

| РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ | РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ                                                                |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| АБРАМОВ Е. П.      | Главный редактор <b>КРАСНЫЙ Б. Л.</b><br>Зам. главного редактора <b>КАЩЕЕВ И. Д.</b> |
| ГРИШПУН Е. М.      |                                                                                      |
| ДИБРОВ И. А.       | АКСЕЛЬРОД Л. М.                                                                      |
| ЗАЙЦЕВ В. А.       | АНТОНОВИЧ В.                                                                         |
| ЗАКАРЯН О. К.      | АНЦИФЕРОВ В. Н.                                                                      |
| ИВАНУШКИН А. Г.    | БАРИНОВ С. М.                                                                        |
| ЛЕБЕДЕВ Ю. Н.      | БЕЙЛИНА И. Ю.                                                                        |
| ЛУКЬЯНОВ В. Б.     | БЕЛОУСОВА В. Ю.                                                                      |
| МОЖЖЕРИН В. А.     | БЕЛЯКОВ А. В.                                                                        |
| ОДЕГОВ С. Ю.       | БУРАВОВ А. Д.                                                                        |
| САРЫЧЕВ В. Ф.      | ВЕРЕЩАГИН В. И.                                                                      |
| СКОРОХОДОВ В. Н.   | ВИКУЛИН В. В.                                                                        |
| ЭНТИН В. И.        | ВИСЛОГУЗОВА Э. А.                                                                    |
|                    | ВЯТКИН А. А.                                                                         |
|                    | ГУРИН В. Н.                                                                          |
|                    | ДАВЫДОВ С. Я.                                                                        |
|                    | ДОРОГАНОВ В. А.                                                                      |
|                    | ДРУЖИНИН Г. М.                                                                       |
|                    | ИЛЬЮЩЕНКО А. Ф.                                                                      |
|                    | КОНАКОВ В. Г.                                                                        |
|                    | КРАСОВИЦКИЙ Ю. В.                                                                    |
|                    | ЛУКИН Е. С.                                                                          |
|                    | МИГАЛЬ В. П.                                                                         |
|                    | МОСИНА Т. В.                                                                         |
|                    | ОВСЯННИКОВ В. Г.                                                                     |
|                    | ОЙСТРАХ А. В.                                                                        |
|                    | ОРДАНЬЯН С. С.                                                                       |
|                    | ОЧАГОВА И. Г.                                                                        |
|                    | ПЕРЕПЕЛИЦЫН В. А.                                                                    |
|                    | ПИВИНСКИЙ Ю. Е.                                                                      |
|                    | ПОМОРЦЕВ С. А.                                                                       |
|                    | ПРИМАЧЕНКО В. В.                                                                     |
|                    | ПЫРИКОВ А. Н.                                                                        |
|                    | СЕМЧЕНКО Г. Д.                                                                       |
|                    | СИЗОВ В. И.                                                                          |
|                    | СОКОВ В. Н.                                                                          |
|                    | СОКОЛОВ В. А.                                                                        |
|                    | СУВОРОВ С. А.                                                                        |
|                    | СУЗДАЛЬЦЕВ Е. И.                                                                     |
|                    | ТАРАСОВСКИЙ В. П.                                                                    |
|                    | ТРАВИЦКОВА А. Н.                                                                     |

Научные редакторы **Г. Г. Гаврик, А. Н. Синицына**  
Художник-дизайнер **Н. Н. Жильцов**  
Компьютерная верстка **Н. Н. Жильцова**  
Корректор **Ю. И. Королёва**

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ  
по делам печати, телерадиовещания  
и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-46130 от 10.08.2011 г.

Адрес редакции:  
127006, Москва, Старопименовский пер., 8, стр. 1-1А  
Тел.: (495) 755-90-91, 699-97-85. Тел./факс: (495) 755-90-40  
E-mail: [ogneupor@imet.ru](mailto:ogneupor@imet.ru), [info@imet.ru](mailto:info@imet.ru)  
Internet: [www.imet.ru](http://www.imet.ru)



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

Отпечатано в типографии  
ООО «Печатный Дом»  
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 19а, стр. 4  
Тел.: (499) 976-09-38, 976-44-89

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, а также в каталог российских электронных периодических изданий

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 18.07.13. Формат 60×84 1/8.  
Бумага мелованная  
Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,00  
Уч.-изд. л. 8,82. Заказ 18099

## ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

## К 20-летию компании «ВПО Сталь»

**Съёмщиков Н. С., Кондрукевич А. А., Бельмаз К. Н., Минаев Я. А.** Разработка футеровки сталеразливочных ковшей (обзор опыта работы) . . . . . 3

## Victoria Garten Hüttenindustriebedarf AG — 20 лет

**Александр М., Гартен В.** От планов — к действию! Проведение компанией «Riverside Refractories & Equipment Inc.» испытаний, направленных на изучение легкости открытия леток методами бурения и абразивным способом . . . . . 9

## СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Замятин С. Р., Гельфенбейн В. Е., Журавлёв Ю. Л., Бабакова О. Л.** Хромистый гексаалюминат-кальциевый наполнитель и бетоны на его основе . . . . . 15

## ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

**Зубашенко Р. В.** Теплоизоляционные изделия ЗАО «ПКФ «НК» . 19  
**Афанасьев А. И., Ляпцев С. А., Потапов В. Я.** Характеристики асбестосодержащих горных пород и выбор рациональных параметров аппаратов для их разделения . . . . . 22

\* \* \*

## Поздравляем юбиляра

75 лет профессору **Евгению Степановичу Лукину**. . . . . 26

## НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

**Суздальцев Е. И., Горелова Е. В.** Кварцевая керамика, объемно-пропитанная кремнийорганическим связующим спироциклического строения . . . . . 27

## Innovative technologies for ceramics production

**Шляпин А. Д., Омаров А. Ю., Тарасовский В. П., Трифонов Ю. Г., Айрих А. И.** Физико-механические свойства керамических материалов, полученных при химическом диспергировании алюминиевого сплава марки АК12 . . . . . 30

**Ло Сюйдун, Цюй Дианли, Се Чжипэн, Чжао Веньянь.** Влияние  $\text{CeO}_2$  на кристаллическую структуру форстерита, синтезированного из низкосортного магнезита . . . . . 34

**Рева В. П., Онищенко Д. В., Петров В. В., Ким В. А., Евстигнеев А. И.** Формирование твердого сплава ВК8 с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии . . . . . 39

**Абдрахимов В. З., Абдрахимов Е. С.** Процессы горения при обжиге теплоизоляционного керамического материала на основе отходов горючих сланцев . . . . . 44

**Дзюзер В. Я.** Электроплавляемые AZS-огнеупоры для высокопроизводительных стекловаренных печей . . . . . 50

## ЭКОЛОГИЯ

**Красовицкий Ю. В., Лобачёва Н. Н.** Расчет зернистых фильтров-пылеуловителей для решения экологических проблем производства огнеупоров . . . . . 53

