергией направленного потока воздуха, достаточной для формирования траекторий движения частиц, связанных

с положением приемного бункера аэрационной классификации.

Конструктивно аэрационная классификация реализована в барабанно-полочном фрикционном сепараторе (БПФСА) с устройством создания управляемого направленного аэродинамического потока воздуха [4, 5].

БПФСА представляет собой сепаратор (рис. 1), включающий наклонную полку 1, криволинейный трамплин 2, вращающийся барабан 3, приемные бункеры 4 аэрационной классификации. В торцы барабана 3 встроены радиальные вентиляторы 5 с осесимметричными коллекторами 6. Амплитудно-частотные регуляторы 7 обеспечивают требуемую плотность энергии, направле-

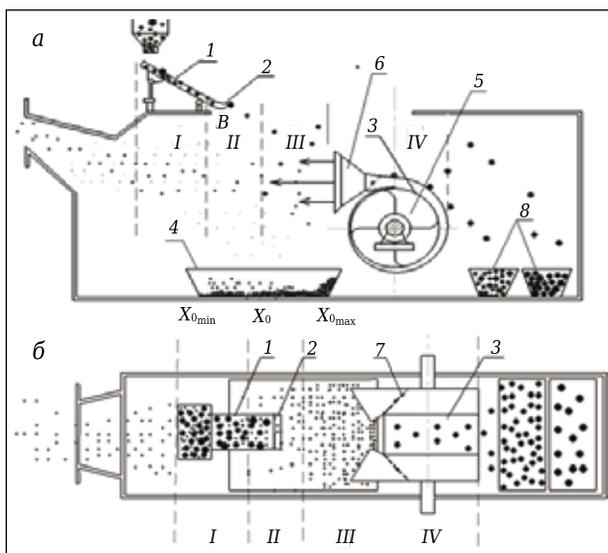


Рис. 1. Принципиальная схема сепаратора БПФСА: а — главный вид; б — вид сверху

✉
С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

ние, амплитуду и частоту колебания воздушного потока. Бункеры 8 предназначены для приема материала после фрикционной классификации.

Таким образом, БПФСА представляет собой совокупность четырех структурированных устройств (см. рис. 1, I–IV), каждое из которых предназначено для разделения частиц исходного материала по структурным признакам.

В соответствии с четырьмя структурированными устройствами в БПФСА выделяются четыре фазы движения исходного многокомпонентного сырья, соответствующие четырем этапам его классификации (см. рис. 1 и 2).

Механизм разделения и классификации исходного сырья на вышеуказанных фазах движения, за исключением аэрационной классификации, подробно описан в статье [6]:

- фаза I — движение многокомпонентного исходного сырья по наклонной полке 1 с углом наклона β , где происходит разделение частиц, движущихся с различными скоростями в силу различия их коэффициента трения;

- фаза II — движение исходного сырья по криволинейному трамплину 2, обеспечивающему необходимый диапазон вылета частиц с образованием веера разделения, благодаря которому осуществляется разделение частиц с различным содержанием полезного компонента;

- фаза III — разделение частиц исходного сырья под воздействием управляемого направленного воздушного потока, создаваемого вышеуказанными радиальными вентиляторами 5 — аэрационная классификация;

- фаза IV — разделение частиц исходного сырья на поверхности вращающегося барабана 3 вследствие различия их коэффициентов восстановления при ударе (см. рис. 1, 2).

В силу ограниченной информации по аналитическим исследованиям процесса аэрационной стратификации многокомпонентного исходного сырья, частицы которого отличаются «парусностью», путем его взаимодействия с направленным потоком воздуха, наиболее актуально исследовать аэродинамику процесса движения двухфазной среды для повышения эффективности разделения твердых компонентов в направленном воздушном потоке.

Данная статья посвящена уточнению аэродинамического расчета аэрационной классификации многокомпонентного исходного сырья с широким спектром «парусности», соответствующей процессу его классификации на фазе III движения в БПФСА. Решение этой задачи позволит повысить качество исходного сырья за счет эффективного использования влияния «парусности» частиц компонентов на величину действующих на них сил аэродинамического сопротивления, Стокса, Архимеда и Магнуса.

Математическая модель движения отдельных частиц на микроуровне в зависимости от

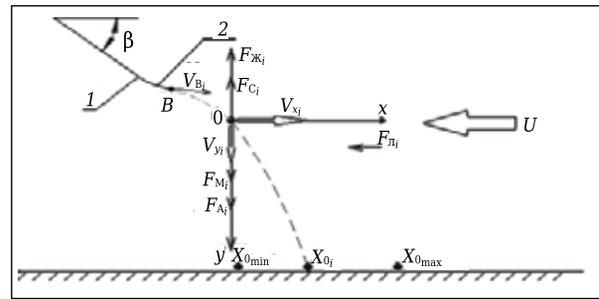


Рис. 2. Схема движения частицы и действующих на нее сил на фазе аэрационной классификации БПФСА

действующих на них сил, величина и направление которых зависят от «парусности» частиц, позволяет установить зависимость траектории движения двухфазной среды с заданным диапазоном «парусности» от плотности энергии, направления, амплитуды и частоты пульсации управляемого направленного воздушного потока. Модель позволяет рассчитывать параметры плотности энергии воздушного потока в зависимости от диапазона «парусности» частиц для обеспечения максимальной эффективности их классификации с минимальными затратами энергии.

Обладая кинетической энергией, i -я частица исходного многокомпонентного сырья под воздействием энергии управляемого направленного потока воздуха, перемещается по соответствующей траектории, определяемой плотностью вышеуказанной энергии. При этом необходимо иметь в виду, что плотность энергии воздушного потока (энергия единицы объема) соответствует удельной аэродинамической силе, т. е. силе, действующей на единичную поверхность.

Для интегральной оценки влияния «парусности», т. е. аэродинамических сил, на траекторию движения частиц и двухфазной среды, включающей в себя воздушный поток и частицы многокомпонентного сырья, целесообразно ввести критерии аэрационного подобия:

- коэффициент аэрационного притяжения, характеризующий вертикальную перегрузку частицы или двухфазной среды под действием аэродинамических сил:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n F_{b_i}^j}{F_{A_i}}, \quad (1)$$

где $F_{b_i}^j$ — вертикальная составляющая j -й аэродинамической силы, действующей на i -ю частицу многокомпонентного исходного сырья в фазе аэрационной классификации; F_{A_i} — сила Архимеда направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести;

- коэффициент аэрационной инерции, характеризующий горизонтальную перегрузку частицы или двухфазной среды под действием аэродинамических сил:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^n F_{\Gamma_i}^j}{F_{A_i}} \quad (2)$$

где $F_{\Gamma_i}^j$ — горизонтальная составляющая j -й аэродинамической силы, действующей на i -ю частицу многокомпонентного исходного сырья в фазе аэрационной классификации.

Для установления зависимости между энергией частицы в точке схода B (рис. 2) с наклонной полки 1 и криволинейного трамплина 2, энергией направляемого потока воздуха и геометрическими параметрами приемных бункеров 4 БПФСА (см. рис. 1) в фазе аэрационной классификации построим уравнения движения частицы в зависимости от действующих на нее сил с учетом введенных выше критериев аэрационного подбора.

Поскольку наибольшее влияние на траекторию движения частиц на фазе III оказывают аэродинамические силы, траектория движения частицы будет определяться ее «парусностью», которая зависит от коэффициентов аэродинамического притяжения и инерции.

Предложенный метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации отличается отдельным учетом влияния скорости движения частиц (V_{x_i} , V_{y_i}) и скорости управляемого направленного воздушного потока U (см. рис. 2) как в критериях аэрационного подбора, так и в уравнениях движения этих частиц.

Относительная скорость движения частицы определяется разностью ее скоростей (V_{x_i} , V_{y_i}) относительно системы координат Ox и скорости управляемого направленного воздушного потока U . Поскольку скорость управляющего потока U направлена в сторону, противоположную оси Ox , то относительная скорость частицы определяется сложением модулей скоростей частицы относительно оси Ox и воздушного потока (см. рис. 2).

Такой подход позволяет исследовать влияние управляемого потока на траекторию движения частиц, определить ее рациональные значения.

Свободный полет частицы многокомпонентного исходного сырья на стадии III его движения в БПФСА начинается из точки B со скоростью V_{B_i} , т. е. с соответствующей кинетической энергией (см. рис. 2). При этом скорость движения частицы зависит от ее физических свойств: плотности, состояния поверхности, размеров, формы, петрографического состава, взаимного трения и столкновения частиц между собой и со стенками аппарата.

Таким образом, движение i -й частицы с кинетической энергией, соответствующей скорости V_{B_i} , из точки B будет происходить под действием силы аэродинамического сопротивления, подъемной аэродинамической силы Жуковского, силы Магнуса, обусловленной перепадом сил аэродинамического давления на поверхности частицы вследствие ее вращения, силы Архимеда,

связанной с ускорением свободного падения, и силой Стокса, обусловленной вязкостью воздуха [7]. Поскольку наибольшее влияние на траекторию движения частицы на данной фазе оказывают аэродинамические силы, характер движения частицы будет определяться ее «парусностью», которая численно зависит от коэффициентов аэрационного притяжения α_i и инерции β_i .

При движении i -й частицы в направлении оси Ox на нее действует сила аэродинамического лобового сопротивления $F_{л_i}$, обусловленная как скоростью собственного движения частицы, так и скоростью управляемого направленного потока воздуха, направленного, как сказано выше, в сторону, противоположную оси Ox .

Уравнение движения i -й частицы компонентов исходного сырья в проекции на ось Ox , направленную противоположно аэродинамическому потоку воздуха от действия вентиляторов, в соответствии с классическим уравнением Ньютона запишем в виде:

$$F_{л_i} = m_i \frac{\partial V_{x_i}}{\partial t} = -k_i \pi r_i^2 \rho_v (V_{x_i} + U)^2, \quad (3)$$

где m_i — масса i -й частицы, кг, $m_i = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho_i$; V_{x_i} — составляющая скорости i -й частицы, м/с; k_i — коэффициент лобового сопротивления i -й частицы; r_i — радиус i -й частицы, м; ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; U — скорость потока воздуха, м/с; ρ_i — плотность i -й частицы, кг/м³.

Уравнение движения i -й частицы в проекции на ось Oy имеет вид:

$$m_i \frac{\partial V_{y_i}}{\partial t} = F_{A_i} - F_{ж_i} - F_{C_i} + F_{M_i}, \quad (4)$$

где F_{A_i} — сила Архимеда, направленная вниз, действующая на i -ю частицу, являющаяся аналогом силы тяжести, $F_{A_i} = \frac{4}{3} \pi r_i^3 (\rho_i - \rho_v) g$; $F_{ж_i}$ — сила Жуковского, направленная вертикально вверх, действующая на i -ю частицу, $F_{ж_i} = c_i \pi r_i^2 \rho_v (V_{x_i} + U)^2$; F_{C_i} — сила сопротивления Стокса, обусловленная вязкостью воздуха и физическими свойствами компонентов исходного сырья, $F_{C_i} = \varphi_i \rho_v \pi \eta r_i V_{y_i}$; F_{M_i} — сила Магнуса, обусловленная вращением i -й частицы компонентов исходного сырья, $F_{M_i} = \pi \rho_i r_i^3 \Omega_i (V_{x_i} + U)$; c_i — коэффициент подъемной силы Жуковского, действующей на i -ю частицу; g — ускорение свободного падения, м/с²; φ_i — коэффициент формы частицы в законе Стокса; η — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; Ω_i — угловая скорость вращения i -й частицы, с⁻¹, $\Omega_i = \frac{V_{B_i}}{2\pi r_i}$.

Таким образом, уравнение вертикального перемещения в проекции на ось Oy i -й частицы компонентов исходного сырья под действием управляемого направленного потока воздуха с учетом действия сил Стокса, Магнуса, Архимеда и Жуковского может быть представлено в виде:

$$m_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial t} = \frac{4}{3} \pi r_i^3 (\rho_i - \rho_b) g - c_i \pi r_i^2 \rho_b (V_{xi} + U)^2 - \varphi_i \pi r_i V_{yi} + \pi \rho_b r_i^3 \Omega_i (V_{xi} + U). \quad (5)$$

Поскольку $V_{yi} \ll (V_{xi} + U)$, в уравнениях (4) и (5) не учитывается аэродинамическая сила лобового сопротивления в проекции на ось Oy .

Выражения для критериев аэрационного подобия: коэффициентов аэрационного притяжения и инерции с учетом уравнений (1)–(3) и (5) после преобразования получим в виде:

$$\alpha_i = \frac{F_{Mi} - F_{Жi}}{F_{Ai}} = \frac{3(V_{xi} + U)}{4(\rho_i - \rho_b)g} \left(\rho_i \Omega_i - \frac{c_i \rho_b (V_{xi} + U)}{r_i} \right); \quad (6)$$

$$\beta_i = - \frac{F_{Ii}}{F_{Ai}} = \frac{3k_i \rho_b (V_{xi} + U)^2}{4r_i (\rho_i - \rho_b) g}. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) видно, что интегральный критерий «парусности»: коэффициенты аэрационного притяжения и инерции зависят от формы частицы, определяющей коэффициенты k_i , φ_i , c_i , ее размера r_i , плотности ρ_i и скорости управляющего потока U .

С учетом уравнения баланса сил Жуковского, Архимеда, Стокса и Магнуса скорость вертикального перемещения V_{yi} i -й частицы компонентов исходного сырья получим в виде

$$V_{yi} = \frac{r_i \left[\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_b} - 1 \right) g + r_i \Omega_i (V_{xi} + U) - c_i (V_{xi} + U)^2 \right]}{\varphi_i \pi}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что при скорости направленного аэродинамического потока воздуха $U = U_0$ по направлению оси Oy будут перемещаться частицы компонентов, размеры которых определяются зависимостью

$$r_{oi} > \frac{c_i (V_{xi} + U_0)^2}{\frac{4}{3} r_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_b} - 1 \right) g + (V_{xi} + U_0) \Omega_i}. \quad (9)$$

Энергия i -й частицы в точке схода B криволинейного трамплина 2 (см. рис. 2) определяется по формуле

$$E_i = \frac{m_i V_{Bi}^2}{2} = \frac{2}{3} \pi r_i^3 \rho_i V_{Bi}^2. \quad (10)$$

Таким образом, горизонтальная скорость движения i -й частицы становится равной нулю $V_{xi} = 0$ в точке X_{0i} , соответствующей положению приемного бункера 4 аэрационной классификации БПФСА, определяемой из условия равенства энергии E_i работе силы лобового аэродинамического сопротивления $F_{ли}$ на расстоянии x_{0i} :

$$X_{0i} = E_i / E_{ли}. \quad (11)$$

С учетом формул (1) и (9) получим

$$X_{0i} = \frac{2\rho_i V_{Bi}^2 r_i}{3\rho_b U_0^2 c_i}. \quad (12)$$

Формула для расчета вертикальной скорости перемещения i -й частицы в функции от ко-

эффициента аэрационного притяжения с учетом уравнений (5) и (6) после соответствующих преобразований будет иметь вид:

$$V_{yi} = 0,75 \frac{(1 + \alpha_i)(\rho_i - \rho_b)r_i^2 g}{\varphi_i \pi \rho_b}. \quad (13)$$

Критериальное уравнение для расчета положения приемного бункера аэрационной классификации X_{0i} в функции от коэффициента аэрационной инерции после соответствующих преобразований с учетом (7) и (12) получим в виде:

$$X_{0i} = \frac{\rho_i V_{Bi}^2}{2\beta_{0i}(\rho_i - \rho_b)g}. \quad (14)$$

Таким образом, диапазон изменения «парусности» частиц исходного многокомпонентного сырья, определяемый изменением коэффициента аэрационного притяжения α_{0i} от α_{0min} до α_{0max} и коэффициента аэрационной инерции β_{0i} от β_{0min} до β_{0max} , определяет рациональное положение приемного бункера узла аэрационной классификации в диапазоне от X_{0min} до X_{0max} при заданной скорости управляющего потока $U = U_0$.

Метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации на фазе III движения в БПФСА многокомпонентных материалов, частицы которых отличаются «парусностью», позволил всесторонне исследовать механизм разделения частиц под действием аэродинамических сил управляемого направленного воздушного потока с учетом критериев аэрационного подобия, оптимизировав местоположение приемных бункеров аэрационной классификации и скорости управляемого направленного потока.

Использование аэродинамического эффекта от управляемого направленного воздушного потока в БПФСА позволяет повысить эффективность разделения многокомпонентных материалов, в частности обеспечить максимальное извлечение свободного асбестового волокна из руды, сохранить природную длину и текстуру волокна, освободить асбестовое волокно от пыли, а также случайных посторонних включений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод аддитивного аэродинамического расчета аэрационной классификации рабочего процесса полочного сепаратора с устройством создания управляемого направленного воздушного потока адекватно отражает реальный процесс формирования траекторий движения твердых частиц двухфазной среды.

Существенное влияние на качественный состав разделяемых компонентов при заданной «парусности» оказывает управляемый направленный воздушный поток. Аддитивная аэродинамическая модель аэрационной классифи-

кации позволяет проанализировать влияние скорости управляемого направленного потока воздуха на траекторию движения частиц многокомпонентного исходного сырья, способствуя повышению качества готового продукта в технологии производства строительных материалов.