## ЭКОНОМИКА И РЫНОК

## Статистика

Производство отдельных видов продукции черной металлургии в России в 2012 г. и в декабре 2012 г. . . . . 57  
 Производство отдельных видов прочих неметаллических минеральных продуктов в России в 2012 г. и в декабре 2012 г. . 57  
 Мировое производство чугуна в декабре 2012 г., в 2011 и 2012 гг. . . . . 58  
 Мировая выплавка стали в декабре 2012 г., в 2011 и 2012 гг. 59  
 Цены на некоторые виды огнеупорного сырья. . . . . 61

## ИЗОБРЕТЕНИЯ

Обзор патентов РФ на изобретения по огнеупорам . . . . . 62

## ИНФОРМАЦИЯ И ХРОНИКА

100 лет со дня рождения **Виктора Львовича Балкевича** . . 64  
**Очагова И. Г.** 55-й Международный colloquium по огнеупорам в Аахене — огнеупоры для металлургии . . . . . 65  
**Abstracts** . . . . . 71

## REFRACTORIES IN THE HEAT UNITS

## For the 20th anniversary of the RPA Steel

**S'emshchikov N. S., Kondrukevich A. A., Bel'maz K. N., Minaev Ya. A.** The development of steel teeming ladle's lining (service experience review) . . . . . 3

## Victoria Garten Hüttenindustriebedarf AG accomplished 20 years

**Alexander M., Garten V.** From the planning to the materialization of plans into the action: "Riverside Refractories & Equipment Inc." Company carries the tests of the tapping ease using both of drilling and the abrasive grinding disk . . . . . 9

## RAW MATERIALS

**Zamyatin S. R., Gel'fenbein V. E., Zhuravlev Yu. L., Babakova O. L.** Chromium hexaluminate-calcium aggregate and the concretes on its base . . . . . 15

## MANUFACTURING AND EQUIPMENT

**Zubashchenko R. V.** Heat-insulating production of LLC "Commercial industrial enterprise "NK" . . . . . 19  
**Afanas'ev A. I., Lyaptsev S. A., Potapov V. Ya.** The characteristics of asbestos-containing rock, and the selecting of rational parameters for the separating machines . . . . . 22

\* \* \*

## Congratulation

The 75th birthday of **Evgeniy Stepanovich Lukin** . . . . . 26

## SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT

**Suzdal'tsev E. I., Gorelova E. V.** The quartz ceramics bulk-saturated with organic-silicon binder having spirocyclic structure . . . . . 27

## Innovative technologies for ceramics production

**Shlyapin A. D., Omarov A. Yu., Tarasovskii V. P., Trifonov Yu. G., Airich A. I.** Physical and mechanical properties of ceramic materials obtained by the chemical dispersion of aluminum alloy AK12. . . . . 30

**Luo Xudong, Qu Dianli, Xie Zhipeng, Zhao Wenyan.** Effect of  $\text{CeO}_2$  on the crystalline structure of forsterite synthesized from low-grade magnesite . . . . . 34

**Reva V. P., Onishchenko D. V., Petrov V. V., Kim V. A., Evstigneev A. I.** The hard alloy VK8 forming on base of mechanochemically synthesized tungsten carbide . . . . . 39

**Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S.** Combustion processes when burning of the heat-insulating ceramic material on base of oil shale wastes . . . . . 44

**Dzyuzer V. Ya.** Electro-fused aluminum-zirconium-silica (AZS) refractories for high-production glass-melting furnaces . . . . . 50

## ECOLOGY

**Krasovitskii Yu. V., Lobacheva N. N.** Granular dust filters calculation for the analysis of environmental problems in refractory production . . . . . 53

## ECONOMICS AND MARKET

## Statistics

The manufacturing of specific groups of ferrous metallurgy products in Russia in 2012 and December 2012 . . . . . 57  
 The manufacturing of specific groups of other nonmetallic mineral product in Russia in December 2012 . . . . . 57  
 World production of iron in December 2012 and in 2011—2012 . 58  
 World production of steel in December 2012 and in 2011—2012 . 59  
 Price-list for variety of refractory raw materials. . . . . 61

## INVENTIONS

Review of patents of the Russian Federation for inventions in refractories . . . . . 62

## INFORMATION

The 10th anniversary of the birth of **Victor L'vovich Balkeovich** . . 64  
**Ochagova I. G.** 55th International Colloquium on Refractories in Aachen — the refractories for metallurgy . . . . . 65  
**Abstracts** . . . . . 71

## Уважаемые коллеги!

Примите наши искренние поздравления по случаю знаменательного события — 20-летия со дня основания группы компаний «ВПО Сталь»!

В настоящее время Ваша компания занимает лидирующие позиции на рынке и по праву имеет репутацию надежного делового партнера. Продукция компании широко известна не только в России, но и за ее пределами. За этим заслуженным признанием стоит огромный труд профессионалов, работающих в компании, талант и опыт руководителей, преданность коллектива и безупречное служение общему делу.

Желаем Вашей компании и всем сотрудникам компании «ВПО Сталь» доброго здоровья, огромных творческих сил и новых удачных широкомасштабных проектов!

Главный редактор журнала  
«Сталь»  
**О. Н. Сосковец**



Главный редактор журнала  
«Новые огнеупоры»  
**Б. Л. Красный**



## К 20-летию компании «ВПО Сталь»

К. т. н. **Н. С. Съёмщиков**<sup>1</sup>, к. т. н. **А. А. Кондрукевич**<sup>2</sup>, к. т. н. **К. Н. Бельмаз**<sup>3</sup>, **Я. А. Минаев**<sup>1</sup>



<sup>1</sup> ООО «ВПО Сталь», Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия

<sup>3</sup> Компания «Corwintec Europe, Ltd», г. Дублин, Ирландия

УДК 666.76:[669.18.046.5:621.746.32

## РАЗРАБОТКА ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ (обзор опыта работы)

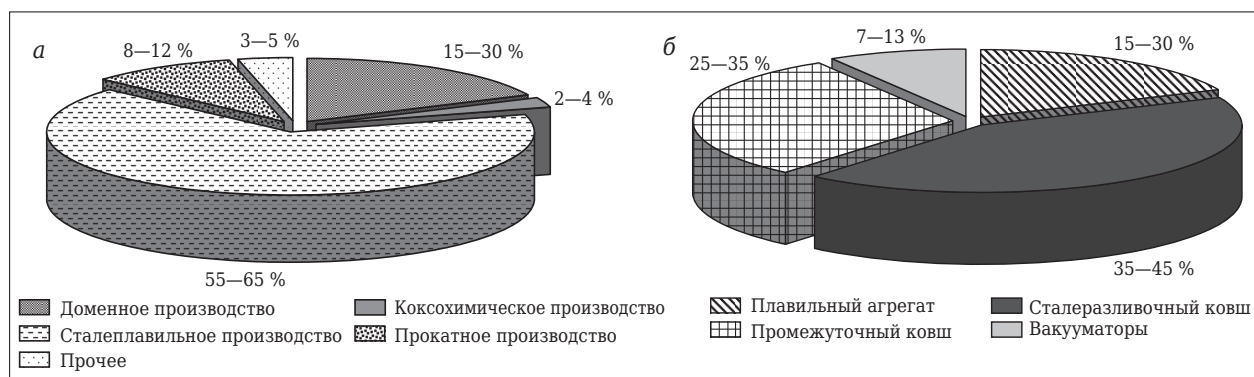
Рассмотрены наиболее известные при настоящем уровне техники схемы футеровки сталеразливочных ковшей. Оценены ее преимущества и недостатки. Приведены варианты проведения локального горячего ремонта сталеразливочных ковшей.

**Ключевые слова:** сталеразливочный ковш, футеровка, огнеупорные изделия, арматурный, теплоизоляционный и рабочий слои футеровки.

**В** настоящее время снижение удельных затрат на футеровку тепловых агрегатов при производстве стали — одна из важнейших задач металлургических предприятий, производящих сталь в странах СНГ. С другой стороны, металлургические предприятия осваивают производство новых марок сталей, и, соответственно, огнеупоры должны быть адаптированы к новым условиям производства. При этом вопросы, касающиеся снижения удельных затрат на огнеупоры для футеровки, остаются актуальными. На рис. 1, а показано распределение удельных затрат на огнеупоры в металлургическом производстве. Доля сталеплавильного производ-

ства составляет 55—65 %. При этом ведущую роль в формировании удельных затрат огнеупоров в сталеплавильном производстве занимает сталеразливочный ковш (35—45 %, рис. 1, б). Поэтому поиск способа снижения удельных затрат на футеровку сталеразливочного ковша является важнейшей задачей.

Современная разработка дизайна футеровки сталеразливочного ковша агрегата печь-ковш требует не только глубоких знаний технологии металлургических процессов, протекающих в сталеразливочном ковше, но и умения комплексно оценивать совокупность факторов, влияющих на систему разливки и



**Рис. 1.** Распределение удельных затрат на огнеупоры в металлургическом производстве: а — по всему металлургическому переделу; б — по сталеплавильному производству

обработки стали. Важнейшим показателем правильно разработанной футеровки является ее стойкость, которая характеризуется числом теплосмен за кампанию сталеразливочного ковша. При эксплуатации футеровки сталеразливочных ковшей наблюдается ее неравномерный износ в различных зонах; наибольшему износу подвержены шлаковая зона и «бойная» зона дна ковша. Следует отметить, что скорость износа футеровки в шлаковой зоне в 1,0–4,0 раза выше, чем скорость износа футеровки в зоне стали, в зависимости от марки выплавляемой стали и технологии ее внепечной обработки.

В настоящей работе рассматриваются основные виды футеровки сталеразливочного ковша, включающие теплоизоляционный, арматурный и рабочий слой дна, стен (зона стали и шлаковый пояс), а также зоны опорного кольца свободного борта. Приведены некоторые факторы, определяющие разработку необходимой концепции дизайна футеровки сталеразливочного ковша. Основными критериями для разработки футеровки служат данные о тепловом агрегате, а именно:

- вместимость сталеразливочного ковша и конструкционные особенности плавильного агрегата и сталеразливочного ковша;
- технологические возможности по обеспечению графиков сушки, разогрева и ввода в эксплуатацию сталеразливочных ковшей;
- оборачиваемость сталеразливочных ковшей;
- металлургические факторы, а именно:
  - сортамент выплавляемой стали;
  - температура плавки на выпуске из конвертера;
  - температура плавки после обработки на установке печь-ковш (УПК);
  - длительность пребывания плавки в сталеразливочном ковше, включая длительность обработки плавки аргоном, пребывания плавки на УПК, вакууматоре и т. д.;
  - доля присадок в сталеразливочный ковш (извести, плавней, флюсов, порошко-

вой проволоки), при этом особое внимание уделяется количеству введенного общего кальция, который играет важную роль при выборе качества материалов для дна и стен;

- основность шлака;
- требование к химическому составу огнеупора, как к источнику неметаллических включений в металле, и т. д.

На основании этих критериев разрабатывается композиция шихтовых материалов, отвечающая требованиям конкретного потребителя. Однако индивидуальный подход к футеровке сталеразливочных ковшей подразумевает не только знания металлургических факторов, влияющих на нее, но и особенности технологии сборки футеровки, позволяющие решать некоторые задачи, связанные непосредственно с ее стойкостью. В настоящее время для футеровки сталеразливочных ковшей используют различные схемы. Ниже приведены основные концепции футеровки, предлагаемые ООО «ВПО Сталь» и компанией «Corwintec Europe, Ltd», положительно зарекомендовавшие себя на металлургических предприятиях России и Украины. Рассмотрим комплексную футеровку сталеразливочного ковша от теплоизоляционного слоя до рабочего.

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ СЛОЙ

При анализе распределения тепловых нагрузок на теплоизоляционный слой, сохраняющий тепло и защищающий металлический ковш сталеразливочного ковша от перегрева, ложится основная доля нагрузки — до 40–50 % (рис. 2). Можно выделить три основных вида используемой теплоизоляции: волокнистую, кирпичную и из теплоизоляционного бетона. Нередко используют некоторые комбинации этих теплоизоляционных материалов.

*Волокнистая теплоизоляция* (в виде одеял, формованных плит, фетра и т. д.) выполняется из асбестового, муллитокремнеземистого

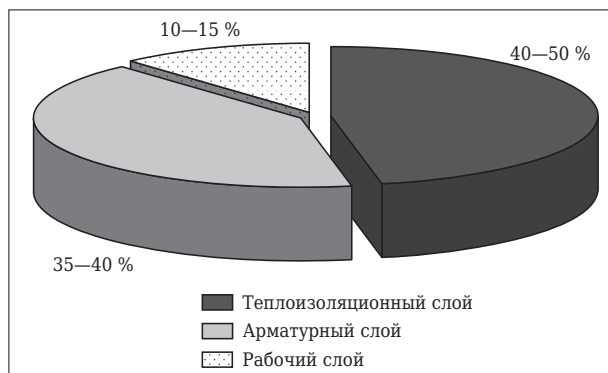


Рис. 2. Распределение тепловой нагрузки на слои футеровки сталеразливочного ковша

волокна и т. д. Имеет неоспоримое преимущество из-за низкой теплопроводности. Например, для некоторых материалов из муллитового волокна может быть обеспечена теплопроводность до 0,02 Вт/(м·К). Главный недостаток волокнистой теплоизоляции — низкий предел прочности при сжатии.

Кирпичная теплоизоляция выполняется из легковесного и ультралегковесного кирпича. Преимущества этой теплоизоляции — низкая теплопроводность и удовлетворительная механическая прочность, существенные недостатки — сложность выполнения кладки и наличие швов, увеличивающих термическое напряжение в соответствующих участках футеровки.

Использование теплоизоляционного торкрет-бетона позволяет не только комбинировать преимущества волокнистой и кирпичной футеровки, но и избежать некоторых недостатков, присущих первым двум способам, так как обеспечивает целостность (бесшовность) покрытия и простоту нанесения. Применение технологии торкретирования позволяет избежать деформации теплоизоляционного слоя, приводящей к увеличению теплопроводности при продолжительных кампаниях эксплуатации сталеразливочного ковша. Совместное использование теплоизоляционного торкрет-бетона и арматурного бетона полностью исключает растрескивание. Однако применение данного способа требует наличия специального оборудования — торкрет-машин.