Библиографический список

1. Практика обогащения асбестовых руд / под ред. Ф. П. Софронова. — М. : Недра, 1975. — 224 с.
2. **Келина, И. М.** О коэффициентах трения минералов при обогащении слюдосодержащих сланцев на полочном воздушном сепараторе / *И. М. Келина, Е. Ф. Цыпин, Е. П. Александрова* // Изв. вузов. Горный журнал. — 1983. — № 1. — С. 126–129.
3. **Ляпцев, С. А.** Математическое моделирование разделения частиц в барабанно-полочном фрикционном сепараторе / *С. А. Ляпцев, Е. Ф. Цыпин, В. Я. Потапов, В. В. Иванов* // Изв. вузов. Горный журнал. — 1996. — № 7. — С. 147–150.
4. **Ляпцев, С. А.** Классификация материалов при ударе о разделительную поверхность / *С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов, С. Я. Давыдов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 12. — С. 10–13.
Lyaptsev, S. A. Classification of granular material in an impact with a separation surface / *S. A. Lyaptsev, V. Ya. Potapov, S. Ya. Davydov* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 570–572.
5. **Макаров, В. Н.** Теоретические основы повышения эффективности вентиляции в технологических про-

цессах на промышленных предприятиях / *В. Н. Макаров, С. Я. Давыдов* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 59–63.

Makarov, V. N. Theoretical basis for increasing ventilation efficiency in technological processes at industrial enterprises / *V. N. Makarov, S. Ya. Davydov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 103–106.

6. **Потапов, В. Я.** Использование аэродинамического эффекта в фрикционных сепараторах для разделения минеральных комплексов, обладающих парусностью / *В. Я. Потапов, С. Я. Тимухин, В. В. Потапов* [и др.] // Изв. УГГУ. — 2011. — Вып. № 25/26. — С. 84–89.
7. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / *С. Я. Давыдов, А. Н. Семин*. — М. : Фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с. ■

Получено 03.08.16
© В. Н. Макаров, В. Я. Потапов,
С. Я. Давыдов, Н. В. Макаров, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

15-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС

И ОБЪЕДИНЕННАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ



15th Biennial Worldwide Congress
UNITECR
2017
SANTIAGO DE CHILE

26–29 сентября 2017 г. г. Сантьяго, Чили

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

- Испытания огнеупоров
- Новые установки и оборудование
- Монолитные огнеупоры
- Огнеупоры для сталелитейной промышленности
- Сырьевые материалы и глобальные вопросы
- Огнеупоры для стекольной промышленности
- Огнеупоры для цементной промышленности
- Моделирование огнеупоров
- Нефтехимия
- Огнеупоры для энергетики и переработки отходов
- Экономия энергии за счет применения огнеупоров
- Бескислородные огнеупорные системы
- Огнеупоры для химических процессов
- Разработки основных огнеупоров
- Образование в области огнеупоров
- Огнеупоры для цветной металлургии
- Безопасность, окружающая среда, переработка огнеупоров

<http://www.expoclub.ru/db/exhibition/view/7983/>
<http://unitecr2017.org>

Д. т. н. **О. Ю. Шешуков**^{1,2}, к. т. н. **И. В. Некрасов**¹ (✉), к. т. н. **М. А. Михеенков**¹,
к. т. н. **Д. К. Егiazарьян**¹, **Д. А. Лобанов**¹

¹ Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 669.187.28; 66.046.582.3

СТАБИЛИЗАЦИЯ РАФИНИРОВОЧНЫХ ШЛАКОВ ПУТЕМ КОРРЕКТИРОВКИ ИХ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ПРИДАНИЯ ИМ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Рафинировочные шлаки, используемые в агрегатах внепечной обработки металла, из-за значительного содержания в них нестабильной фазы — двухкальциевого силиката склонны к распаду вследствие его полиморфных превращений, сопровождающихся увеличением объема кристаллической решетки. Попадая в щели футеровки печного агрегата, шлак может вызвать ее разрушение. Представлены результаты изучения механизма стабилизации рафинировочных шлаков за счет введения в них глиноземистого флюса при одновременном придании шлакам свойств минеральных вяжущих веществ.

Ключевые слова: футеровка, шлак, белит, стабилизация, минеральное вяжущее.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с расширением применения в черной металлургии способов внепечной обработки стали, обеспечивающей высокую степень десульфурации металла, в сталеплавильной отрасли возникла проблема нестабильности шлаков, используемых для десульфурации стали в агрегатах внепечной обработки.

По данным [1], для наилучшей организации процесса десульфурации стали в агрегатах внепечной обработки широко используются шлаки, содержащие от 50 до 70 % CaO, от 20 до 35 % Al₂O₃ и 10 % SiO₂. Наибольший коэффициент распределения серы (S)/[S] более 600 достигается в области существования трехкальциевого силиката C₃S (3CaO·SiO₂) и извести CaO в жидкой фазе. Поскольку C₃S и CaO являются тугоплавкими материалами, вызывающими вследствие высокой гетерогенности шлака увеличение его вязкости, в шлак дополнительно вводят флюорит CaF₂ или снижают основность шлака для увеличения содержания в его составе двухкальциевого силиката — белита C₂S (2CaO·SiO₂). Введение в шлак флюорита CaF₂ и формирование в нем значительного количества белита позволяет существенно снизить вязкость шлака для внепечной обработки стали. Одновременно за счет введения флюорита

в шлак повышается его реакционная способность, и он разъедает футеровку агрегатов внепечной обработки стали, а двухкальциевый силикат, входящий в состав шлака, проникая в щели футеровки, при охлаждении расширяется и вызывает ее разрушение. Полиморфное превращение двухкальциевого силиката 2CaO·SiO₂, сопровождающееся увеличением объема его кристаллической решетки на 12 %, происходит при охлаждении шлака до температуры ниже 830 °С. На рис. 1 изображена футеровка ковша у печи в ожидании слива стали, полученная съемкой тепловизором. Видно, что приблизительно на уровне шлакового пояса ковша температура ниже 800 °С, т. е. затвердевший на этом уровне шлак будет ускорять износ огнеупоров.

Предотвратить процесс разрушения футеровки ковша за счет действия флюорита и двухкальциевого силиката можно путем замены флюорита на глиноземистую добавку, которая помимо

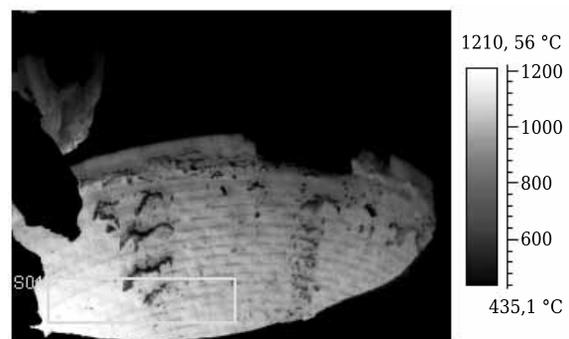


Рис. 1. Футеровка ковша перед сливом в него стали из печи. Съемка тепловизором



И. В. Некрасов
E-mail: ivn84@bk.ru

ный шлак, кварцевый песок, содержащий 98,9 % SiO_2 , и отходы производства вторичного алюминия (ОПВА). Химический состав ОПВА, мас. %: Al_2O_3 20–75, SiO_2 1–10, $\text{Al}_{\text{мет}}$ 5–20, MgO 5–12, $\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{NaF} + \text{KF} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 5–20.

Поскольку помимо основных оксидов рафинировочные шлаки содержат примесные оксиды — MgO , MnO , FeO , Cr_2O_3 [1], то модельный шлак, используемый при проведении эксперимента в качестве варьируемого фактора, по химическому составу не соответствовал точке А факторной диаграммы (точка А факторной диаграммы должна содержать 10 % SiO_2 , 10 % Al_2O_3 и 80 % CaO), а был приближен к химическому составу реальных рафинировочных шлаков. Химический состав модельного рафинировочного шлака, мас. %: CaO 70,10, SiO_2 15,01, Al_2O_3 3,64, FeO 0,54, MnO 0,43, MgO 10,05, Cr_2O_3 0,23.

В качестве функций отклика при проведении эксперимента приняты динамическая вязкость, Па·с, шлака при 1500 °С и содержание фаз в каждой точке факторного плана.

В соответствии с планом проведения эксперимента модельный шлак смешивали с SiO_2 и ОПВА и помещали в периклазографитовый тигель. Тигли со шлаком по одному помещали в печь сопротивления, основной нагревательный элемент которой — графитовая труба. Образец нагревали до полного расплавления шлака при 1600–1650 °С. Далее проводили ступенчатое охлаждение с замером вязкости, шаг охлаждения 30–50 °С, скорость охлаждения 5 град/мин, интервал выдержки каждой ступени 10 мин. Вязкость исследуемых шлаков измеряли вибрационным вискозиметром конструкции С. В. Штенгельмейера [12]. Температура шлаков регистрировалась вольфрам-рениевой термопарой, помещенной в чехол из оксида алюминия. Спай термопары располагался у самой поверхности шлакового расплава без касания шлака, около зонда вискозиметра. Вязкость шлаков и температура шлакового расплава регистрировались в автоматическом режиме с записью на компьютер. Измерения проводили в 14 точках в соответствии с планом проведения эксперимента. Точки проведения замеров в соответствии с планом проведения эксперимента показаны на рис. 3.

После проведения измерений тигли вынимали из печи и помещали в теплоизоляционный блок для медленного охлаждения. Результаты измерения вязкости описывались полиномом третьей степени. У охлажденных шлаков методами качественного рентгенофазового анализа (РФА) определяли тип фаз, содержащихся в шлаке, методами количественного РФА — количество данных фаз в шлаке. Результаты измерения вязкости при помощи полученных уравнений регрессии визуализировались в виде тернарных графиков.

По результатам определения количественного содержания фаз на тернарный график

изолиний равной вязкости наносили приближенные границы областей существования обнаруженных в шлаках фаз. При этом выявлено, что границы областей фаз не совпадают с границами областей фаз тройной диаграммы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ и, кроме того, в выделенных областях присутствуют фазы, содержащие магний, которых нет на фазовой диаграмме $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$. Появление фаз, содержащих магний, в шлаках обусловлено введением MgO вместе с модельным шлаком.

Для оценки совместного влияния ковшевого шлака и шлака дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на формирование в смеси гидравлически активных фаз готовился модельный ковшевой шлак с добавкой ОПВА. Он отличается от рафинировочного модельного шлака большим содержанием Al_2O_3 . Вторым компонентом шихты был шлак ДСП одного из сталеплавильных заводов, третьим компонентом — известняк. Химический состав компонентов шихты приведен в табл. 1.

Поскольку шлаки ДСП содержат значительное количество оксидов железа, которые не способны формировать гидравлически активные фазы, нагрев и плавление шлаков осуществляли в восстановительных условиях для перевода оксидов железа в чугун. Для создания восстановительной атмосферы и науглероживания железа в шихту сверх 100 мас. % вводили кокс в количестве 5,0 мас. %.

При проведении эксперимента в качестве факторов варьирования принято содержание в шихте модельного ковшевого шлака, шлака ДСП и известняка. Интервалы варьирования факторов для всех компонентов шихты одинаковые — нижний: кодированный 0,17 ед., натуральный 17 мас. %; верхний: кодированный 0,67 ед., натуральный 67 мас. %. План проведения эксперимента представлен на рис. 4.

В качестве функции отклика принято содержание в шлаковых продуктах плавки трехкальциевого силиката C_3S ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$). Компоненты

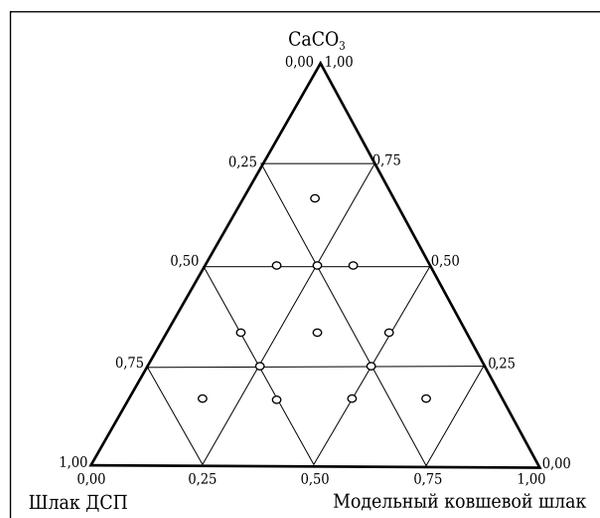


Рис. 4. Область проведения эксперимента

Таблица 1. Химический состав компонентов шихты, мас. %

Компонент	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	Δm _{прк}
Шлак ДСП	26,20	13,80	3,72	26,00	5,51	6,70	1,69	0,23
Модельный ковшевой шлак	53,80	8,00	21,60	1,10	1,42	9,80	0,23	0,03
Известняк CaCO ₃	54,60	0,20	0,04	0,32	0,00	0,00	0,00	44,00

шихты смешивали в количестве, соответствующем плану проведения эксперимента, плавил в восстановительной среде и медленно охлаждали. После охлаждения чугун отделяли от шлака и методами рентгеновского анализа определяли фазовый состав шлака.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 представлены изолинии функции отклика для вязкости шлака, Па·с, при 1500 °С в области факторного пространства и нанесенные на область факторного пространства приблизительные границы областей существования основных фаз шлака.

По результатам испытаний можно отметить, что введение ОПВА в исследуемую систему позволяет снизить вязкость шлака. Минимальная вязкость (0,267 Па·с) наблюдается в области со значительным содержанием SiO₂. Однако следует учитывать, что в этой области образуются магнийсиликатные фазы — диопсид CMS₂ (CaO·MgO·2SiO₂) и окерманит C₂MS₂ (2CaO·MgO·2SiO₂), т. е. весь содержащийся в системе MgO расходуется на образование этих фаз и содержание свободного MgO в шлаке снижается, что отрицательно влияет на стойкость футеровки агрегатов внепечной обработки.

В соответствии с результатами эксперимента, приведенными по плану, представленному на рис. 3, при увеличении содержания в модельном шлаке ОПВА он становится стабильным. Оптимальная область стабильного шлака находится в интервале содержания ОПВА в шлаке от 10,0 до 20,0 мас. %. При содержании в шлаке ОПВА менее 10,0 мас. % шлак нестабилен, а при содержании ОПВА более 20,0 мас. % в шлаке образуется огнеупорная шпинель AM (Al₂O₃·MgO), которая повышает вязкость шлака.

Поскольку предварительная оценка стабилизирующего действия ОПВА проводилась методами планирования эксперимента в обширной области факторной диаграммы CaO–SiO₂–Al₂O₃ с очень большим интервалом варьирования со-

держания ОПВА, составляющим 13,3 мас. %, границы оптимальной области содержания ОПВА, в которой обеспечивается стабилизация шлака, определены с большой погрешностью.

Для уточнения механизма и точных границ стабилизации шлака агрегатов внепечной обработки при введении в него ОПВА в модельный шлак вводили ОПВА при общем его содержании в шлаке от 10,0 до 30,0 % с шагом 2,0 %. Шлак, содержащий ОПВА, помещали в тигель и нагревали до 1350 °С, выдерживали при данной температуре в течение 2 ч и охлаждали вместе с печью.

Модельный шлак содержит значительное количество примесных оксидов, которые могут самостоятельно оказывать стабилизирующее действие на белит (MnO₂, Cr₂O₃ и др.), поэтому для предотвращения их влияния на процесс стабилизации параллельно такой же эксперимент проводили с чистым белитом, синтезированным при 1400 °С из природных минералов CaCO₃ и SiO₂ при требуемом стехиометрическом соотношении с изотермической выдержкой 2 ч и охлаждением вместе с печью.

В синтезированный белит вводили расчетное количество ОПВА, смесь помещали в тигли. Тигли со смесью нагревали до 1350 °С с изотермической выдержкой 2 ч, после чего охлаждали вместе с печью. После извлечения тиглей из печи их фотографировали и методами рентгенофазового

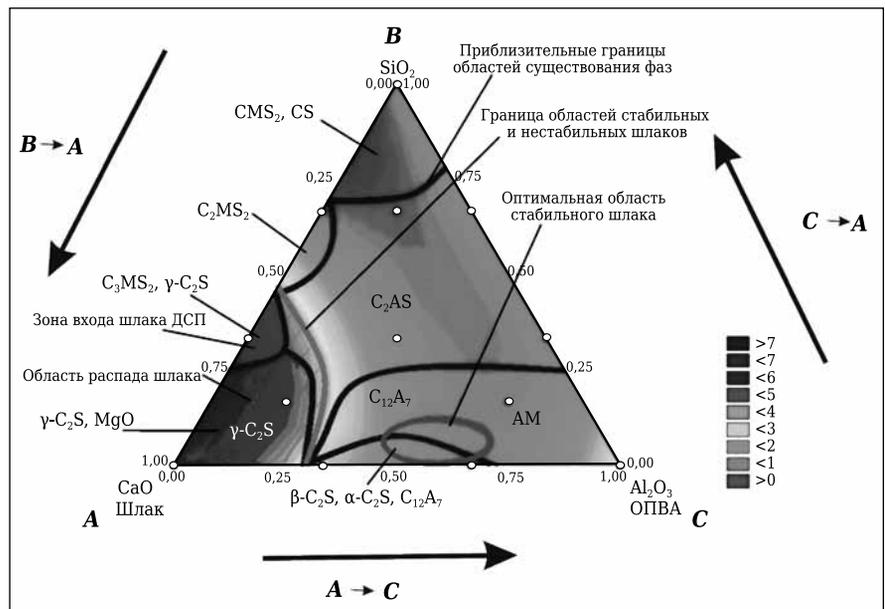


Рис. 5. Изолинии функции отклика для вязкости шлака, Па·с, при 1500 °С и области существования основных фаз шлака

анализа определяли фазовый состав смесей. Результаты определения количественного содержания фаз в пробах модельного шлака с добавкой ОПВА представлены на рис. 6.