### АРМАТУРНЫЙ СЛОЙ

Для футеровки сталеразливочных ковшей применяют два вида арматурного слоя: кирпичный и бетонный. Достаточно часто на предприятиях используют универсальную схему, когда один материал устанавливают в зону стали и в шлаковый пояс. Хотя периодически используется двухзонная футеровка, т. е. для

зоны стали устанавливаются материалы одного химического состава, а для шлакового пояса — другого, с большей химической стойкостью к агрессивному воздействию шлака для защиты от проникновения шлака и металла через рабочий слой. Основными критериями при подборе схемы арматурного слоя являются вместимость сталеразливочного ковша и его конструкционные особенности, механизация и оснащённость футеровочного участка и климатические условия. При выполнении арматурного слоя возможно использование трех разных вариантов кладки: из прямого кирпича, из клиновидного, из пазогребневого. Последний вариант значительно лучше первых двух, так как кирпич получает дополнительный способ фиксации за счет рядом стоящих изделий и увеличения поверхности их соприкосновения между собой, что положительно сказывается на ресурсе службы арматурного слоя. Средняя стойкость кирпичного арматурного слоя 2–3 кампании эксплуатации рабочего слоя (170–250 плавов). При использовании пазогребневого кирпича в совокупности с бетонным звеном под опорным кольцом такая схема позволяет обеспечить стойкость до 1000 плавов и более при сравнительно низких удельных затратах.

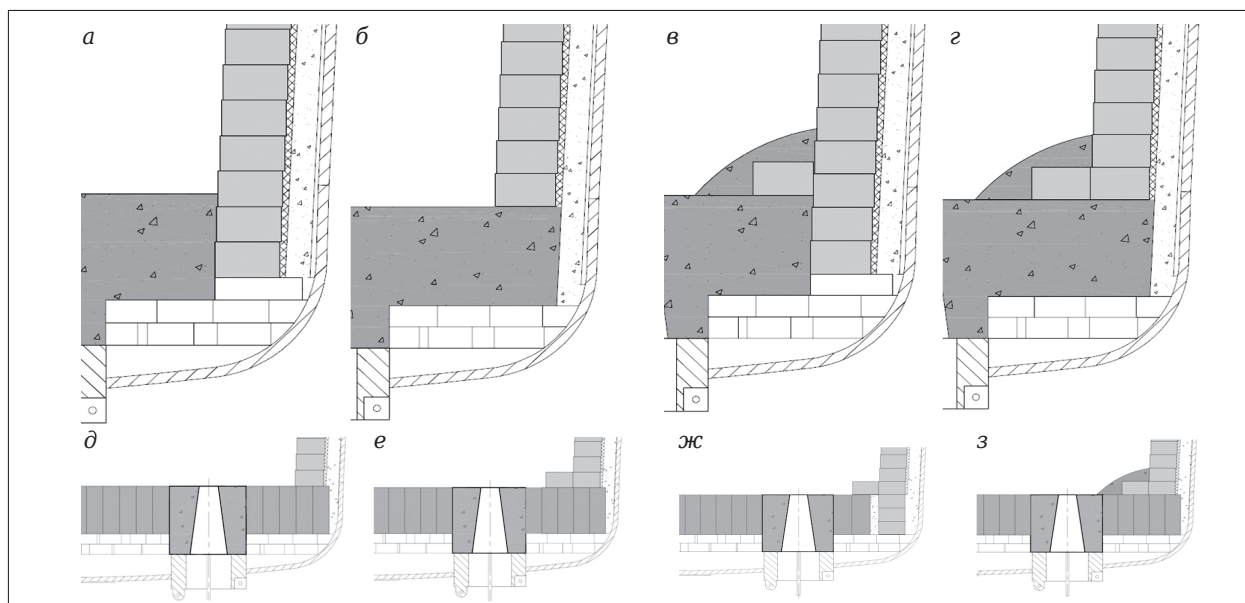
Важнейшими преимуществами монолитного арматурного слоя являются: его достаточно высокая стойкость (1200–2000 плавов), ремонтпригодность, 100 %-ная сплошность слоя и защита от проникновения расплава через швы.

### РАБОЧИЙ СЛОЙ

Рабочий слой футеровки сталеразливочного ковша непосредственно контактирует с агрессивной средой жидких продуктов плавки, обеспечивает работоспособность ковша. Наиболее ответственная зона футеровки дна — зона сопряжения его со стеной. Эта зона может выполняться различными способами (рис. 3).

Использование неформованных материалов при футеровке дна сталеразливочного ковша имеет следующие преимущества — ремонтпригодность, возможность горячих локальных подливок через кессоны, а также холодного ремонта при замене футеровки стен. Недостатки — строгие режимы и условия ввода сталеразливочных ковшей в работу (температура окружающей среды, особенно в зимний период; режим и длительность сушки и разогрева футеровки).

Использование формованных изделий при футеровке дна сталеразливочного ковша имеет ряд преимуществ: экономия энергоресурсов на ввод сталеразливочного ковша в эксплуатацию (сокращение длительности сушки и нагрева с



**Рис. 3.** Схема футеровки сопряжения кирпичных стен и бетонного дна сталеразливочного ковша: а — погруженные ряды в бетонное дно; б — надставленные ряды; в, г — с «защитным» кольцом и набивкой вокруг него (в — ряды, погруженные в бетонное дно; г — надставленные ряды); д — без «защитного» кольца; е — с «защитным» кольцом; жс — «островная» схема с «защитным» кольцом; з — с «защитным» кольцом и набивкой вокруг него

48 до 16 ч); сокращение общего ремонтного срока футеровки сталеразливочного ковша; возможность локального усиления участков повышенного износа. Недостатки — невозможность проведения локального ремонта формованными изделиями. Локальный ремонт может производиться только при наличии у потребителя технологии горячего торкретирования сталеразливочных ковшей.

При сопряжении стен и дна футеровки сталеразливочного ковша нередко используют дополнительное усиление этой зоны кладкой «защитного» кольца, а иногда и набивки вокруг него (см. рис. 3, в—з); нередко «защитное» кольцо может быть выложено по высоте в два ряда.

Следующая ответственная зона футеровки дна сталеразливочного ковша — зона падения струи металла («бойная» зона). «Бойная» зона может выполняться с применением формованных изделий по нескольким вариантам.

1. Изменение химического состава изделий — когда «бойная» зона собирается из изделий с улучшенным химическим составом и большей механической прочностью.

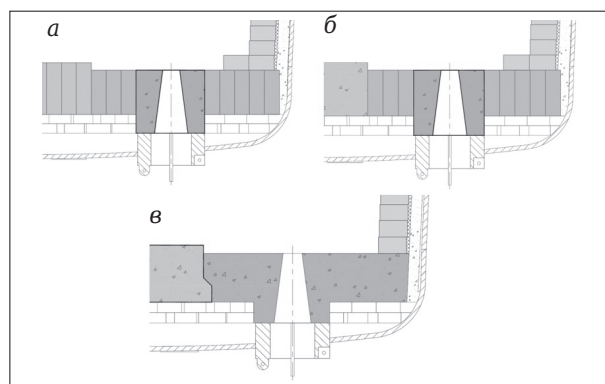
2. Изменение формата — когда «бойная» зона собирается из изделий такого же химического состава, как и остальное дно, но с увеличением толщины дна на участке падения струи металла.

3. Изменение химического состава и формата — когда выполняются оба условия. Такой вариант используется при сборке дна из кирпича на сталеразливочных ковшах со значи-

тельным износом «бойной» зоны при выпуске металла из плавильных агрегатов (рис. 4, а).

4. Применение блочной «бойной» зоны, выполненной по бетонной технологии (рис. 4, б) из бетона, как правило корундового, корундошпинельного или шпинельнокорундового состава. Блок может выполняться такой же толщины, как и остальное дно, или может быть усилен по толщине в зависимости от средней скорости износа «бойной» зоны.

Футеровка «бойной» зоны неформованными материалами осуществляется заливкой огнеупорного бетона как без усиления по толщине «бойной» зоны, так и с усилением или с установкой в «бойной» зоне отформованного блока из бетона, аналогичного бетону дна ков-



**Рис. 4.** Схема футеровки «бойной» зоны дна сталеразливочного ковша: а — кирпичное усиление с кирпичным дном; б — блочное усиление с кирпичным дном; в — блочное усиление с бетонным дном

ша. В некоторых случаях, когда падение струи металла происходит не вертикально, а с некоторым уклоном в направлении стены сталеразливочного ковша, усиление «бойной» зоны осуществляется выкладыванием дна с выходом на стену падения струи металла.

Рабочий слой стен и шлакового пояса также подвержен напряжениям, превышающим допустимые и вызывающим его разрушение, а концентраторы, являющиеся районами зарождения трещин, возникают на участках выступов кладки [1]. Анализ эксплуатации футеровок сталеразливочных ковшей на различных предприятиях позволяет разделить их на два основных типа:

*равностойкие* — когда стойкость футеровки стен зоны стали и шлакового пояса одинаковая. Характерный дизайн — ширина стен значительно меньше ширины шлакового пояса, коэффициент скорости износа (отношение скорости износа футеровки шлакового пояса к скорости износа футеровки зоны стали) менее 1,45:

$$k_v = \frac{V_{\text{шлак}}^{\text{износа}}}{V_{\text{сталь}}^{\text{износа}}},$$

где  $V_{\text{шлак}}^{\text{износа}}$  — средняя скорость износа футеровки в шлаковом поясе;  $V_{\text{сталь}}^{\text{износа}}$  — средняя скорость износа футеровки в зоне стали;

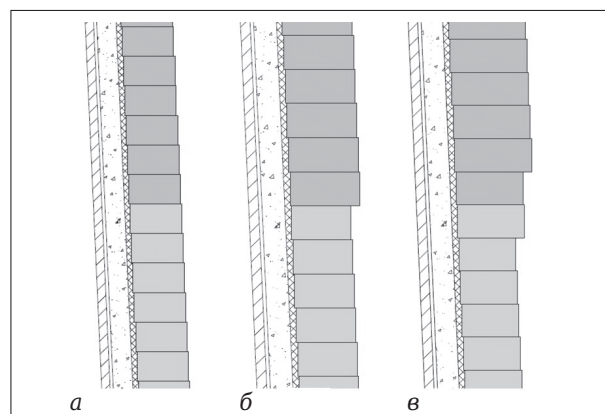
*с использованием ремонтных комплектов* — когда наблюдается опережающий износ футеровки шлакового пояса по отношению к футеровке зоны стали. Характерный дизайн — использование ремонтного комплекта шлакового пояса (возможен также ремонт дна ковша), коэффициент скорости износа более 1,45.

Сопряжение между зоной стали и шлаковым поясом выполняется несколькими способами:

- *равнотолщинная схема* — когда толщина стены зоны стали равна толщине кирпича в шлаковом поясе (рис. 5, а). Схема характерна для равностойкой футеровки сталеразливочных ковшей средней вместимости и случаях, когда  $V_{\text{шлак}}^{\text{износа}} \approx V_{\text{сталь}}^{\text{износа}}$ , а также для ремонтных комплектов шлакового пояса;

- *разнотолщинная схема* — когда толщина кирпича в шлаковом поясе больше толщины стены зоны стали, но не более чем на 20–25 % (рис. 5, б). Схема используется для футеровки сталеразливочных ковшей любой вместимости, когда  $V_{\text{шлак}}^{\text{износа}} > V_{\text{сталь}}^{\text{износа}}$ ;

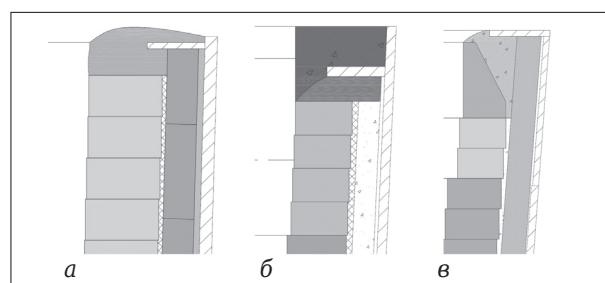
- *дифференцированная схема* — когда толщина кирпича в шлаковом поясе больше на 20–25 % толщины стены зоны стали (рис. 5, в); при этом между ними выкладывается зона кирпича промежуточных форматов, позволяющая



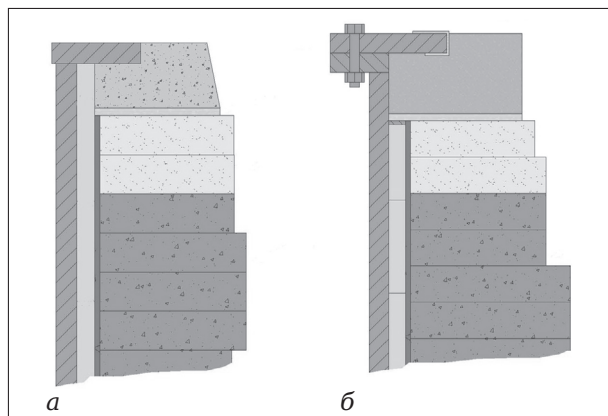
**Рис. 5.** Схема футеровки стен сталеразливочного ковша (сопряжение зоны стали и шлакового пояса): а — равнотолщинная; б — разнотолщинная; в — дифференцированная

снизить механические напряжения на кладку (предел прочности при изгибе). Схема используется для футеровки сталеразливочных ковшей любой вместимости, когда  $V_{\text{шлак}}^{\text{износа}} \gg V_{\text{сталь}}^{\text{износа}}$ .

На стойкость рабочего слоя стен значительно влияет состояние опорного кольца сталеразливочного ковша, которое должно обеспечивать плотность примыкания кирпичных рядов. Поэтому футеровка этого слоя является достаточно важной, поскольку ее неудовлетворительное исполнение может привести к раскрытию швов кладки в процессе эксплуатации. Существует несколько вариантов выполнения футеровки опорного кольца: набивка массой или заливка бетоном сегментов кольца (рис. 6, а), подбивка массой под кольцо и заливка огнеупорным бетоном (рис. 6, б), установка обратного клиновидного кирпича пятового формата (рис. 6, в) — касетированного кирпича. Первые две схемы футеровки опорного кольца наиболее простые и не требуют особых затрат, но имеют значительный недостаток: при демонтаже настелей на борту возможен обрыв футеровки опорного кольца с раскрытием швов кладки верхних рядов. Схема



**Рис. 6.** Схема футеровки под опорным кольцом сталеразливочного ковша: а — набивка массой или заливка бетоном сегментов кольца; б — подбивка массой под кольцо и заливка огнеупорным бетоном; в — установка обратного клиновидного кирпича пятового формата



**Рис. 7.** Схема футеровки опорного кольца сталеразливочных ковшей средней и большой вместимости: а — приваренные сегменты; б — болтовая фиксация сегментов

с использованием кирпича в этом случае более надежна, но ее основным недостатком является возможность проникновения металла через вертикальные швы кассетированного кирпича при переливе сталеразливочного ковша.