По результатам испытаний можно сделать заключение, что с увеличением содержания ОПВА в шлаке в нем увеличивается количество майенита $C_{12}A_7$ ($12CaO \cdot 7Al_2O_3$), количество фаз белита уменьшается. На рис. 7 показано суммарное содержание фаз белита $\beta-C_2S$ + $\gamma-C_2S$ и майенита $C_{12}A_7$ в зависимости от количества ОПВА в шлаке. Суммарное содержание фаз белита $\beta-C_2S$ и $\gamma-C_2S$ в модельном шлаке снижается с 70 в исходном шлаке до 40 мас. % в шлаке, содержащем 30 мас. % ОПВА. Содержание майенита $C_{12}A_7$, наоборот, при увеличении содержания в шлаке ОПВА возрастает с 2 в исходном шлаке до 45 мас. % в шлаке, содержащем 30 мас. % ОПВА. Данные результаты свидетельствуют, что при введении ОПВА в модельный шлак реализуется в основном химический способ стабилизации, т. е. стабилизация за счет преобразования белита C_2S в иные, более стабильные фазы, в случае модельного шлака в майенит.

Результаты определения количественного содержания фаз в пробах синтезированного белита $\gamma-C_2S$ с добавкой ОПВА представлены на рис. 8. Видно, что при полной стабилизации $\gamma-C_2S$ исчезает за счет преобразования части белита C_2S в геленит C_2AS ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$) по схеме



и стабилизации оставшегося белита в $\beta-C_2S$. При этом общее количество белита снижается со 100 до 55 мас. %, оставшаяся часть белита полностью состоит из $\beta-C_2S$. Общее содержание геленита C_2AS повышается с 0 до 45 мас. %.

Для обеспечения полной стабилизации шлака при содержании в нем от 10 до 18 мас. % ОПВА в состав брикетов на основе ОПВА дополнительно вводили оксидные соединения из группы неборотных стабилизаторов белита. В данном интервале реализовывался комплексный метод стабилизации — химический от действия ОПВА и неборотный от действия ионов — стабилизаторов белита.

При введении в состав стабилизированного шлака агрегата ковш-печь (АКП) глиноземистой добавки в нем образуются стабильные фазы, придающие ему свойства шлакового щебня. В табл. 2 приведены свойства полученного шлакового щебня, испытанного в соответствии с требованиями ГОСТ 3344 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» в аккредитованной строительной лаборатории.

По результатам испытаний видно, что по основным показателям качества шлаковый щебень отвечает требованиям ГОСТ 3344, кроме содержания металлических включений и зерен

фракций 40 и 50 мм. Однако эти показатели регулируемые, т. е. если завод будет производить такой щебень, то он должен осуществлять дробление шлака и его сортировку с удалением магнитных включений. На большинстве металлургических заводов данные операции производятся в копровых цехах.

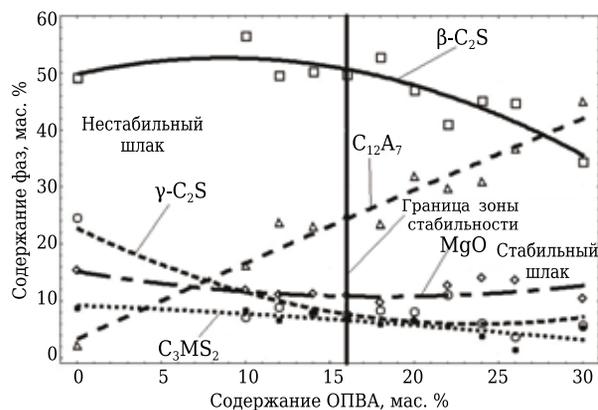


Рис. 6. Результаты определения количественного содержания фаз в пробах модельного шлака с добавкой ОПВА

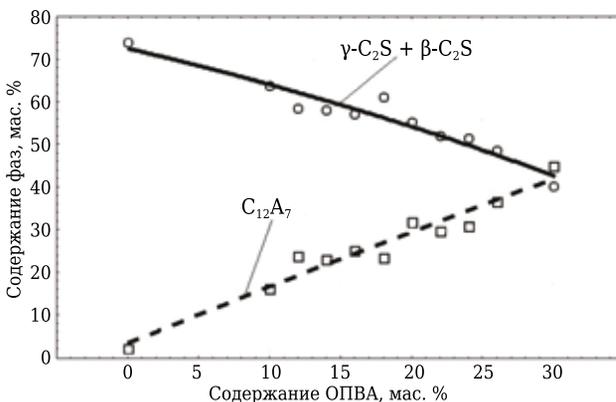


Рис. 7. Зависимость содержания фаз белита C_2S и майенита $C_{12}A_7$ от содержания в шлаке ОПВА

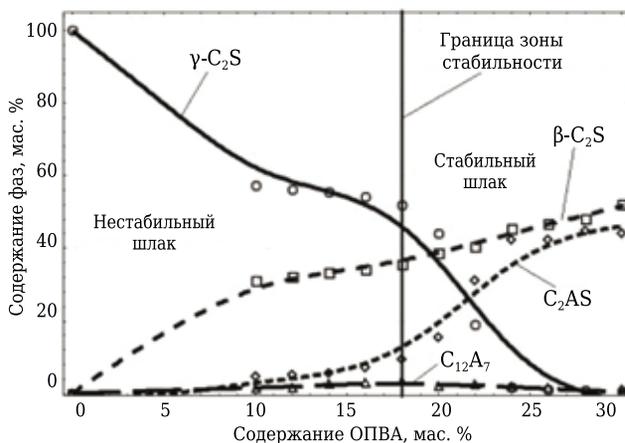
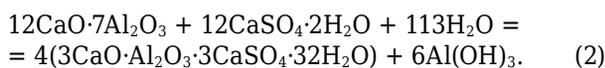


Рис. 8. Результаты определения количественного содержания фаз в пробах синтезированного белита $\gamma-C_2S$ с добавкой ОПВА

Таблица 2. Свойства шлакового щебня на основе стабилизированного шлака

Показатели	Результаты испытаний	Требования ГОСТ 3344
Насыпная плотность, кг/м ³	851,0	Не нормируется
Содержание, мас. %:		
пылевидных и глинистых частиц	0,0	Не более 3,0
металлических примесей, поддающихся ручной сортировке	11,8	Не более 5,0
зерен слабых пород	6,8	Не более 20,0
Потеря массы при испытании на дробимость, мас. %	34,2	От 25,0 до 35,0, марка по дробимости 800
Полные остатки, мас. %, на ситах, мм:		
50	32,1	До 0,5
40	55,7	До 10
30	74,1	От 30 до 80
20	89,0	От 90 до 100
10	97,9	От 90 до 100
Потеря массы при испытании на устойчивость, мас. %	0,6	До 3, структура устойчивая С1
Активность шлака, МПа	7,6	Более 5,0, шлак высокоактивный ВА

Помимо устойчивости шлака, сформированные в нем фазы α-C₂S, β-C₂S и C₁₂A₇ придают ему также свойства минеральных вяжущих веществ, т. е. полученный шлак способен к самостоятельному твердению как в воде, так и на воздухе. В практике цементного производства стараются свести к минимуму содержание в цементе фазы C₁₂A₇, так как майенит сильно ускоряет сроки начала схватывания цементного теста до 5–15 мин при нормативных требованиях по началу схватывания не ранее 45 мин. Однако это не является недостатком для вяжущих на основе гипса. Майенит C₁₂A₇, смешанный с гипсом дигидратом, способен твердеть по реакции [13]:



С использованием этого принципа был разработан и запатентован способ получения композиционного водостойкого гипсового вяжущего [14].

Разработанное композиционное водостойкое гипсовое вяжущее хотя и имеет повышенную водостойкость, тем не менее относится к группе воздушных вяжущих. В строительной практике более ценятся гидравлические вяжущие, к которым относится портландцемент. Нами изучалась возможность получения на основе сталеплавильных шлаков, в том числе и рафинировочных, портландцементного клинкера. В соответствии с требованиями действующих стандартов основой портландцементного клинкера должен быть алит C₃S (3CaO·SiO₂).

Для оценки совместного влияния рафинировочного шлака и шлака ДСП на формирование в смеси гидравлически активной фазы C₃S (3CaO·SiO₂) проводили многофакторный эксперимент методом симплекс-решетчатого планирования, методика проведения которого описана выше. Распределение образовавшегося алита C₃S (3CaO·SiO₂) в области проведения эксперимента показано на рис. 9.

Результаты испытаний свидетельствуют, что максимальное количество C₃S в шлаке об-

разуется при содержании в сырьевой смеси, мас. %: шлака ДСП 66, рафинировочного шлака 17, известняка 17. При составлении плана эксперимента предполагали, что максимальное количество алита будет сформировано в области факторного плана с высоким содержанием CaO, т. е. в области с максимальным содержанием рафинировочного шлака. Результаты эксперимента показали, что максимальное количество C₃S формируется в области с максимальным содержанием шлака ДСП. Анализ изменения фазового состава шлака (см. рис. 5) позволяет объяснить полученные результаты. По данным рис. 5, в области факторного плана со значительным содержанием в шлаке SiO₂ образуется диопсид CMS₂ (CaO·MgO·2SiO₂). С повышением основности в направлении B→A (SiO₂→CaO) диопсид превращается сначала в окерманит C₂MS₂ (2CaO·MgO·2SiO₂), а потом в мервинит C₃MS₂ (3CaO·MgO·2SiO₂). На диаграмме показана зона, соответствующая составу шлака ДСП, содержащему 38 % ларнита β-C₂S и 16 % мервинита C₃MS₂. При дальнейшем повышении основности мервинит распадается с образованием белита

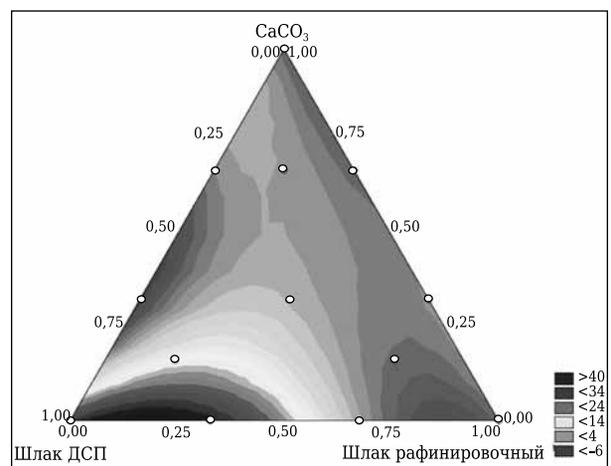


Рис. 9. Распределение образовавшегося в шлаковых продуктах плавки алита C₃S (3CaO·SiO₂) в области проведения эксперимента

γ - C_2S и периклаза MgO , в результате чего после восстановления оксидов железа шлак в основном будет состоять из белита. Известняк, растворяясь в жидкой фазе, насыщает белит C_2S до алита C_3S , поэтому при максимальном содержании шлака ДСП в сырьевой смеси в расплаве формируется максимальное количество алита C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$). Следовательно, в направлении повышения основности образуется цепочка последовательных фазовых переходов:
 $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2 + CaO \rightarrow 2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2 + CaO \rightarrow 2(2CaO \cdot SiO_2) + MgO + 2CaO \rightarrow 2(3CaO \cdot SiO_2) + MgO$, применительно к шлаку ДСП ветвь этой цепи начинается с мервинита.

Для определения возможности синтеза на основе шлака ДСП, ковшевого шлака и корректирующих добавок типового портландцементного клинкера проводили расчет сырьевой смеси на формирование в шлаке типового портландцементного клинкера с модульными характеристиками $KH-0,92$, $s-2,3$, $p-1,7$. При плавке в рудно-термической печи в металлической части плавки формируется чугун, а в шлаковой — портландцементный клинкер. На рис. 10 представлены данные качественного рентгенофазового анализа клинкера из шлака.

Количественное определение содержания фаз показало, что клинкер из шлака содержит, мас. %: C_3S 51,3, C_2S 30,1, C_3A 10,7, MgO 3,8. Суммарное содержание силикатных фаз более 80 %. Содержание MgO в клинкере не превышает требований нормативных документов (5,0 %). Клинкер из шлака не содержит железосодержащих фаз (браунмиллерита) и поэтому имеет белый цвет. Портландцемент на основе такого клинкера характеризовался нормальными сроками схватывания и пределом прочности при сжатии не ниже 40 МПа.

Средний выход чугуна и шлака зависит от содержания оксидов железа в шлаке ДСП. В условиях проведения эксперимента выход составил: 82 мас. % шлака (клинкера), 18 мас. %

чугуна. Для увеличения выхода годного чугуна в состав шихты вводили окалину, пыль от печей ДСП. Максимально достигнутый выход чугуна составил 52 мас. %. Химический состав полученного чугуна, мас. %: C 3,13, Mn 1,26, Si 0,109, P 0,036, S 0,021.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рафинировочный ковшевой шлак за счет полиморфных превращений при охлаждении расширяется в объеме. Попадая в щели футеровки печного агрегата, такой шлак может вызвать ее разрушение. Для стабилизации шлака предложено использовать добавку на основе отходов производства вторичного алюминия, изучен механизм ее воздействия на модельный шлак и синтезированный в лабораторных условиях белит. Результаты испытаний свидетельствуют, что при стабилизации синтезированного белита ОПВА работают сразу два механизма стабилизации:

- стабилизация высокотемпературной модификации белита β - C_2S ионами щелочных металлов, содержащихся в ОПВА;

- химическая стабилизация за счет преобразования белита γ - C_2S в более стабильные фазы, в случае синтезированного белита — в геленит C_2AS .

В случае модельного шлака работает только химическая стабилизация за счет увеличения содержания в шлаке майенита $C_{12}A_7$. Для усиления стабилизирующего действия ОПВА в состав брикетов на их основе вводили дополнительные стабилизаторы, обеспечивающие стабилизацию шлака во всем диапазоне содержания ОПВА в шлаке (от 10 до 18 мас. %).

Стабилизация шлаков АКП с помощью глиноземистых добавок позволяет придать им свойства шлакового щебня и минеральных вяжущих веществ. На основе шлака АКП разработано водостойкое композиционное гипсосодержащее вяжущее. На основе шлаков ДСП, АКП и технологических добавок получен портландцементный клинкер, обладающий гидравлической активностью.

Работа выполнена по государственному заданию № 0396-2015-0083.

Библиографический список

1. Дюдкин, Д. А. Производство стали на агрегате печь-ковш : монография / Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг [и др.]. — Донецк, Юго-Восток Лтд, 2003. — 300 с.
2. Янсен, Х. Износ огнеупоров посредством коррозии и окисления при производстве стали / Х. Янсен // Черные металлы. — 2006. — № 1. — С. 32–37.
3. Янсен, Х. Износ огнеупоров в результате действия термомеханических процессов и трения / Х. Янсен // Черные металлы. — 2006. — № 4. — С. 30–33.

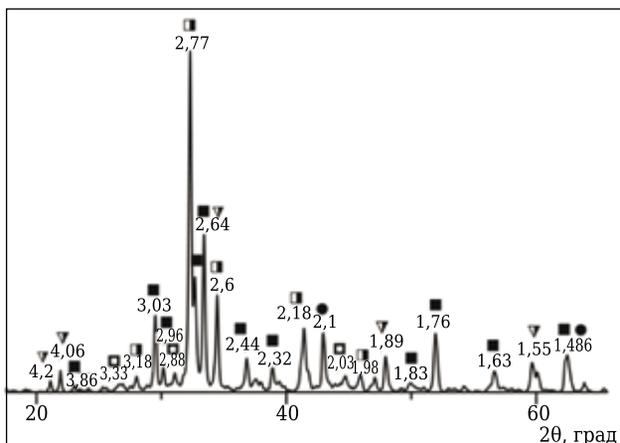


Рис. 10. Результаты качественного РФА клинкера из шлака: ▽ — C_3A ; □ — C_2S ; ■ — C_3S ; ▣ — C_2S, C_3S ; ● — MgO

4. **Тейлор, Х.** Химия цемента / Х. Тейлор ; пер с англ. — М. : Мир, 1996. — 560 с.
5. **Лейба, С. П.** Metallurgical slags and their application in construction / С. П. Лейба. — М. : Госстройиздат, 1962. — С. 134–146.
6. **Дёмин, Б. Л.** Технические решения по переработке самораспадающихся шлаков / Б. Л. Дёмин // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической информации. — 2012. — № 12. — С. 63–70.
7. **Pontikes, Y.** Options to prevent dicalcium silicate-driven disintegration of stainless steel slags / Y. Pontikes, P. T. Jones, D. Geysen, B. Blanpain // Arch. Met. Mat. — 2010. — Vol. 55. Iss. 4. — P. 1169–1172.
8. **Смирнов, Л. А.** Технологические приемы переработки шлаков в жидком состоянии / Л. А. Смирнов // Черная металлургия : Бюл. науч.-техн. информ. — 2008. — № 7. — С. 30–35.
9. **Ghosh, S. N.** The chemistry of dicalcium silicate mineral : review / S. N. Ghosh, P. B. Rao, A. K. Paul, K. Raina // J. Mat. Sci. — 1979. — Vol. 14. Iss. 7. — P. 1554–1566.
10. **Sakamoto, N.** Effect of cooling process to crystallization of stainless steel slag (development of control process of stainless steel slag dusting-1) / N. Sakamoto // Curr. Adv. in Mat. Proc. — 1996. — Vol. 9. Iss. 4. — P. 803.
11. **Михеенков, М. А.** Решение задач строительного материаловедения с использованием вычислительных систем MathCAD и STATISTICA / М. А. Михеенков. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. — 85 с.
12. **Штенгельмейер, С. В.** Электромагнитный вибрационный вискозиметр / С. В. Штенгельмейер // Заводская лаборатория. — 1964. — № 2. — С. 238–240.
13. **Михеенков, М. А.** Композиционное водостойкое гипсовое вяжущее / М. А. Михеенков // Труды VI междунар. науч.- практ. конф. Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий. — Пермь, 2012. — С. 91–96.
14. **Пат. 2505504 РФ, МПК С 04 В 28/14, С 04 В 7/14.** Композиционное водостойкое гипсовое вяжущее / Михеенков М. А., Мамаев С. А., Степанов А. И., Зуев М. В. — № 2012129933/03 ; заявл. 13.07.12 ; опубл. 27.01.14, Бюл. № 3. ■

Получено 14.11.16

© О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, М. А. Михеенков, Д. К. Егиазарьян, Д. А. Лобанов, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ICR — Международный коллоквиум по огнеупорам 18–19 октября 2017 г.
г. Аахен, Германия

Темы:

- Сырье
- Технология переработки
- Энергия
- Логистика
- Огнеупоры службы футеровки
- Защита окружающей среды
- Ответственность производителя
- Управление качеством

WWW.ic-refractories.eu



К. т. н. **Н. А. Митина** (✉), д. т. н. **В. А. Лотов**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

УДК 666.762.3:66.092

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА, СВОЙСТВ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Установлено влияние режима термообработки на гидравлическую активность магниезиальных материалов по тепловыделению при взаимодействии с водой. Процессы гидратации протекают эффективно, структуры твердения образуются после прокаливания исходных магниезиальных материалов в диапазоне 500–800 °С. Поэтому при получении гидравлически активного оксида магния, используемого для изготовления магниезиального вяжущего, необходимо проводить обжиг магниезиальных материалов независимо от их природы при низких или умеренных температурах в диапазоне 500–800 °С. Изменение структуры и свойств магниезиальных материалов при термообработке оказывает большое влияние на процессы спекания огнеупорных материалов.