Для усиления конструкции с заливкой бетоном опорного кольца применяют болтовую фиксацию сегментов опорного кольца (рис. 7, б), которая позволяет производить ее замену при горячем ремонте сталеразливочного ковша без охлаждения всей футеровки стен и дна. Эта технология максимально способствует увеличению продолжительности кампании сталеразливочного ковша, а использование горячего торкретирования участков свободного борта совместно с горячим торкретированием шлакового пояса позволяет не проводить промежуточный ремонт с заменой этих участков, а достичь равностойкости футеровки на уровне 85—100 плавов, снизить удельный расход и сэкономить время на проведение промежуточных ремонтов.

В зависимости от вместимости сталеразливочного ковша шлаковый пояс можно начинать торкретировать с 50—65-й плавки, периодичность торкретирования — после каждых 8—10 плавов, торкретирование свободного борта — при необходимости после удаления настыва каждые 8—10 плавов. Это позволит исключить замену шлакового пояса и снизить механический ремонт обмуровки на 50 % и удаление отработанных кирпичей из верхних рядов на 75 %. Аналогичную технологию используют при горячем ремонте продувочного и шибера блока методом торкретирования или укладки бетона через кессон.

Таким образом, анализ металлургических факторов, особенностей конструкций плавильного агрегата и сталеразливочного ковша, а также обеспечение оборудованием на футеровочных

участках металлургических предприятий позволяют рекомендовать наиболее оптимальную схему футеровки и технологию ее выполнения для потребителя. Компания «ВПО Сталь» совместно с компанией «Corwintec Europe, Ltd» ведет постоянную работу по оптимизации различных видов футеровки; достигнуты положительные результаты на сталеразливочных ковшах различной вместимости. С применением равностойкой периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочных ковшей достигнута стойкость 85—90 плавов стали рядового сортамента со средним количеством присадок FeCa до 21,0 кг/т и CaC<sub>2</sub> до 12,0 кг/т. Проведены работы по изменению схем футеровки ковшей с меньшей стойкостью, но с увеличенной вместимостью и исключением промежуточных ремонтов. Это позволяет значительно уменьшить удельные затраты при увеличении вместимости сталеразливочного ковша, что особенно актуально для предприятий, в которых сталь обрабатывается в камерных вакууматорах. Таким образом, разработка оптимальной футеровки сталеразливочного ковша позволяет значительно снизить удельный расход материалов на различные зоны футеровки и соответственно общие удельные затраты.

1. Использование эффективной теплоизоляции, подобранной для каждого конкретного случая, позволяет снизить тепловую нагрузку на кожу сталеразливочного ковша на 15—35 % и повысить стойкость футеровки.

2. Применение монолитной арматурной футеровки или с частичным использованием пазогребневого кирпича позволяет достичь стойкости арматурного слоя более 1100 плавов.

3. Анализ скорости износа рабочего слоя футеровки при комплексной оценке условий эксплуатации позволяет определить возможность достижения равностойкости всех зон футеровки или оптимизировать проведение промежуточных ремонтов. Кроме того, внедрение технологии проведения горячих ремонтов шибера и продувочных блоков, а также шлаковых поясов обеспечивает достижение равностойкости всех зон футеровки сталеразливочного ковша.

### Библиографический список

1. *Салмаш, И. Н.* Исследование напряженного состояния и прочности футеровки сталеразливочных ковшей / И. Н. Салмаш, А. Н. Смирнов // Металл и литье Украины. — 2010. — № 9/10. — С. 48—54.
2. Огнеупоры. Технология строительства и ремонта печей ; пер. с яп. — М. : Металлургия, 1980. — 384 с. ■

Получено 10.06.13

© Н. С. Съёмщиков, А. А. Кондрукевич,  
К. Н. Бельмаз, Я. А. Минаев, 2013 г.

М. Александер<sup>1</sup>, В. Гартен<sup>2</sup><sup>1</sup> Компания «Riverside Refractories & Equipment Inc.», г. Пелл-Сити, Алабама, США<sup>2</sup> Компания «VGH Victoria Garten Hüttenindustriebedarf AG», г. Швельм, Германия

УДК 669.162.216.22:666.762.1

## ОТ ПЛАНОВ — К ДЕЙСТВИЮ! ПРОВЕДЕНИЕ КОМПАНИЕЙ «RIVERSIDE REFRACTORIES & EQUIPMENT Inc.» ИСПЫТАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ИЗУЧЕНИЕ ЛЕГКОСТИ ОТКРЫТИЯ ЛЕТОК МЕТОДАМИ БУРЕНИЯ И АБРАЗИВНЫМ СПОСОБОМ

Представлены результаты исследований, проведенных компанией «Riverside», специализирующейся на производстве леточных масс, в области открытия леток двумя способами, а именно методом бурения и методом открытия летки абразивным способом. В ходе исследований рассматривали зависимость общего коэффициента бурения от четырех заданных параметров тестирования: коэффициента бурения леточной массы в горячем состоянии под нагрузкой, степени проникновения бура в массу, потерь на истирание и потерь в объеме массы. Кроме того, изучали взаимосвязь между содержанием глинозема в леточных массах и общим коэффициентом бурения. В заключение кратко представлены результаты тестирования на абразивный износ и сделаны выводы относительно предложенных к рассмотрению методов открытия летки.

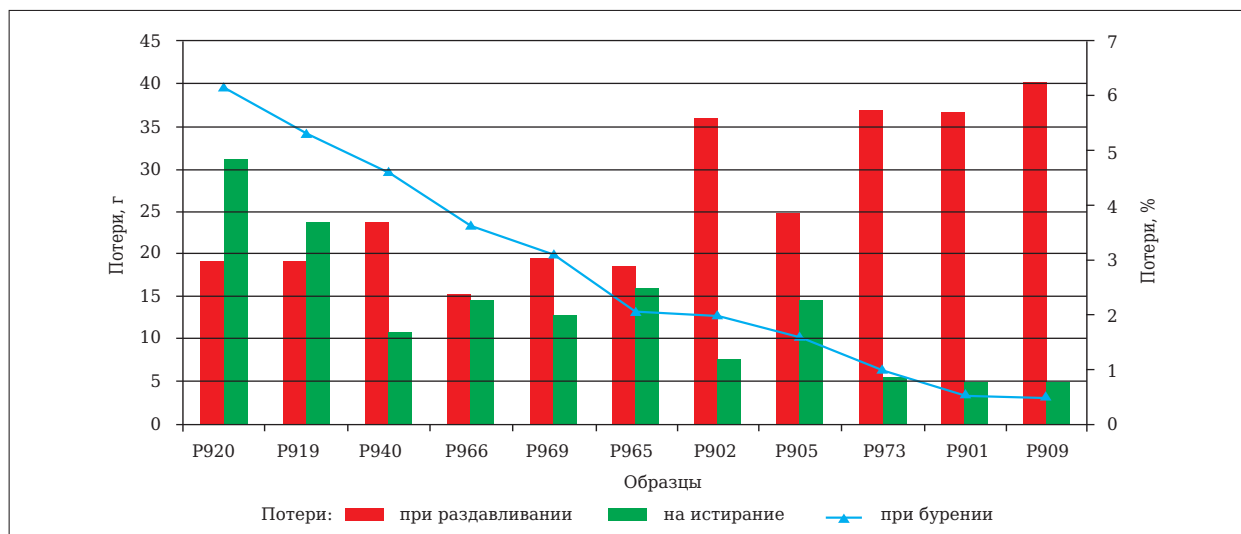
**Ключевые слова:** леточные массы, открытие летки методом бурения, абразивный способ открытия летки, общий коэффициент бурения.