Ключевые слова: магниезиальные материалы, оксид магния, термообработка, удельная поверхность, фазовый состав, гидравлическая активность.

ВВЕДЕНИЕ

На основе магниезиальных материалов получают магниезиальные порошки, по составу являющиеся оксидом магния MgO с небольшим количеством примесей. В зависимости от условий термической обработки и качества исходных материалов порошки обладают различными физико-химическими свойствами и, соответственно, применяются в различных отраслях промышленности.

Наиболее массовым продуктом переработки магниезиальных материалов как природного, так и искусственного происхождения является «намертво» обожженный при температуре выше 1000 °С периклаз, на его долю приходится 70–75 % мирового производства магниезиальных порошков. Доля каустического магнезита, для получения которого магниезиальные породы обжигают при 600–800 °С, составляет 25–30 %. Плавленный периклаз получают путем обжига до спекания при 1600–1650 °С или электроплавкой природных магниезиальных материалов. Это уникальный высокоогнеупорный продукт, выпускаемый в количестве 3–5 % от всего производства магниезиальных порошков [1].

Использование магниезиальных материалов определяется их свойствами, приобретенными в процессе термической обработки. Перикла-

зовые порошки применяются при получении высококачественных огнеупоров для футеровки промышленных высокотемпературных печей сталеплавильного производства. Термообработка в пределах 500–800 °С предполагает получение высокоактивного оксида магния, способного взаимодействовать с водой и другими затворителями, что определяет его использование в качестве основного компонента при получении огнеупорного бетона и других строительных материалов.

Изучение изменения физико-химических свойств при нагревании природных магниезиальных материалов имеет большое значение при получении готовых продуктов, таких как магнезитовые, хромомagneзитовые и шпинелидные огнеупорные материалы, а также композиционные материалы строительного назначения с набором уникальных свойств [2, 3]. Исследование поведения магниезиальных материалов различной природы в процессе термообработки является основной целью настоящей работы.

Исследовано изменение фазового состава, истинной плотности, удельной поверхности и гидравлической активности после обжига при 400–1000 °С основных видов высокомагнезиальных материалов — бруситовой породы, магнезитовой породы разного кристаллического генезиса и гидромагнезитовой породы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований использовали высокомагнезиальные породы, традиционно используемые в металлургических, огнеупор-



Н. А. Митина
E-mail: mitinana@tpu.ru

ных и строительных технологиях. Это крупнокристаллический магнезит $MgCO_3$ Савинского месторождения (Иркутская область), аморфный магнезит $MgCO_3$ и гидромагнезиальная порода Халиловского месторождения (Оренбургская область) и брусит $Mg(OH)_2$ Кульдурского месторождения (Еврейская автономная область). Химический и минеральный составы магнезиальных пород представлены в табл. 1.

Савинские магнезиты представляют собой крупнокристаллическую породу с радиальнолучистой «звездчатой» текстурой. Примесные породы могут быть представлены мелкозернистым доломитом, тальком, хлоритом, кварцем, пиритом, но преимущественно содержат первичные доломиты [1], что подтверждается рентгенофазовым анализом.

Халиловский магнезит представлен аморфной скрытокристаллической разновидностью $MgCO_3$ и отличается наличием серпентинизированных магнезитов. Гидромагнезит образуется при выветривании ультраосновных пород — магнезитов, располагается в виде прожилков и корок в серпентинитах и представляет собой серую высокодисперсную рыхлую породу. Повышенное содержание (до 9,86 мас. %) оксида кремния в химическом составе магнезиальных пород Халиловского месторождения (см. табл. 1) объясняется наличием серпентиновых пород.

Брусит $Mg(OH)_2$ Кульдурского месторождения представлен тремя видами текстурно-структурных типов бруситов: псевдоморфными (волокнисто-зернистыми), колломорфными (волокнисто-полосчатыми) и автоморфными (пластинчато-зернистыми). Примесными минералами в бруситовой породе являются доломит, кальцит и серпентинит.

Термическую обработку предварительно тонкоизмельченных проб магнезиальных пород проводили при 400, 500, 600, 800 и 1000 °С с выдержкой при конечной температуре в течение 1 ч. После термообработки исходные и обожженные пробы подвергали физико-химическому анализу. Были проведены рентгенофазовый и термический анализы, определены истинная плотность и удельная поверхность проб.

Термоанализ (ТГ/ДСК/ДТА) проводили с помощью термоанализатора для синхронного термического анализа «NETZSCH STA 449 F3 Jupiter» в Центре управления научно-исследовательским оборудованием Томского политехнического университета. Исследование проводили до 1000 °С в воздушной среде.

Фазовый состав исходных и обожженных проб определяли с помощью рентгенофазового анализа. Рентгенограммы получены на рентгеновском дифрактометре «Shimadzu XRD 7000» при излучении Cu-анода, шаге сканирования 0,05°/мин, времени измерения интенсивности в точках сканирования 0,5 с, напряжении на трубке 40 кВ, силе тока 30 мА.

Удельную поверхность каустических магнезиальных порошков определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием БЭТ-анализатора удельной поверхности МЭТА СОРБИ-М. Высокие значения удельной поверхности связаны с влиянием на этот показатель не только размеров частиц, но и дефектности их поверхности и структуры, приобретаемой в процессе термообработки.

Истинную плотность определяли пикнометрическим способом [4].

Для исследования тепловыделения при взаимодействии прокаленных магнезиальных материалов с водой использовали дифференциальный микрокалориметр, с двумя калориметрическими ячейками; обе ячейки снабжены единичными датчиками температуры, которые подключены через аналоговый цифровой преобразователь к компьютеру и фиксируют тепловыделение во времени [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты термического анализа проб магнезиальных пород, показывающие температуры фазовых переходов в ходе повышения температуры, представлены на рис. 1.

На рис. 2 и 3 изображены зависимости изменения удельной поверхности и истинной плотности от температуры термообработки проб магнезиальных пород.

Химический и минеральный составы магнезиальных пород

Месторождение	Магнезиальная порода	Содержание оксидов, мас. %							Минеральный состав
		MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	Δm _{прк}	
Савинское	Крупнокристаллический магнезит	46,88	1,60	0,59	0,85	0,80	0,29	50,26	Магнезит $MgCO_3$, доломит $MgCO_3 \cdot CaCO_3$
Халиловское	Аморфный магнезит	48,22	6,16	0,09	2,33	1,03	0,05	43,12	Магнезит $MgCO_3$, клинохризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
	Гидромагнезиальная порода	43,32	9,86	0,69	0,52	1,17	0,029	45,33	Гидромагнезит $Mg_3(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$, дипингит $Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$, несквигонит $Mg(HCO_3)(OH) \cdot 2H_2O$, клинохризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Кульдурское	Брусит	63,91	1,90	2,00	1,06	0,19	–	30,94	Брусит $Mg(OH)_2$, доломит $MgCO_3 \cdot CaCO_3$, клинохризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$

Аморфный магнезит

Термическая обработка аморфного магнезита приводит к образованию высокоактивного оксида магния с дефектной структурой, что соответствует эндотермическому эффекту при 579,2 °С (см. рис. 1). При 702,3 °С происходит декарбонизация более крупных частиц MgCO₃. Температура 817,1 °С соответствует температуре перекристаллизации клинохризотила в форстерит. При декарбонизации аморфного магнезита в интервале 500–700 °С образуется высокоактивный свободный оксид магния с дефектной структурой, о чем свидетельствуют повышенные до 48,5 м²/г значения удельной поверхности и низкая истинная плотность (2,69 г/см³). Следует отметить, что получение активного, так называемого каустического оксида магния из аморфного магнезита происходит при более низких температурах (500–700 °С) по сравнению с необходимыми для получения крупнокристаллических магнезитов (600–800 °С). Это связано с особенностью строения аморфного магнезита, которое имеет скрытокристаллический характер с мелкими кристаллами, что позволяет проводить декарбонизацию частиц аморфного MgCO₃ при более низкой температуре.

Данные термического анализа проб аморфного магнезита подтверждаются рентгенофазовым анализом (рис. 4). Так, при обжиге при температуре 600 °С появляется оксид магния, который частично имеет высокодефектную псевдоморфозную структуру MgCO₃, что согласуется с данными работы [7]. Повышение температуры приводит к формированию структуры MgO, уменьшению удельной поверхности и росту кристалла, что подтверждают данные, приведенные в работах [8, 9]. Кристаллическая фаза клинохризотила при 800 °С проходит перекристаллизацию с образованием форстерита, что фиксируется на термограммах экзотермическим эффектом при 820 °С.

Магнезит

Термоанализ пробы магнезита (см. рис. 1) показывает, что при 606,5–674,8 и 807,2 °С происходит декарбонизация с образованием оксида магния. В указанном диапазоне температур должен получаться каустический оксид магния, отличающийся более низкими показателями преломления, увеличенными параметрами элементарной ячейки и более низкой плотностью [7]. Это подтверждается данными определения удельной поверхности и истинной плотности (см. рис. 2, 3). Так, в диапазоне 600–800 °С проба прокаленного магнезита имеет наиболее высокую удельную поверхность (до 24,1 м²/г) и низкую истинную плотность (2,76 г/см³). При повышении температуры обжига удельная поверхность резко снижается, а истинная плотность

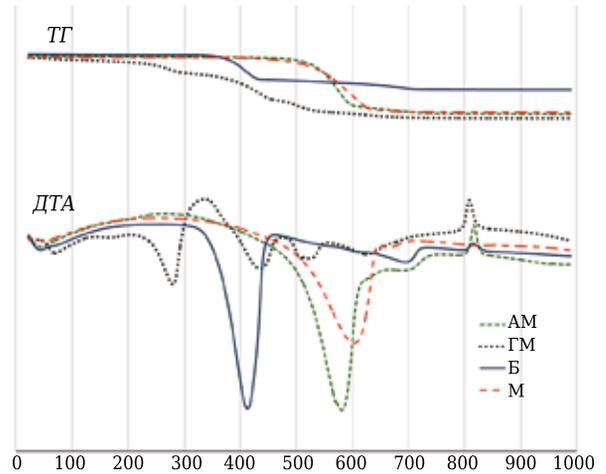


Рис. 1. Термограммы магнезиальных пород: ДТА — дифференциально-термическая кривая; ТГ — термогравиметрическая кривая; АМ — аморфный магнезит; ГМ — гидромагнезит; Б — брусит; М — магнезит

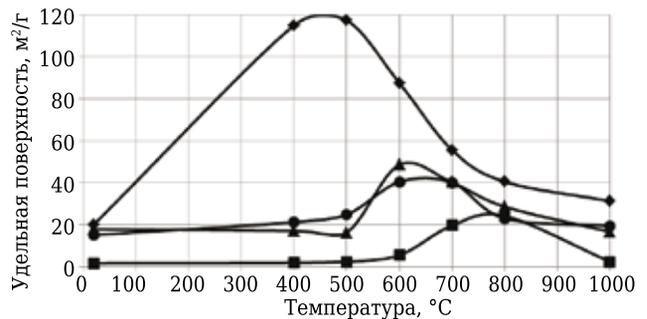


Рис. 2. Изменение удельной поверхности проб магнезиальных пород при термообработке [6]: ◆ — брусит; ■ — магнезит; ▲ — аморфный магнезит; ● — гидромагнезит

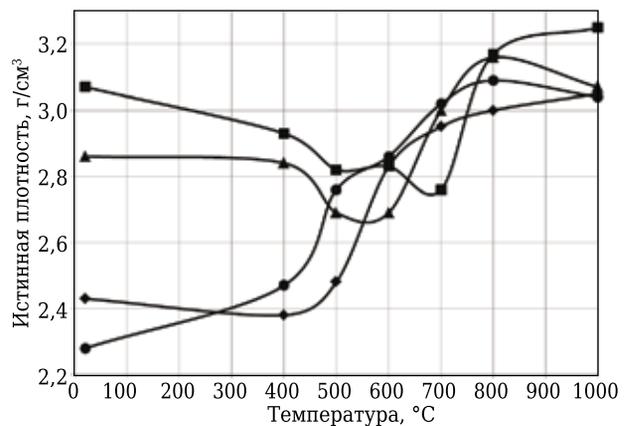


Рис. 3. Изменение истинной плотности проб магнезиальных пород при термообработке [6]: ◆ — брусит; ■ — магнезит; ▲ — аморфный магнезит; ● — гидромагнезит

растет с образованием более плотных частиц MgO с более совершенной кубической структурой периклаза.

Рентгенофазовым анализом (рис. 5) фиксируется образование кристаллической фазы

оксида магния только при 800 °С, хотя по термограмме процесс декарбонизации начинается при 605 °С. Это связано с тем, что при 600–700 °С

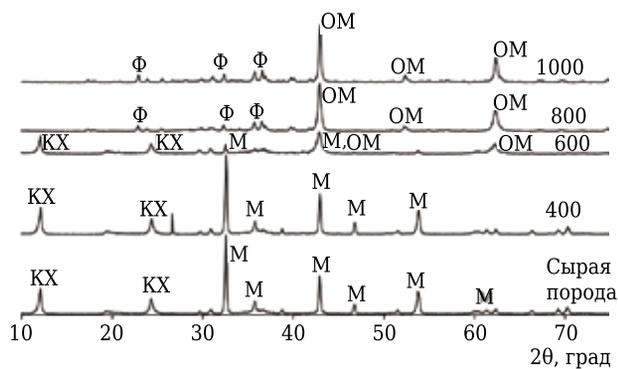


Рис. 4. Рентгенограммы аморфного магнезита, исходного и прокаленного при разных температурах (указаны на рентгенограммах, °С): КХ — клинохризотил; М — магнезит; Ф — форстерит; ОМ — оксид магния

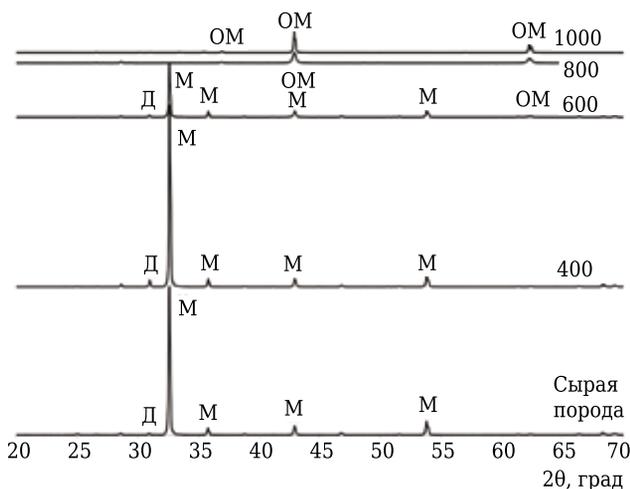


Рис. 5. Рентгенограммы магнезита, исходного и прокаленного при разных температурах (указаны на рентгенограммах, °С): Д — доломит; М — магнезит; ОМ — оксид магния

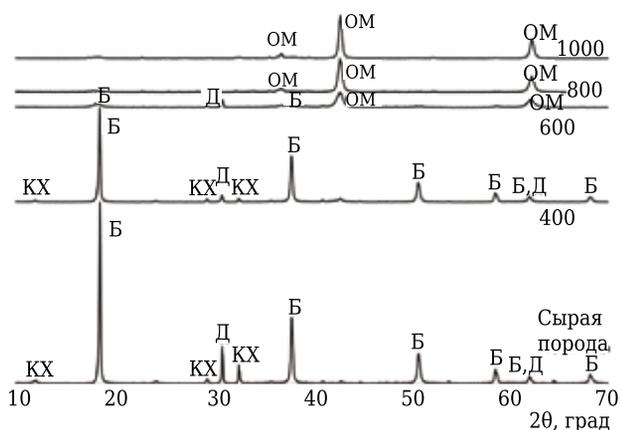


Рис. 6. Рентгенограммы брусита, исходного и прокаленного при разных температурах (указаны на рентгенограммах, °С): Б — брусит; Д — доломит; КХ — клинохризотил; ОМ — оксид магния

в процессе декарбонизации получается MgO с псевдомагнезитовой структурой [7, 9].

Брусит

Закономерностям термической диссоциации природного и синтетического гидроксида магния и получения из него оксида магния посвящено много работ [3, 9–12], в том числе и по оптимизации процесса обжига брусита [11]. При прокаливании бруситовой породы основной эффект наблюдается при 410,9 °С (см. рис. 1), что соответствует дегидратации брусита Mg(OH)₂. При обжиге брусита при 400–500 °С образуется высокоактивный оксид магния с дефектной структурой и удельной поверхностью 114–117 м²/г (см. рис. 2). Кроме того, на термограмме обнаруживаются два небольших эндотермических эффекта — при 614,5 и 696,9 °С, которые соответствуют декарбонизации примесных магнезита MgCO₃ и доломита MgCO₃·CaCO₃. Экзотермический пик с максимумом при 819,4 °С свидетельствует о наличии в бруситовой породе незначительного количества клинохризотила, который при данной температуре превращается в форстерит. При температурах выше 500 °С увеличивается истинная плотность до 3,05 г/см³ (1000 °С) и снижается удельная поверхность до 31,1 м²/г (1000 °С). Это связано с совершенствованием структуры кристаллов MgO, их уплотнением и увеличением размеров.

Изменение фазового состава при нагревании представлено на рис. 6. При прокаливании бруситовой породы при 400 °С интенсивность пиков Mg(OH)₂ снижается и они расширяются, что свидетельствует о начале процесса дегидратации с нарушением структуры частиц брусита. После обжига при 600 °С пики, соответствующие Mg(OH)₂, практически исчезают, наблюдается появление уширенных рефлексов MgO с несовершенной дефектной структурой псевдобрусита. Дальнейшее повышение температуры обработки бруситовой породы приводит к совершенствованию структуры кристаллов оксида магния.

Гидромагнезит

На термограмме пробы гидромагнезита (см. рис. 1) наблюдается большое количество различных эндотермических эффектов, связанных с разложением исходных минеральных фаз гидромагнезитовой породы, аналогично данным работ [13–17]. Этими фазами по данным рентгенофазового анализа (рис. 7) являются гидромагнезит Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·4H₂O, дипингит Mg₅(CO₃)₄(OH)₂·5H₂O и несквегонит MgCO₃·3H₂O. Так, при 220–320 °С происходит потеря кристаллизационной воды из гидрокарбонатов магния. За этим следует процесс отщепления гидроксильной группы при 436,3 °С. В диапа-

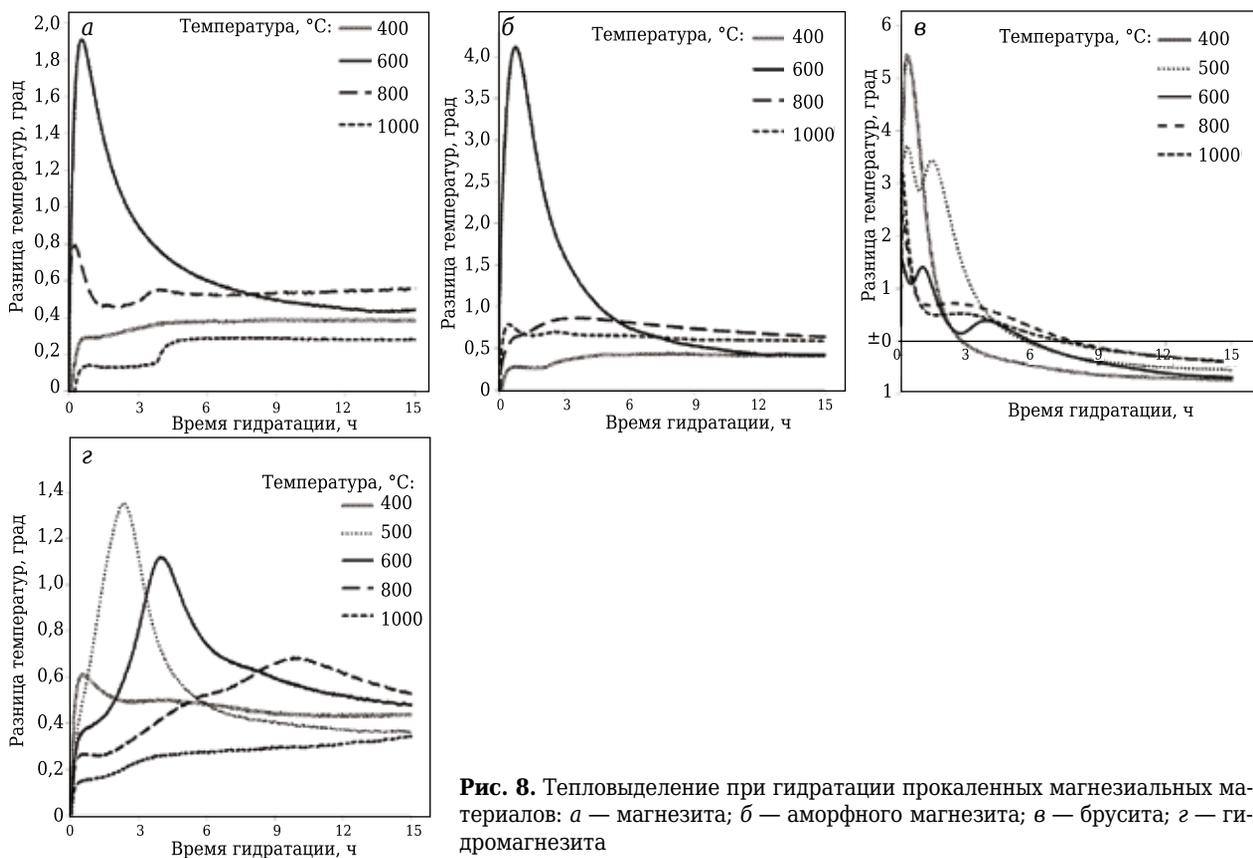


Рис. 8. Тепловыделение при гидратации прокаленных магниевых материалов: а — магнезита; б — аморфного магнезита; в — брусита; г — гидромагнезита

Зависимость интенсивности тепловыделения при гидратации от природы исходных магниевых материалов хорошо прослеживается по рис. 9. Здесь представлены термокинетические кривые с максимальным значением тепловыделения, что в случае с прокаленным бруситом при 400 °С и аморфным магнезитом при 600 °С соответствует наибольшей удельной поверхности и дефектности структуры (см. рис. 2). Обожженный при 600 °С крупнокристаллический магнезит гидромагнезит, прокаленный при 500 °С, гидратируют с наибольшим выделением тепла независимо от величины удельной поверхности (см. рис. 2), что связано с характером кристаллической структуры магнезита и ступенчатым разложением при обжиге гидромагнезита.

Температура получения оксида магния, как уже было показано выше, играет основополагающую роль в формировании его свойств, в том числе гидравлической активности. Низкие температуры обработки (около 400 °С) дают низкую гидравлическую активность магниевых материалов на основе магнезитов и гидромагнезита (см. рис. 8, а, б, г). Повышение температуры до величин более 800 °С влечет за собой снижение гидравлической активности независимо от природы магниевых материалов, что связано с упорядочиванием кристаллической струк-

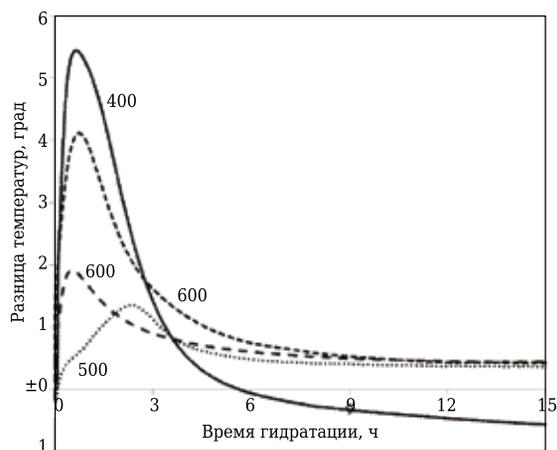


Рис. 9. Наибольшее тепловыделение при гидратации прокаленных магниевых материалов. На кривых указана температура, °С

туры MgO и уменьшением его адсорбционных свойств [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что для получения гидравлически активного оксида магния с целью использования его как основного компонента магниевых вяжущих и в качестве связую-

шего в некоторых огнеупорах необходимо проводить обжиг исходных магнезиальных материалов при низких или умеренных температурах (500–800 °С). При данных режимах термообработки оксид магния приобретает дефектную кристаллическую структуру и развитую поверхность с высоким запасом поверхностной энергии. Термическая обработка при более высоких температурах дает практически бездефектные

кристаллы MgO с кубической структурой периклаза, являющегося компонентом огнеупорных материалов, таких как хроммагнезитовые, периклазовые и шпинелидные огнеупоры. Наличие высокоактивных тонкодисперсных частиц в формовочных смесях будет способствовать получению более плотного сырца и интенсифицировать процессы высокотемпературного твердофазного спекания изделий.

Библиографический список

1. **Сиваш, В. Г.** Плавленный периклаз / В. Г. Сиваш, В. А. Перепелицин, Н. А. Митюшов. — Екатеринбург : Уральский рабочий, 2001. — 584 с.
2. **Галимов, Г. Г.** Исследование влияния разницы температур разложения исходных соединений до оксидов магния и алюминия на интенсивность реакции образования шпинели / Г. Г. Галимов, А. Ю. Сидоров, А. А. Никифоров // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 9. — С. 21–26.
3. **Зырянова, В. Н.** Магнезиальные вяжущие вещества из отходов обогащения брусита / В. Н. Зырянова, Г. И. Бердов // Строительные материалы. — 2006. — № 4. — С. 61–64.
4. **Лотов, В. А.** Технология материалов на основе силикатных дисперсных систем : уч. пособие / В. А. Лотов, В. А. Кутугин. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 211 с.
5. **Пат. 2475714 РФ.** Дифференциальный микрокалориметр и способ измерения тепловыделения / Иванов Ю. А., Лотов В. А. — № 2010139028/28 ; заявл. 22.09.10 ; опубл. 20.02.13, Бюл. № 5.
6. **Mitina, N. A.** Influence of heat treatment mode of various magnesia rocks on their properties / N. A. Mitina, V. A. Lotov, A. V. Sukhushina // Procedia Chem. — 2015. — Vol. 15. — P. 213–218.
7. **Корнеев, В. И.** Особо быстротвердеющее магнезиальное вяжущее. Ч. 1. / В. И. Корнеев, А. П. Сизоненко, И. И. Медведева, Е. П. Повиков // Цемент. — 1997. — № 2. — С. 25–28.
8. **Lu, T.** An experimental study on thermal decomposition behavior of magnesite / T. Lu, T. Arash, Yu Jianglong // J. Therm. Anal. Calorim. — 2014. — Vol. 118. — P. 1577–1584.
9. **Кащеев, И. Д.** Исследование термического разложения природных и синтетических соединений магния / И. Д. Кащеев, К. Г. Земляной, В. М. Устьянцев, Е. А. Воскресова // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 28–35.
10. **Kashcheev, I. D.** Study of thermal decomposition of natural and synthetic magnesium compounds / I. D. Kashcheev, K. G. Zemlyanoi, V. M. Ust'yantsev, E. A. Voskretsova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 522–529.
11. **Вайвад, А. Я.** Магнезиальные вяжущие вещества / А. Я. Вайвад. — Рига : Зинатне, 1971. — 331 с.
12. **Chernykh, T. N.** Temperature reduction during brucite-based magnesia cement production / T. N. Chernykh, A. A. Orlov, L. Y. Kramar [et al.] // Mag. Civil Eng. — 2013. — Vol. 38, № 3. — P. 29–35.
13. **Nahdi, K.** Mg(OH)₂ dehydroxylation: a kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA) / K. Nahdi, F. Rouquerol, A. M. Trabelsi // Solid State Sciences. — 2009. — Vol. 11, № 5. — P. 1028–1034.
14. **Hollingbery, L. A.** The thermal decomposition of natural mixtures of huntite and hydromagnesite / L. A. Hollingbery, T. R. Hullb // Thermochim. Acta. — 2012. — Vol. 528. — P. 45–52.
15. **Hongrui, Ren.** Thermal characterization and kinetic analysis of nesquehonite, hydromagnesite, and brucite, using TG-DTG and DSC techniques / R. Hongrui, Ch. Zhen, W. Yulong [et al.] // J. Therm. Anal. Calorim. — 2014. — Vol. 115. — P. 1949–1960.
16. **Botha, A.** DTA and FT-IR analysis of the rehydration of basic magnesium carbonate / A. Botha, C. A. Strydom // J. Therm. Anal. Calorim. — 2003. — Vol. 71. — P. 987–995.
17. **Unluer, C.** Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates using thermal analysis / C. Unluer, A. Al-Tabbaa // J. Therm. Anal. Calorim. — 2014. — Vol. 115. — P. 595–607.
18. **Unluer, C.** Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements / C. Unluer, A. Al-Tabbaa // Cement and Concrete Research. — 2013. — Vol. 54. — P. 87–97.
19. **Hüttig, G. F.** Beiträge zur Kenntnis der Oxyhydrate. XVIII. Zur Kenntnis des Systems Magnesiumoxyd/Wasser / G. F. Hüttig, W. Frankenstein // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. — 1930. — Bd 185. — S. 403–412.
20. **Лотов, В. А.** Движущая сила процессов гидратации и твердения цемента / В. А. Лотов // Сухие строительные смеси. — 2012. — № 6. — С. 33–35.
21. **Черных, Т. Н.** Физико-химические закономерности получения энергоэффективных магнезиальных вяжущих веществ с улучшенными характеристиками и материалов на их основе : автореферат дис. ... докт. техн. наук : 05.17.11. — Томск, 2016. — 42 с. ■

Получено 24.01.17

© Н. А. Митина, В. А. Лотов, 2017 г.

Д. т. н. **В. В. Кузин**¹ (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**¹, к. т. н. **Предраг Дашич**²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² SaTCIP Publisher Ltd, г. Врнячка Баня, Сербия

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ СЛОЯМИ TiC/TiN-ПОКРЫТИЯ, НАНЕСЕННОГО НА НИТРИДНУЮ КЕРАМИКУ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Установлены основные закономерности напряженного состояния границы между слоями двухслойного TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием сосредоточенной и распределенной силы. Определено влияние материала основного структурного элемента керамики на напряжения, формируемые в контактирующих подслоях TiC/TiN-покрытия, под действием силовых нагрузок.

Ключевые слова: нитридная керамика, покрытие, слой, граница, напряжения, силовая нагрузка.

ВВЕДЕНИЕ

Присутствие тонких слоев из тугоплавких соединений на поверхности керамики благоприятно влияет на эксплуатационные характеристики керамических инструментов, причем наиболее эффективны многослойные покрытия [1–5]. Несмотря на относительную простоту этого метода совершенствования инструментов, ряд его аспектов остается недостаточно изученным. Это связано с многофакторностью процесса разрушения покрытия на керамике, что определяет повышенный научный интерес к его исследованию с использованием экспериментальных и расчетных методик.

Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что правильный выбор свойств покрытий и оптимизация технологических параметров их нанесения обеспечивают повышение стойкости керамических инструментов [6]. На выход этих инструментов из работоспособного состояния значительное влияние оказывает процесс разрушения покрытия [7]. Авторы работы [8] выделили основные причины разрушения покрытий на керамике в разных условиях эксплуатации. Установлено, что одной из основных причин разрушения покрытий и отслоения их от керамики являются высокие напряжения, образующиеся на границах между керамикой и покрытием, а также между слоями покрытия, под действием нагрузок, ге-

нерируемых процессом резания [9]. На основе экспериментальных результатов исследования роста трещин в покрытиях на рабочих поверхностях инструментов создан метод расчета циклической трещиностойкости многослойных покрытий для выбора их оптимальных параметров [10].

С использованием метода микроструктурного моделирования деформационных процессов в структурно-неоднородных средах выявлены основные закономерности влияния покрытия из нитрида титана на напряженное состояние оксидно-карбидной керамики под действием силовых, тепловых и комбинированных нагрузок [11–14]. Установлено, что TiN-покрытие толщиной 5 мкм принципиально не изменяет схему деформирования структурных элементов керамики, но уменьшает напряжения в их поверхностном слое и сокращает диапазон их изменения.

Роль теплопроводности, температурного коэффициента линейного расширения, коэффициента удельной теплоемкости, модуля упругости, коэффициента Пуассона и плотности покрытия в процессе формирования напряжений в керамике определена в работе [15]. Результаты исследования [16] свидетельствуют об уменьшении и стабилизации напряжений в поверхностных слоях структурных элементов оксидно-карбидной керамики при увеличении толщины покрытия из нитрида титана. Толщина TiC-покрытия также позитивно влияет на напряженно-деформированное состояние нитридной керамики при нагреве и охлаждении [17]. Результаты численных экспериментов убедительно доказывают возможность управления напряженным состоянием поверхностного слоя



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

разных керамических материалов за счет изменения свойств и толщины покрытия.