Компанией «Riverside» были изучены несколько методов тестирования с целью повышения качества разрабатываемых леточных масс. В дополнение к традиционным методам исследования физических свойств масс при 260, 815, 1090, 1370 и 1425 °C изучены процессы проникновения доменного шлака в материал леточной массы.

Для открытия летки многих металлургических печей применяется метод бурения. Чем прочнее становятся леточные массы на практике, тем чаще ставится вопрос о возможности их последующего извлечения из летки бурильными машинами. На металлургическом заводе «Essar Steel Algoma» решение об использовании той или иной леточной массы при 1370 °C принимается на основе анализа данных о легкости открытия летки методом бурения в горячем состоянии. Поскольку для закрытия леток начали применять массы, содержащие металлические элементы и порошки, такие как, например, нитрид кремния, влияние этих добавок на прочность масс подвергли внимательному изучению. Специально разработанный тест на бурение предоставляет в этом смысле наибольшее количество информации. При проведении тестирования пробы нагревали, а затем бурили с использованием перфоратора. Время бурения составило 1 мин, одновременно замеряли глубину проникновения бура и потери массы. В качестве образцов при проведении исследова-

ний использовали цилиндры диаметром 50 мм, изготовленные методом прессования. Данный метод изготовления образцов применяется, когда нужно получить заготовки материала для изучения его плотности, а также для проведения регулярных тестовых испытаний.

Метод тестирования на абразивный износ также рассматривали в ходе проведенных исследований. Особое внимание обращали на результаты абразивного разрушения при добавлении в леточную массу нитрида кремния. Испытания проводили с целью разработки метода тестирования лабораторных образцов леточных масс, который позволял бы изучать их стойкость к абразивному износу. За основу были взяты факторы, определяющие скорость износа леточных масс, — эрозия и коррозия. Предполагалось, что проводимый тест на стойкость масс к разрушению путем трения позволит получить данные для изучения этих свойств. Тестирование проводили при строгом соблюдении стандарта на испытания материалов ASTM C704 Американского общества по испытаниям материалов (ASTM). Так как степень абразивного износа прямо пропорциональна силе трения, возникающей при бурении, было сделано предположение о наличии взаимосвязи между прочностью материала при 1370 °C и его податливостью во время сверления и абразивного разрушения. Ожидалось, что показатели этих трех свойств будут пропор-



**Рис. 1.** Соотношение показателей прочности при раздавливании в горячем состоянии, потерь на истирание (прочности на истирание) и потерь при бурении

циональны друг другу. На рис. 1 и 2 отражены результаты проведенных испытаний. На рис. 1 представлены данные о потерях материала при раздавливании при 1370 °С, о потерях на истирание (прочности на истирание) после разогрева материала до 1425 °С в разреженной атмосфере и потерях материала при бурении. Данные измерений потерь на истирание (прочности на истирание) и прочности образцов материала в горячем состоянии при 1370 °С показывают, что с увеличением прочности материала сокращаются его потери на истирание (его показатель прочности на истирание) и при бурении.

Для сравнения данных, полученных в ходе испытаний, использовали образцы леточных масс на нефтяном связующем. Введение в состав масс металлических и иных упрочняющих компонентов привело к определенному разбросу данных. Предполагалось, что такие показатели, как гранулометрический состав леточной

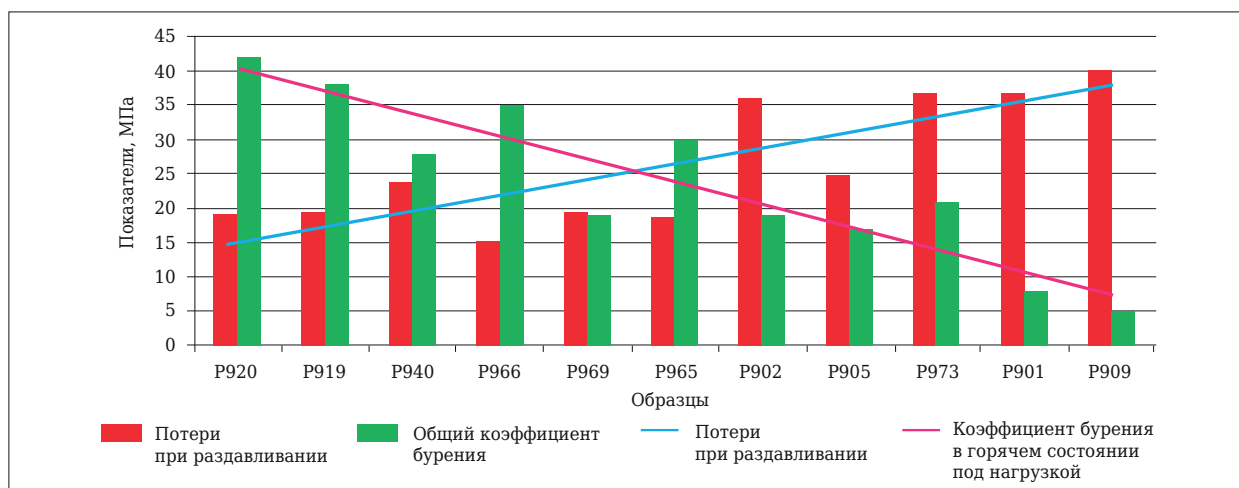
массы, качество глинозема и добавки, могут привести к неоднозначным результатам при попытке обобщения данных. Показатели свойств образцов леточных масс, таких как коэффициент бурения в горячем состоянии под нагрузкой, степень проникновения бура в массу, потери на истирание (прочность на истирание) и потери в объеме леточных масс при бурении оценивали по одиннадцатибальной системе. Эти четыре параметра определяли общий коэффициент бурения. Чем ниже получался общий коэффициент бурения, тем хуже поддавался материал бурению при открытии летки. При этом под общим коэффициентом бурения понималась глубина проникновения бура в образец леточной массы при заданных условиях тестирования.

Во время тестирования подтвердилось, что гранулометрический и компонентный составы леточной массы оказывают влияние на результаты испытаний.