Другим важным аспектом анализируемой проблемы является напряженно-деформированное состояние границ в композиционном материале керамика – покрытие. Частично вопрос рассмотрен в работах [18, 19], выполненных с использованием оригинальной методики численных экспериментов. Выявлено значительное влияние состава нитридной керамики на напряженное состояние границы между ней и покрытием из нитрида титана под действием разных нагрузок. Установлено, что значительно меньшие напряжения образуются на границе зерно Si_3N_4 – TiN -покрытие, чем на границе зерно TiC – TiN -покрытие, что вносит определенную ясность в начальный этап разрушения покрытия за счет появления структурных дефектов на границе керамика – покрытие. Однако отсутствие сведений о напряженном состоянии границы между слоями в многослойных покрытиях, нанесенных на керамику, затрудняет анализ процесса разрушения структурно сложных композиционных материалов.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния двухслойного TiC/TiN -покрытия, нанесенного на нитридную керамику, на напряженное состояние границы между его слоями под действием силовых нагрузок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Численные исследования напряженного состояния границы между слоями двухслойного покрытия выполнены с использованием методики, созданной в работе [18]. При разработке расчетной схемы принято допущение — граница между слоями TiC и TiN двухслойного покрытия является бесконечно узкой областью. Расчетная схема, построенная на основе микроструктурной модели [20], с выделенными контрольными точками (КТ) показана на рис. 1. В этой схеме зерно эллипсной формы ($ab = 3 \times 2$ мкм) заделано в матрицу через межзеренную фазу тол-

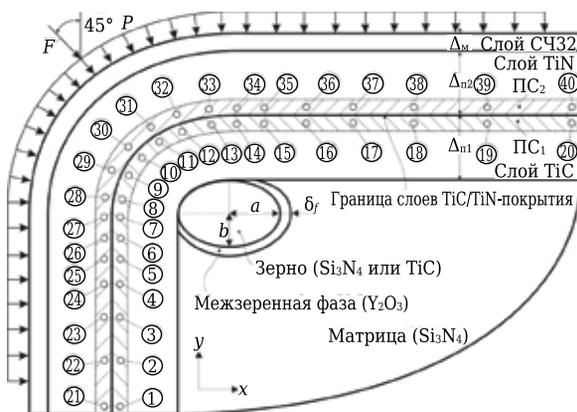


Рис. 1. Расчетная схема и расположение КТ

щиной $\delta_f = 0,2$ мкм. На свободных поверхностях этих структурных элементов керамики последовательно расположены слои TiC и TiN толщиной 5 мкм (толщина двухслойного TiC/TiN -покрытия 10 мкм) и слой чугуна СЧ32 толщиной 1 мкм.

Численные эксперименты выполняли с использованием автоматизированной системы термочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [21]. Исследовали две системы керамики на основе нитрида кремния: система № 1 — Si_3N_4 (зерно)– Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица); система № 2 — TiC (зерно) – Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица). КТ, выделенные по методике [21], были симметрично расположены в контактирующих подслоях слоя TiC (PC_1) — KT1-KT20 и в подслое слоя TiN (PC_2) — KT21-KT40 . Свойства тугоплавких соединений и СЧ32, необходимые для расчетов, приведены в работе [21]. К наружному слою прикладывали сосредоточенную силу $F = 0,1$ Н под углом 45° и распределенную силу $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па.

Структурную неоднородность напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в PC_1 и PC_2 характеризовали следующими статистическими характеристиками: наибольшее $\sigma_{\text{макс}}$, наименьшее $\sigma_{\text{мин}}$ и среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значения, диапазон Σ изменения, стандартное отклонение s и число N изменения знака. Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN -покрытия оценивали характеристиками, рассчитанными как среднее арифметическое $\sigma_{\text{макс}}$, $\sigma_{\text{мин}}$, $\sigma_{\text{ср}}$, Σ и s , интенсивности напряжений σ_i в PC_1 и PC_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов напряжений в PC_1 и PC_2 двух систем под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45° , свидетельствуют о незначительном влиянии вида системы на их напряженное состояние — кривые σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i для PC_1 и PC_2 двух разных систем имеют практически идентичный вид (рис. 2).

Кривые σ_{11} и σ_{12} для PC_1 систем № 1 и 2 имеют сглаженный вид, причем наибольшие значения σ_{11} зафиксированы в KT18 , а наибольшие значения σ_{12} — в KT11 (рис. 2, а). Вид кривых σ_{22} и σ_i для PC_1 систем № 1 и 2 значительно более нестабилен, наблюдаются максимумы в KT9 , которая находится на траектории приложения сосредоточенной силы. Также видно, что значения напряжений σ_{22} и σ_i на вертикальном участке PC_1 (KT1-KT10) значительно превышают значения напряжений на горизонтальном участке этого подслоя. Кривые, характеризующие изменение σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в PC_2 систем № 1 и 2, имеют максимальные значения напряжений в KT31 , KT30 , KT31 и KT30 (рис. 2, б).

Установлено, что в PC_1 системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются

напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 132 МПа — от -57 (КТ11) до 75 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср} = 9$ МПа, стандартном отклонении $s = 37$ МПа и числе изменений знака $N = 1$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 391 МПа — от 32 (КТ11) до -359 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = -135$ МПа, $s = 145$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 156 МПа — от -14 (КТ20) до 142 МПа (КТ11) при $\sigma_{ср} = 49$ МПа, $s = 36$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 316 МПа — от 51 (КТ20) до 367 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = 195$ МПа и $s = 109$ МПа.

В ПС₁ системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 119 МПа — от -51 (КТ11) до 78 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср} = 10$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 384 МПа — от 26 (КТ11) до -358 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = -131$ МПа, $s = 140$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 163 МПа — от -14 (КТ20) до 149 МПа (КТ11) при $\sigma_{ср} = 52$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 330 МПа — от 41 (КТ20) до 371 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = 191$ МПа и $s = 110$ МПа.

В ПС₂ системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 182 МПа — от 78 (КТ29) до -104 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 25$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, б). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 475 МПа — от -6 (КТ39) до -481 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = -171$ МПа, $s = 144$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 225 МПа — от -33 (КТ38) до 192 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 22$ МПа, $s = 61$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 521 МПа — от 49 (КТ40) до 570 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = 207$ МПа и $s = 152$ МПа.

В ПС₂ системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 178 МПа — от 80 (КТ29) до -98 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 27$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 1$. Диапазон изменения напряжений σ_{22} составляет 473 МПа — от -5 (КТ40) до -478 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = -166$ МПа, $s = 142$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 234 МПа — от -37 (КТ38) до 197 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 23$ МПа, $s = 63$ МПа и $N = 1$. Интенсив-

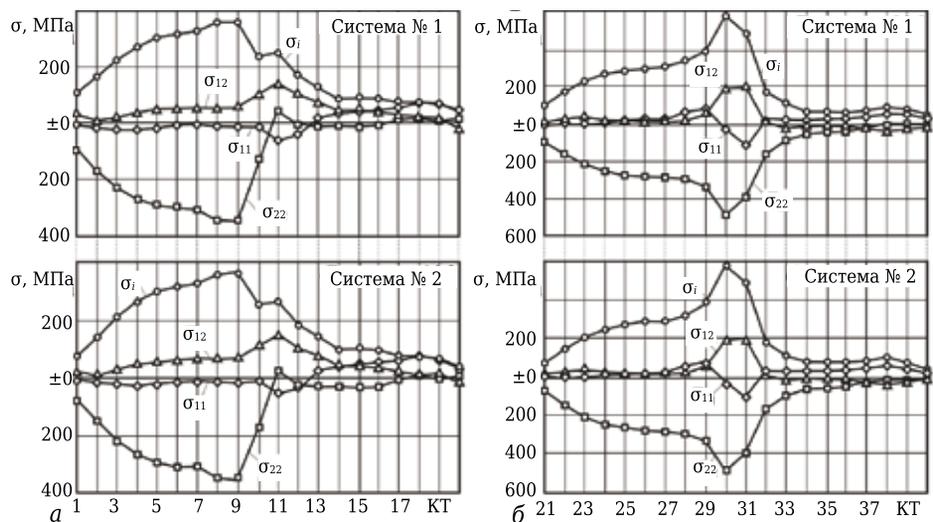


Рис. 2. Напряжения в ПС₁ (а) и ПС₂ (б) TiC/TiN-покрытия под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45°

ность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 535 МПа — от 40 (КТ40) до 575 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = 204$ МПа и $s = 152$ МПа.

Анализ приведенных данных показывает, что значения диапазона изменения Σ , $\sigma_{макс}$ и s напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Значения $\sigma_{ср}$ напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_i в ПС₁ также ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Однако значения $\sigma_{ср}$ напряжений σ_{12} в ПС₁ выше по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2.

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45° , определяется следующими характеристиками $\Sigma^{гр} = 418,5$ и $432,5$ МПа, $\sigma_{макс}^{гр} = 468,5$ и 473 МПа, $\sigma_{мин}^{гр} = 50$ и $40,5$ МПа, $\sigma_{ср}^{гр} = 201$ и $197,5$ МПа и $s^{гр} = 130,5$ и 131 МПа для керамики систем № 1 и 2 соответственно. При практическом совпадении $\Sigma^{гр}$, $\sigma_{макс}^{гр}$, $\sigma_{ср}^{гр}$ и $s^{гр}$ для двух систем значение $\sigma_{мин}^{гр}$ для керамики системы № 1 выше на 25 % по сравнению с аналогичным показателем для керамики системы № 2.

Результаты численных расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ и ПС₂ под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па для систем № 1 и 2 показаны на рис. 3. Видно, что в этом случае материал зерна также не влияет на характер кривых для ПС₁ и ПС₂.

Установлено, что в ПС₁ системы № 1 (рис. 3, а) формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 680 МПа — от 40 (КТ10) до -640 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = -66$ МПа, $s = 151$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 349 МПа — от 83 (КТ19) до -266 МПа (КТ2) при

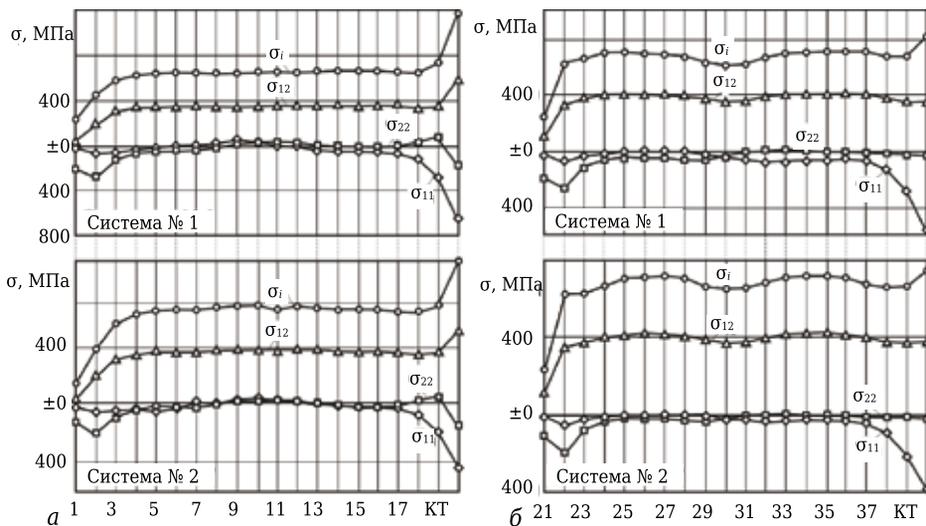


Рис. 3. Напряжения в ПС₁ (а) и ПС₂ (б) TiC/TiN-покрытия под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

$\sigma_{cp} = -33$ МПа, $s = 87$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 523 МПа — от 61 (КТ1) до 584 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 352$ МПа, $s = 93$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 948 МПа — от 214 (КТ1) до 1165 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 632$ МПа и $s = 164$ МПа.

В ПС₁ системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 488 МПа — от 40 (КТ10) до -448 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = -50$ МПа, $s = 107$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 272 МПа — от 56 (КТ19) до -216 МПа (КТ2) при $\sigma_{cp} = -27$ МПа, $s = 69$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 487 МПа — от 41 (КТ1) до 528 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 357$ МПа, $s = 94$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 855 МПа — от 141 (КТ1) до 996 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 631$ МПа и $s = 155$ МПа.

В ПС₂ системы № 1 (см. рис. 3, б) формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 568 МПа — от 13 (КТ28) до -555 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -63$ МПа, $s = 131$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 260 МПа — от 17 (КТ33) до -243 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -36$ МПа, $s = 66$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 309 МПа — от 102 (КТ21) до 411 МПа (КТ36) при $\sigma_{cp} = 372$ МПа, $s = 67$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 577 МПа — от 247 (КТ21) до 824 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 664$ МПа и $s = 107$ МПа.

В ПС₂ системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 387 МПа — от 6 (КТ28) до -381 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -46$ МПа, $s = 90$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 203 МПа — от 6 (КТ32) до -197 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -28$ МПа, $s = 49$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 305 МПа — от 110 (КТ21) до 415 МПа (КТ34) при

$\sigma_{cp} = 377$ МПа, $s = 66$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 524 МПа — от 223 (КТ21) до 747 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 663$ МПа и $s = 109$ МПа.

Анализ результатов расчетов показывает, что значения диапазона изменения Σ , σ_{max} и s напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в ПС₁ выше по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Значения σ_{cp} напряжений σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ ниже по

сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Это соотношение справедливо для обеих систем.

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па, приложенной под углом 45°, определяется следующими характеристиками: $\Sigma^{гp} = 762,5$ и 689,5 МПа, $\sigma_{max}^{гp} = 994,5$ и 871,5 МПа, $\sigma_{min}^{гp} = 230,5$ и 182 МПа, $\sigma_{cp}^{гp} = 648$ и 647 МПа и $s^{гp} = 135,5$ и 132 МПа для керамики систем № 1 и 2 соответственно. Установлено, что значения $\Sigma^{гp}$, $\sigma_{max}^{гp}$ и $\sigma_{min}^{гp}$ для σ_i , характеризующие напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, на 10, 12 и 20 % соответственно в системе № 2 меньше, чем в системе № 1. Значения $\sigma_{cp}^{гp}$ и $s^{гp}$ в обеих системах практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных расчетов выявлены основные закономерности формирования напряженного состояния границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием силовой нагрузки. Под действием сосредоточенной силы в системе с зерном из карбида титана значение $\sigma_{min}^{гp}$, определяющее напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия TiC-TiN, меньше на 25 % по сравнению с этим показателем системы с зерном из нитрида кремния при практически одинаковых значениях $\Sigma^{гp}$, $\sigma_{max}^{гp}$, $\sigma_{cp}^{гp}$ и $s^{гp}$. Под действием распределенной силы в системе с зерном из карбида титана значения характеристик, определяющих напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия, меньше аналогичных характеристик системы с зерном из нитрида

кремния на 10, 12 и 20 % соответственно при практически равных значениях $\sigma_{ср}^{гр}$ и $s^{гр}$. Это свидетельствует о более благоприятном напряженном состоянии границы между слоями двухслойного покрытия TiC–TiN в системе с зерном из карбида титана и, соответственно, меньшей вероятности появления дефектов на границе между слоями двухслойного покрытия TiC–TiN под действием силовых нагрузок по сравнению с напряженным состоянием в системе с зерном из нитрида кремния с таким же двухслойным покрытием.

Настоящая работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание 9.1372.2017/4.6).

Библиографический список

- Григорьев, С. Н.** Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 32–36.
- Grigor'ev, S. N.** Complex surface hardening of oxide-carbide ceramic cutting tools / S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Russ. Eng. Res. — 2005. — Vol. 25, № 9. — С. 7–12.
- Volosova, M.** Cutting ceramic inserts: the influence of abrasive machining and surface coatings on the operational characteristics / M. Volosova, S. Grigor'ev // Mech. Ind. — 2016. — Vol. 17, № 7. — С. 705.
- Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
- Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
- Табаков, В. П.** Многослойные покрытия инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. А. Ермолаев // СТИН. — 2005. — № 7. — С. 21–25.
- Tabakov, V. P.** Multi-layer coatings of the tools operating in continuous cutting conditions / V. P. Tabakov, A. A. Ermolaev // Russ. Eng. Res. — 2005. — T. 25, № 7. — С. 61–65.
- Sokovi'c, M.** Cutting properties of the $Al_2O_3 + SiC_{(w)}$ based tool ceramic reinforced with the PVD and CVD wear resistant coatings / M. Sokovi'c, J. Mikula, L. A. Dobrza'nski [et al.] // J. Mater. Proc. Technol. — 2005. — Vol. 164/165. — P. 924–929.
- Peng, Zh.** Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma / Zh. Peng, H. Miao, W. Wang [et al.] // Surf. Coat. Technol. — 2003. — Vol. 6. — P. 183–188.
- Кузин, В. В.** Разработка и исследование режущих инструментов из нитридной керамики с покрытием / В. В. Кузин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2006. — № 9. — С. 48–52.
- Nakamichi, M.** Material design of ceramic coating by plasma spray method / M. Nakamichi, T. Takabatake, H. Kawamura // Fusion Eng. Des. — 1998. — Vol. 41. — P. 143–147.
- Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated Si_3N_4 ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Key Eng. Mater. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.
- Табаков, В. П.** Исследование процессов трещинообразования в износостойких покрытиях режущего инструмента / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // Вест. Тамбовского университета. Серия : Естественные и технические науки. — 2013. — Т. 18, № 4-2. — С. 1916–1918.
- Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 2. Действует сосредоточенная сила / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 77–82.
- Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 2. Concentrated force action / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 487–491.
- Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 3. Действует распределенная силовая нагрузка / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 12. — С. 35–40.
- Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 3. Action of distributed force load / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 565–569.
- Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.
- Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.
- Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 5. Действует комбинированная нагрузка / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 49–53.
- Volosova, M. A.** Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 5. A combined load operates / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 197–200.
- Григорьев, С. Н.** Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с покрытием / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.
- Grigor'ev, S. N.** Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russ. Eng. Res. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.
- Кузин, В. В.** Основные закономерности влияния толщины покрытия на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики / В. В. Кузин, М. А. Волосова // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2015. — № 6. — С. 12–17.
- Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной

термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

Kuzin, V. V. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

18. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием силовых нагрузок / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 38–44.

Kuzin, V. V. The stressed state of the boundary between ceramic and a coating under the effect of power loads / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.

19. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием комбинированной нагрузки / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 43–48.

Kuzin, V. V. Stressed state of a boundary between ceramic and coating under action of a combined load / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 308–312.

20. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

21. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочувствительных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченко, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

Grigor'ev, S. N. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

22. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Appl. Mechan. Mater. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 17.05.17

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров,
Предраг Дашич, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



12th International Exhibition & Conference
29 - 31 August 2018
Pragati Maidan, New Delhi, India



CO-SPONSORED BY
Ministry of Steel
Ministry of Mines
Ministry of Earth Sciences
Ministry of External Affairs
Ministry of Micro Small & Medium Enterprises
Department of Commerce
Ministry of Heavy Industries and Public Enterprises
Council of Scientific & Industrial Research
GOVERNMENT OF INDIA

MINERALS, METALS, METALLURGY & MATERIALS 2018 (MMMM)

12-я Международная выставка металлургической и горнодобывающей промышленности

29–31 августа 2018 г.
г. Дели, Индия

Тематика:

- оборудование и технологии для производства металлов
- сталелитейное оборудование
- прокатные станы
- производство алюминия, меди, цинка, свинца
- производства нержавеющей стали
- производство труб и трубопроводов
- производство и обработка листового металла
- огнеупоры
- оборудование и технологии для горнодобывающей промышленности
- подъемно-транспортное оборудование
- технологии металлообработки
- оборудование для литья, формовки иковки металлов
- обработка поверхностей и защита от коррозии
- оборудование и технологии для сварки и резки
- системы автоматизации
- контрольно-измерительное оборудование
- технологии безопасности и средства защиты и др.

<http://www.mmmm-expo.com/>

Д. т. н. **О. А. Аверкова**¹, д. т. н. **К. И. Логачёв**¹ (✉), к. ф.-м. н. **М. С. Грицкевич**²,
А. К. Логачёв¹

¹ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

² ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

УДК 533.6:628.5

АСПИРАЦИЯ АЭРОЗОЛЯ В ТОНКОСТЕННЫЙ ОТСОС-РАСТРУБ ПРИ НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ. Часть 2. Динамика пылевых частиц*

Рассмотрен пылевоздушный поток, набегающий на местный вентиляционный отсос-раструб. Построены предельные траектории пылевых частиц для разных чисел Стокса и скорости набегающего потока. Обсуждено влияние на коэффициент аспирации угла наклона отсоса-раструба и его длины.

Ключевые слова: местный вентиляционный отсос-раструб, отрывные течения, метод дискретных вихрей, коэффициент аспирации.

В статье продолжено рассмотрение результатов исследования поведения пылевых частиц в спектре действия круглого отсоса-раструба при наличии восходящего воздушного потока. Нумерация рисунков начинается в первой части статьи.

На рис. 5–7 показаны траектории пылевых частиц. Предельные траектории пылевых частиц при фиксированной скорости в отсосе и скорости набегающего потока при увеличении длины раструба с углом раскрытия $\alpha = 90^\circ$ приближаются к оси отсоса вплоть до того, что при числах Стокса 0,2 и 0,25 предельных траекторий не существует (см. рис. 7). Соответственно, коэффициент аспирации для таких частиц будет равен нулю.

Коэффициент аспирации определяли по формуле

$$A = (R_c / R)^2 \bar{u},$$

где R_c — начальное расстояние до оси симметрии найденной предельной траектории пылевой частицы, $\bar{u} = u_\infty / u_0$.

Удаление от входа во всасывающий канал при этом равнялось $30R$. Зависимость коэффициента аспирации от длины раструба, расположенного под углом 90° к оси отсоса, представлена на рис. 8. При числах Стокса, стремящихся к нулю, коэффициент аспирации практически

* Продолжение. Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 4 за 2017 г.

✉
К. И. Логачёв
E-mail: kilogachev@mail.ru

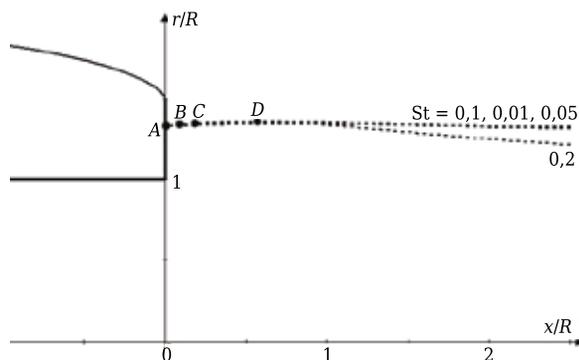


Рис. 5. Траектории пылевых частиц при $l/R = 0,5$, $\bar{u} = 0,6$; St: A (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,01; B — 0,05; C — 0,1; D — 0,2

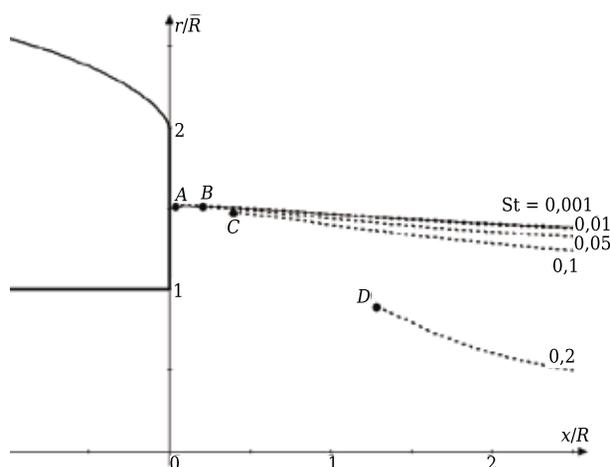


Рис. 6. Траектории пылевых частиц при $l/R = 1$, $\bar{u} = 0,6$; St: A (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,01; B — 0,05; C — 0,1; D — 0,2. Сплошная тонкая линия — разделительная линия тока, которая практически совпадает с предельной траекторией пылевой частицы при $St = 0,001$

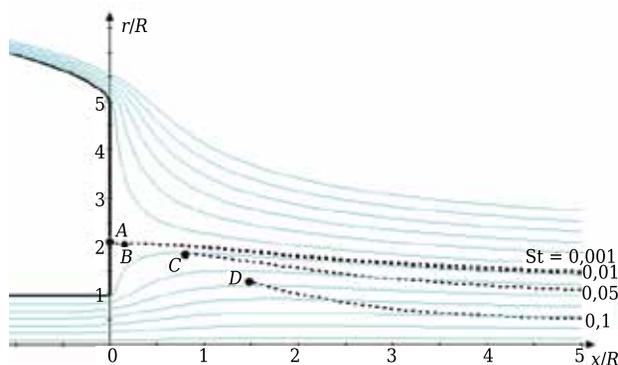


Рис. 7. Линии тока (—) и траектории пылевых частиц (---) при $l/R = 4$, $\bar{u} = 0,6$; St: A — (точка окончания (разветвления) предельной траектории пылевой частицы) — 0,001; B — 0,01; C — 0,05; D — 0,1

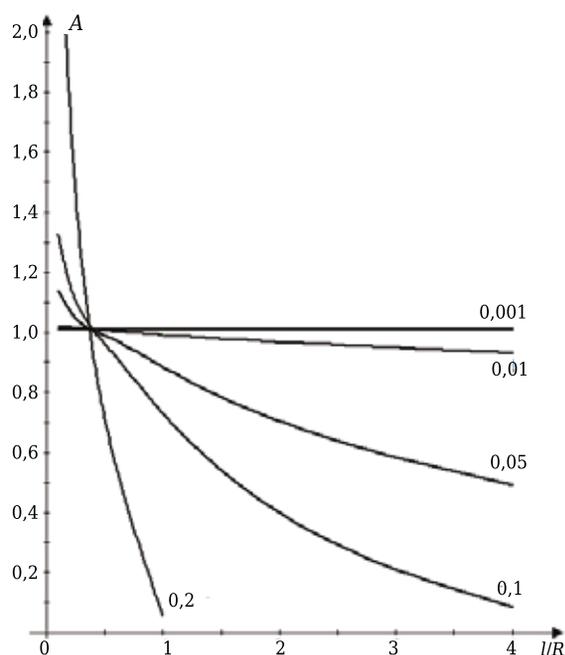


Рис. 8. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 0,6$; St указано на кривых

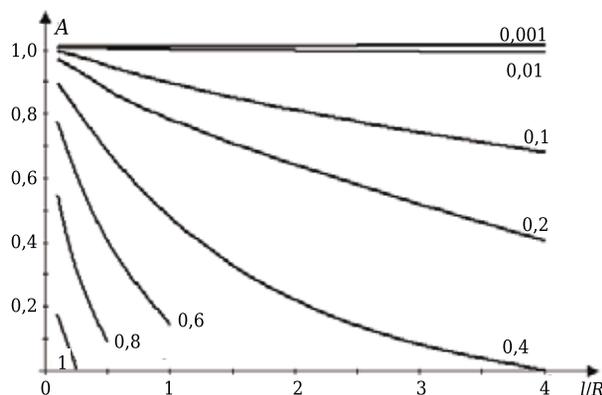


Рис. 9. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $\alpha = 90^\circ$, $\bar{u} = 1,2$; St указано на кривых

не изменяется и стремится к 1 при всех длинах раструба. Действительно, в предположении о равномерности концентрации и скоростей пылевых частиц в воздушном потоке на значительном удалении от всасывающего канала коэффициент аспирации равен отношению площади поперечного сечения трубки предельных траекторий пылевых частиц к площади поперечного сечения трубки тока аспирируемого воздуха в том же сечении. В случае стремления числа Стокса к нулю предельные траектории пылевых частиц совпадают с критическими линиями тока. Поэтому указанные ранее площади совпадают. Этому случаю соответствует $St = 0,001$. Здесь наблюдается прямая $A \approx 1$. При увеличении числа Стокса коэффициент аспирации уменьшается при росте длины раструба. При $St = 0,2$ наблюдается резкое падение коэффициента аспирации в диапазоне изменения длины раструба от 0 до 1 калибра (калибр — это радиус R трубы). Любопытно, что все кривые пересекаются в одной точке, соответствующей длине раструба, равной 0,5 калибра.

При увеличении скорости набегающего потока в 2 раза зависимость коэффициента аспирации от безразмерной длины раструба значительно изменяется (рис. 9). При числах Стокса меньше 0,1 коэффициент аспирации близок к 1 во всем диапазоне изменения длин раструба. Характер изменения коэффициента аспирации остается прежним — он снижается при росте длины раструба, но его величина не превышает 1. Так как скорость набегающего потока стала выше, то удалось построить графики изменений коэффициентов аспирации при увеличении числа Стокса до 1. В последнем случае это удалось в узком диапазоне изменения длин раструба.

Представляет интерес выявление закономерности изменения коэффициента аспирации от угла наклона раструба к его оси при фиксированной длине раструба (рис. 10, 11).

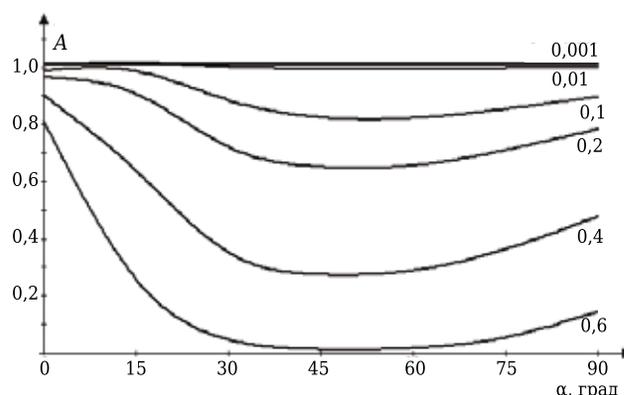


Рис. 10. Изменение коэффициента аспирации A в зависимости от длины раструба при $l/R = 1$, $\bar{u} = 1,2$ и угла его наклона α ; St указано на кривых

По-прежнему при малых числах Стокса (менее 0,01) коэффициент аспирации близок к 1. Графики изменения не монотонны, имеется минимум в диапазоне 45–60°.

В случае снижения величины безразмерной скорости набегающего потока в 6 раз зависимость коэффициента аспирации от угла наклона раструба к оси отсоса существенно изменяется (см. рис. 11). При увеличении указанного угла величина A падает. Данный случай характерен тем, что изменяется режим отрыва потока. Линии тока и предельные траектории пылевых частиц представлены на рис. 12.

Здесь наблюдается смена режима отрыва потока. При углах наклона раструба до 30° отрыв потока происходит внутрь раструба (см. рис. 12, а–б), при больших углах отрыв потока происходит вне раструба (см. рис. 12, в–е). Отметим также, что пылевые частицы, улавливаемые раструбом, могут находиться не только во внешнем набегающем потоке. Это частицы с St менее 0,2. Существуют пылевые частицы, которые не уносятся внешним набегающим потоком, они осаждаются, но улавливаются отсосом-раструбом. На рис. 12 это частицы, характеризующиеся числами Стокса более 0,025. В этом случае коэффициент аспирации рассчитывается по формуле

$$A = \frac{R_c^2 - R^2 u_\infty}{R^2 u_0}$$

Заметим, что пылевые частицы с $St = 0,05$ улавливаются только при угле наклона раструба

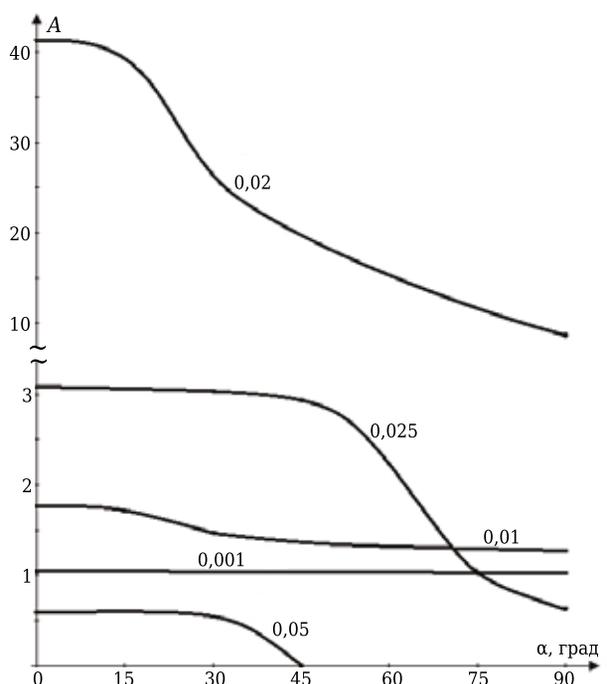


Рис. 11. Изменение коэффициента аспирации A от длины раструба при $l = R$, $\bar{u} = 0,2$ и угла его наклона α ; St указано на кривых

до 30° (см. рис. 12, а–б). При дальнейшем увеличении угла они осаждаются. Осаждаются и пылевые частицы с большими числами Стокса.

Дифференциальное уравнение (4) динамики пылевых частиц из первой части статьи не явля-

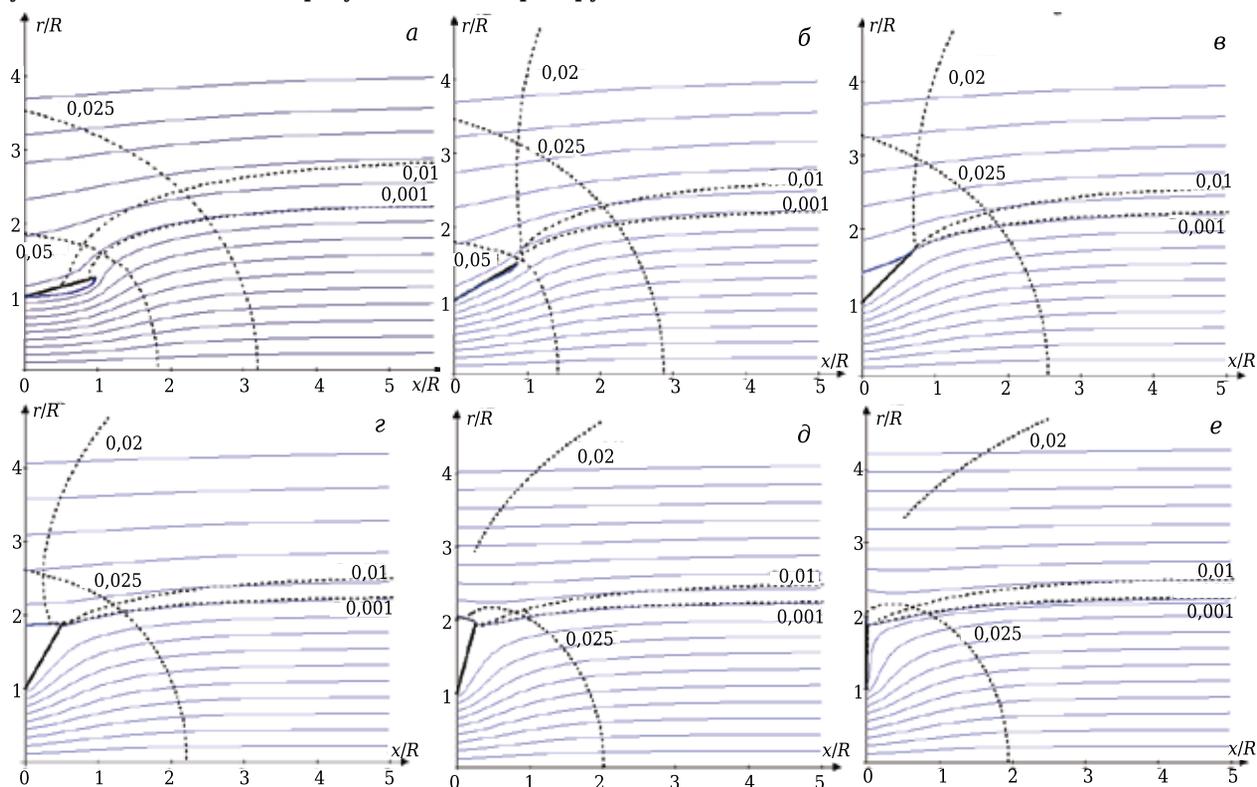


Рис. 12. Линии тока (—) и траектории пылевых частиц (- - -) при $l = R$, $\bar{u} = 0,2$ при разных углах наклона раструба α , град: а — 15; б — 30; в — 45; г — 60; д — 75; е — 90. На кривых траектории пылевых частиц указано St

ется безразмерным, что осложняет анализ движения пылевых частиц, поскольку существует много параметров, от которых зависит их поведение. Поэтому его можно свести к безразмерному виду [8], объединив указанные параметры в безразмерные комплексы. В качестве масштаба скорости используем скорость в отсосе u_0 , в качестве масштаба длины $2R$. В этом случае скорость частицы пыли $v_p = \bar{v}_p u_0$, скорость воздушного потока $v_a = \bar{v}_a u_0$, $u_\infty = \bar{u}_\infty u_0$, $t = \bar{t} \frac{2R}{u_0}$.

Тогда $\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} \frac{u_0^2}{2R} = e_g g - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}\bar{u}_\infty u_0^2}{2 \cdot \text{St} \cdot R} (\bar{v}_p - \bar{v}_a)$. Разделив на $\frac{u_0^2}{2R}$, получим

$$\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} = e_g \frac{2Rg}{u_0^2} - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}\bar{u}_\infty}{\text{St}} (\bar{v}_p - \bar{v}_a).$$

Критерий Фруда $\text{Fr} = \frac{u_0}{\sqrt{2gR}}$; число Стокса, записанное относительно скорости в отсосе, $\text{St}_0 = \frac{\rho_p d_e^2 u_0}{36\mu R} = \frac{\text{St}}{u_\infty} u_0 = \frac{\text{St}}{u_\infty}$. Тогда получим следующее безразмерное уравнение динамики пылевых частиц:

$$\frac{d\bar{v}_p}{d\bar{t}} = e_g \frac{1}{\text{Fr}^2} - \frac{\bar{\Psi}\bar{\chi}}{\text{St}_0} (\bar{v}_p - \bar{v}_a),$$

где черточки над безразмерными величинами опущены.

Начальные значения для скорости частицы в размерном виде имеют вид:

$$v_{px} = -u_\infty + g\tau, v_{pr} = 0. \quad \text{Время релаксации}$$

$$\tau = \frac{\rho_p d_e^2}{18\mu} = \frac{2R\text{St}_0}{u_0}. \quad \text{Тогда } v_{px} = -u_\infty + g \frac{2R\text{St}_0}{u_0}. \text{ Перейдя к}$$

Библиографический список

1. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — Boca Raton : CRC Press, 2015. — 576 p.
2. **Шафран, Ю. В.** Моделирование промышленных вентиляционных систем: проблема создания 3D-модели расчетной области / Ю. В. Шафран, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1. Математика. Физика. — 2016. — № 2 (33). — С. 52–62.
3. **Хоперсков, А. В.** Численное моделирование вентиляционных течений в промышленных помещениях / А. В. Хоперсков, Ю. В. Шафран, М. А. Бутенко // Южно-Сибирский научный вестник. — 2014. — № 2 (6). — С. 98–102.
4. **Ходаков, И. В.** Численное и экспериментальное исследование отрыва потока на входе во всасывающие каналы с механическими экранами / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 3. — С. 6–12.
5. **Ходаков, И. В.** Моделирование отрывного течения на входе в многоугольное всасывающее отверстие / И. В. Ходаков // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 2. — С. 11–15.

безразмерному виду $\bar{v}_{px} u_0 = -\bar{u}_\infty u_0 + g \frac{2R\text{St}_0}{u_0}$ и разделив последнее выражение на u_0 и учитывая число Фруда, получим следующее безразмерное выражение для начальной составляющей скорости:

$$v_{px} = -u_\infty + \frac{\text{St}_0}{\text{Fr}^2}, v_{pr} = 0.$$

Здесь черточки над безразмерными величинами опущены.

Таким образом, поведение пылевых частиц будет зависеть от следующих величин: чисел Фруда, Стокса, Рейнольдса, угла наклона раструба, его длины, соотношения набегающего и отсасываемого воздушного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны математическая модель, вычислительный алгоритм ее реализации и компьютерная программа для расчета отрывного течения на входе в отсос-раструб при набегающем параллельно его оси симметрии внешнем потоке для построения траекторий пылевых частиц и определения их коэффициента аспирации. Построены линии тока, предельные траектории пылевых частиц, определены коэффициенты аспирации для разных чисел Стокса пылевых частиц, скорости набегающего потока, длины и угла наклона раструба. Полученные результаты могут быть полезны не только для проектирования эффективных систем местной обеспыливающей вентиляции [1–6], но и для задач отбора проб [7, 8].

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МД-95.2017.8).

6. **Логачёв, К. И.** Моделирование пылевоздушных течений в спектре действия круглого отсоса-раструба над непроницаемой плоскостью. Часть 1. Математическая модель и алгоритм ее компьютерной реализации / К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, А. К. Логачёв [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 56–60.

7. **Logachev, K. I.** Modeling of air and dust flows in the range of action of a round suction funnel above an impermeable plane. Part 1. A mathematical model and algorithm for its computer implementation / K. I. Logachev, O. A. Averkova, A. K. Logachev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 679–683.

7. **Гильфанов, А. К.** Математические модели аспирации аэрозолей в тонкостенные пробоотборники / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов. — Казань : Казан. ун-т, 2012. — 120 с.

8. **Гильфанов, А. К.** Расчет концентраций частиц в задаче аспирации аэрозоля в тонкостенную трубку / А. К. Гильфанов, Ш. Х. Зарипов, Д. В. Маклаков // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2009. — № 6. — С. 89–99. ■

Получено 09.12.16

© О. А. Аверкова, К. И. Логачёв, М. С. Грицкевич, А. К. Логачёв, 2017 г.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

RULES OF DRAWING UP OF ARTICLES

- В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи должен быть дополнен кратким рефератом и ключевыми словами. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1–2003. На труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями. На графики желательно не наносить масштабную сетку (за исключением номограмм).
- В статье должны быть указаны ученая степень, адрес и телефон каждого автора. Также следует указать контактное лицо, чей E-mail будет указан при публикации. Все материалы редакция просит предоставлять в электронном виде.
- Если статья отправлена по E-mail, допускается оформление изображений в виде отдельных файлов формата TIF (цветные и тоновые — 300 dpi, штриховые — 600 dpi), JPEG, EPS. Изображения (за исключением диаграмм Exel), внедренные в файлы формата DOC, в качестве оригиналов не принимаются, как не обеспечивающие стандартного качества полиграфического исполнения.
- Представляя рукопись в редакцию, авторы передают издателю авторское право на публикацию ее в журнале. В качестве гонорара авторы могут получить оттиск своей статьи в формате PDF, который высылается первому автору или любому другому (по указанию авторов). Направление в редакцию работ, опубликованных или посланных для напечатания в редакции других журналов, не допускается.
- Статья, пришедшая в редакцию от зарубежных авторов, вначале отдается на рецензирование, редактируется, переводится на русский язык и публикуется в журнале «Новые огнеупоры». Затем статья отправляется на публикацию в журнал «Refractories and Industrial Ceramics» вместе с английской версией, присланной автором. Таким образом, конечный вариант статьи, опубликованной в журнале «Refractories and Industrial Ceramics», может немного отличаться от первоначального, присланного авторами. Статья, опубликованная в журнале «Новые огнеупоры», в формате PDF высылается авторам по E-mail.

- Журнал приветствует, если авторы, в тех случаях, когда это возможно и применимо, помещают данные, подтверждающие результаты их исследований, на общедоступных ресурсах (репозиториях). Авторам и редакторам, которые не располагают предпочитаемыми репозиториями, рекомендуется ознакомиться со списком таких ресурсов, представленным издательством SpringerNature, а также с политикой издательства в отношении исследовательских данных.
- The journal encourages authors, where possible and applicable, to deposit data that support the findings of their research in a public repository. Authors and editors who do not have a preferred repository should consult Springer Nature's list of repositories and research data policy.

- Список ресурсов

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories>

- Политика в отношении исследовательских данных

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq>

Общие репозитории, такие как figshare и Dryad, также могут быть использованы.

Массивы данных, которым репозитории присваивают DOI (идентификаторы цифровых объектов), могут приводиться в списках цитируемых источников. Ссылки на данные должны включать минимум информации, рекомендованной DataCite: авторы, название, издатель (название репозитория), идентификатор.

- DataCite <https://www.datacite.org/>

Springer Nature предоставляет службу поддержки в отношении исследовательских данных для редакторов и авторов, с которой можно связаться по адресу researchdata@springernature.com

Эта служба дает рекомендации по соответствию политике в области исследовательских данных и поиску ресурсов для их размещения. Она независима от редакций журналов, книг и конференций и не дает советов по рукописям.

• List of Repositories

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories>

• Research Data Policy

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq>

General repositories — for all types of research data — such as figshare and Dryad may also be used.

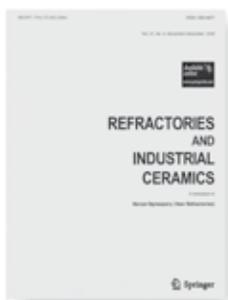
Datasets that are assigned digital object identifiers (DOIs) by a data repository may be cited in the reference list. Data citations should include the minimum information recommended by DataCite: authors, title, publisher (repository name), identifier.

• DataCite <https://www.datacite.org/>

Springer Nature provides a research data policy support service for authors and editors, which can be contacted at researchdata@springernature.com.

This service provides advice on research data policy compliance and on finding research data repositories. It is independent of journal, book and conference proceedings editorial offices and does not advise on specific manuscripts.

ВНИМАНИЕ!



Просим в библиографическом списке статей, опубликованных в журнале «Новые огнеупоры», после русской версии дополнительно приводить библиографическое описание статьи в английской версии из журнала «**Refractories and Industrial Ceramics**» (информационно-издательский консорциум «Springer»), если она была в нем опубликована.

Содержание журнала «Refractories and Industrial Ceramics» с указанием авторов, названия статьи, года издания, номера выпуска, страниц, номера журнала публикуется в Интернете:

<http://link.springer.com/journal/11148>

Редакция

ABSTRACTS

UDC 666.76.017:620.179.1

Experience of using refractories JSC BKO PAO «Severstal»

Mozhzhherin A. V., Sakulin A. V., Margishvili A. P., Gershkovich S. I., Korzhavin A. Yu., Vitovsky A. V., Musevich V. A., Zhuravlev S. G., Popovich V. N., Nikonov S. V., Bukareva O. V. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 4–11.

The results of cooperation between JSC BKO and PJSC "Severstal" in the field of supply and operation of a wide range of refractory materials are considered. The main development trends aimed at improving the technology and optimizing the parameters of the physico-chemical characteristics of refractory materials are indicated. The main innovative refractory materials and implemented projects are presented, which improved the technical and economic performance of the heat units in PJSC Severstal for the main redistribution of metallurgical industries, which made it possible to increase the efficiency of the smelting of iron and steel, to achieve a reduction in the specific indicators for obtaining a unit of finished product with a total increase lining exploitation resources. Ill 11. Ref. 3. Tab. 7.

Key words: refractory materials, blast furnace, air heater, rotary kiln, steel-ladle ladle, intermediate ladle, complex delivery, liner, durability, wear, service life.

UDC 621.746.047:669.054.2

Refractory brickwork development for the CCM pouring ladle – tundish system

Vdovin K. N., Tochilkin Vasiliy V., Umnov V. I., Tochilkin Victor V. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 29–32.

The refractory equipment of the pouring ladle – tundish system is regarded for the continuous casting slab machines (CCM). The design was developed for the metal steam shrouding unit components. The using of the plastic refractory inserts were regarded for the units which prevent the air penetrating into the molten metal jet in the course of pouring and provide reasonable parameters of the argon flow into the refractory tube annular groove. As a result the stable pouring process and the quality increase of the molten metal are ensured. Ill. 3. Ref. 14.

Key words: continuous casting slab machine, steel teeming ladle, tundish ladle, molten metal flow, refractory framework, argon.

UDC 666.762.1:666.3.022(574)

Ceramic propping agents based on the natural raw alumina-silicate material of the Republic of Kazakhstan

Biryukova A. A., Dzhenalyev T. D., Tikhonova T. A. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 33–39.

The possibility is investigated to produce the ceramic propping agents on base of natural raw alumina-silicate material of the Republic of Kazakhstan. It was shown that Arkalyk's fire clays and Red-October's bauxites are the highly-basic alumina-silicate raw materials containing respectively 48,3 and 62,0 % of Al_2O_3 (on ignited basis). Bauxites have high iron impurities (22,3 %). The influence

of the Red-October's bauxites' contents and of the raw material's preliminary heat treatment on the ceramic composition's sintering and strengthening at the sintering roasting within 1350–1500 °C was explored. It was established that the raw mixture of the fire clay and 20–30 % of bauxite is the most preferable for the producing of light ceramic propping agents. The effectiveness of the heat treatment at 1000 °C for the increasing of the ceramic samples' density and strength was demonstrated. The light alumina-silicate propping agents satisfying the GOST R 51761–2013 demanding to the alumina-silicate propping agents were produced. Ill. 5. Ref. 20. Tab. 6.

Key words: alumina-silicate propping agents, fire clay, high ferrous bauxite, mullite creation, sintering, ultimate compression strength.

UDC 621.928:622.273+622.44

The additive aerodynamic calculation of the friction gear's component intended for the particle size classification

Makarov V. N., Potapov V. Ya., Davydov S. Ya., Makarov N. V. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 40–44.

The additive aerodynamic method is proposed for the aeration materials particle size classification calculation depending both on the particles properties, united by means of the «sailing capacity» integral criterion, and on the directed air flow parameters. The equations are derived for the receiving bunker location of the friction drum-shelf separator's aerating classification component depending on the aerodynamic similarity criterion which provides the best stratification quality of the initial raw material, and as a result the quality improving of the constructional materials was achieved. The effectiveness of the aerating classification with the using of directed air flow was confirmed. Ill. 2. Ref. 7.

Key words: «sailing capacity», «sailing capacity» integral criterion, physical specification, friction separator, aerating classification, aerodynamic similarity criterion.

UDC 669.187.28; 66.046.582.3

Refinery slag stabilization by means of their phase composition correction and impart to them the mineral binding properties

Sheshukov O. Yu., Nekrasov I. V., Mikheenkova M. A., Egiazarian D. K., Lobanov D. A. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 45–52.

The refinery slags using in the steel secondary treatment ladles are prone to the decomposition due to their sizable content of the non-stable phase — the dicalcium silicate, in which the polymorphous transformation take place followed by the crystal lattice enlarging. Falling within the cracks of the furnace unit's lining the slag can evoke its breakdown. The investigating results are given for the stabilizing mechanism of the refining slags by means of the alumina flux entering together with imparting to the slags the mineral binding properties. Ill. 10. Ref. 14. Tab. 2.

Key words: lining, slag, belite, stabilization, mineral binder.

UDC 666.762.3:66.092

The investigation of the phase composition, properties and hydraulic activity changing under the magnesia materials' heat treatment

Mitina N. A., Lotov V. A. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 53–59.

The influence of the heat treatment conditions on the magnesia material's hydraulic activity was investigated by means of the heat generation measurement when interacting with water. The hydration process takes place effectively and the consolidated structures create after the initial magnesia materials' ignition within 500–800 °C. Consequently when the hydraulic active magnesium oxide preparing for the purpose of the using it to obtain the magnesia binding substance, independently of the nature of the magnesia materials it is necessary to burn them either at lower or moderate temperature within 500–800 °C. The magnesia materials' structure and properties changing in course of the heat treatment has a significant effect on the refractory materials sintering. Ill. 9. Ref. 20. Tab. 1.

Key words: electric kiln with mobile bottom platform, vermiculite concentration, productivity, firing specific energy capacity.

UDC 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

The stress state under the load between the TiC/TiN-coating layers applied to the nitride ceramics

Kuzin V. V., Fedorov M. Yu., Dasic Predrag // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 60–65.

The basic regularities under the action of the concentrated and distributed force were established for the stress state of the boundary between the layers of the TiC/TiN double-layer coating applied to the nitride ceramics. The influence of the ceramics' basic structure element on the stresses formed inside the contacting TiC/TiN-coating sub-layers under the force load. Ill. 3. Ref. 22.

Key words: carbon-carbon composite material, carbon materials, thermal shock, electric conductivity, density.

UDC 533.6:628.5

Aerosol aspiration into the thin-wall suction bell mouth in case of incident flow. Part II. The dynamic of dust particles

Averkova O. A., Logachev K. I., Gritskevich M. S., Logachev A. K. // *New Refractories*. — 2017. — No 6. — P. 66–69.

The dust-air moving onto the local ventilation suction bell mouth is regarded in the article. The dust particle limit paths for various Stokes numbers and the flow velocities were drawn. The discussion was exposed on the influence of the suction bell mouth's angle of slope and its length on the aspiration coefficient. Ill.8. Ref. 8.

Key words: local ventilation suction bell mouth, separation-induced flows, discrete vortex method, aspiration coefficient.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramitec 2018

Technologies · Innovations · Materials

10–13 апреля 2018 г.
г. Мюнхен, Германия



На выставке Ceramitec представлены:

- Сырье, материалы, добавки
- Оборудование для производства
- Штамповка, формовка и отливка, сушка
- Установки обжига и термической обработки
- Производство огнеупорных материалов
- Производство технической керамики
- Порошковая металлургия
- Технологии измерения и контроля качества
- Научные разработки и др.

<http://www.ceramitec.com>