#### Союзники на рынке материалов для доменного производства: производители огнеупорных материалов — VGH AG и «Riverside Refractories & Equipment Inc.» заключили союз для совместного освоения рынка леточных масс

В 2012 г. компания VGH AG начала сотрудничество с компанией «Riverside Refractories & Equipment Inc.» — ведущим американским производителем леточных масс. Благодаря инновационным технологиям и творческим идеям фирма «Riverside» заслуженно занимает ведущие позиции на огнеупорном рынке США и является перспективным и надежным партнером компании VGH AG. Фирма VGH AG, со своей стороны, зарекомендовала себя как компания, предлагающая эффективные высокотехнологичные решения в области огнеупоров, высококачественные огнеупорные материалы и квалифицированную техническую поддержку. Кроме того, компания располагает обширной экономической, финансовой и маркетинговой основой, а также опытом работы в осуществлении поставок огнеупорной продукции, производимых на производственных мощностях дочернего предприятия «theramer», как в страны СНГ (Украина, Республика Беларусь), Прибалтики, так и в Италию, Польшу, Германию и США.

Все эти преимущества компаний стали надежной основой для учреждения в начале 2013 г. совместного предприятия по производству леточных масс в Европе, которое направлено на удовлетворение спроса европейских клиентов в данных материалах.



**Рис. 2.** Соотношение коэффициента бурения в горячем состоянии под нагрузкой и общего коэффициента бурения, а также потерь при раздавливании

В таблице отображен другой подход к проведенным испытаниям — изучение взаимосвязи между содержанием глинозема в массах и общим коэффициентом бурения. Напомним, что общий коэффициент бурения является суммой вышеназванных параметров: коэффициента бурения в горячем состоянии под нагрузкой, степени проникновения бура в леточную массу, потерь на истирание и потерь объема леточной массы при бурении.

В ходе испытаний было выявлено, что чем меньше глубина проникновения бура, тем больше прочность леточной массы при раздавливании при 1370 °С и тем меньше потери массы на истирание и потери объема леточной массы при ее бурении. В целом это означает, что данный образец хуже поддается бурению. Полученные при тестировании данные обобщены в таблице.

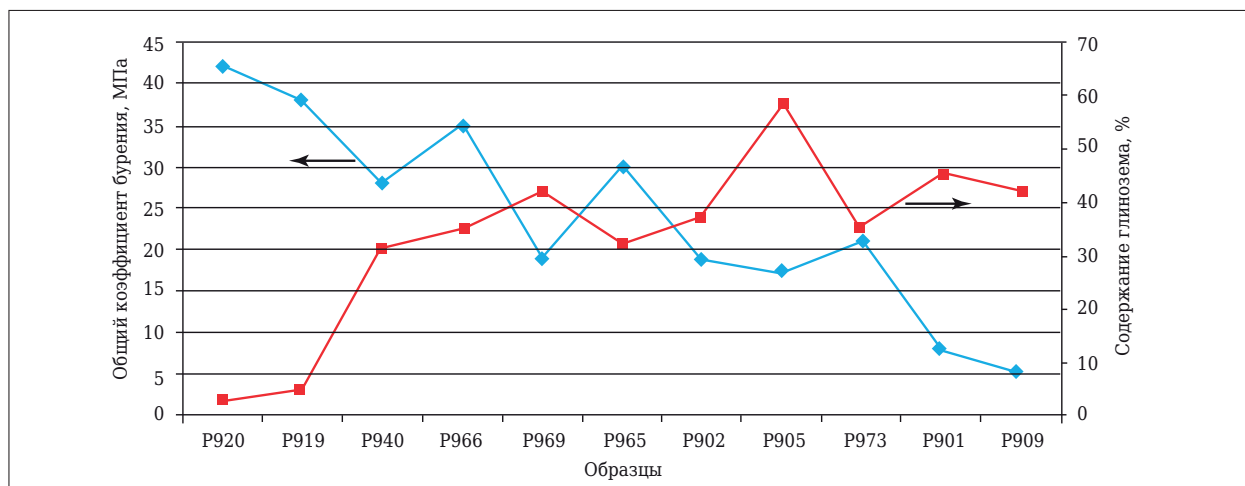
На рис.2 показано, что при увеличении коэффициента бурения в горячем состоянии под нагрузкой происходит рост потерь в объ-

еме массы. Линии на рис.2 означают, что с увеличением прочности леточной массы к воздействию силы давления в горячем состоянии общий коэффициент бурения снижается. Приведенные данные представляют собой выборку наилучших показателей исследуемых свойств. Неоднородность полученных данных объясняется тем, что при тестировании применяли леточные массы как на основе кремнезема, так и на основе глинозема. Нагрев леточных масс на основе кремнезема привел к формированию в них стекловидных образований, в результате чего увеличился показатель прочности при раздавливании.

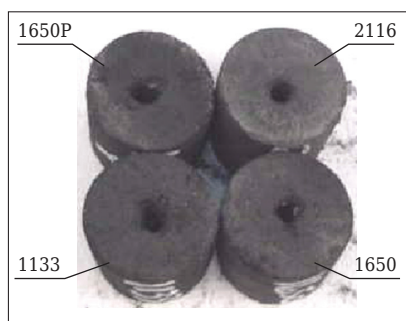
В ходе испытаний была сделана попытка классифицировать пробы леточных масс в порядке возрастания содержания в них глинозема. При этом рассматривалась возможность влияния гранулометрического состава проб на результаты проводимых испытаний. Было отмечено резкое снижение общего коэффициен-

#### Классификация леточных масс и их параметров

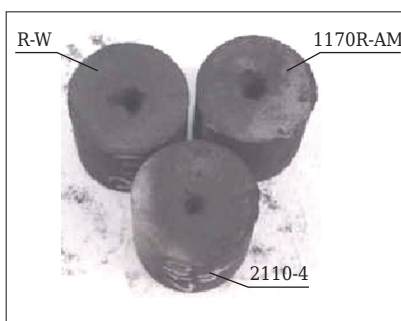
| Серия | Содержание глинозема, % | Коэффициент бурения в горячем состоянии под нагрузкой | Потери при истирании бура | Степень проникновения бура | Потери в объеме массы | Общий коэффициент бурения |
|-------|-------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| P920  | 5                       | 9                                                     | 11                        | 11                         | 11                    | 42                        |
| P919  | 8                       | 8                                                     | 10                        | 10                         | 10                    | 38                        |
| P940  | 30                      | 6                                                     | 5                         | 8                          | 9                     | 28                        |
| P966  | 35                      | 11                                                    | 7                         | 9                          | 8                     | 35                        |
| P969  | 43                      | 7                                                     | 6                         | 7                          | 7                     | 19                        |
| P965  | 32                      | 10                                                    | 9                         | 5                          | 6                     | 30                        |
| P902  | 38                      | 4                                                     | 4                         | 6                          | 5                     | 19                        |
| P905  | 58                      | 5                                                     | 8                         | 4                          | 4                     | 17                        |
| P973  | 35                      | 2                                                     | 3                         | 3                          | 3                     | 21                        |
| P901  | 47                      | 3                                                     | 1                         | 2                          | 2                     | 8                         |
| P909  | 42                      | 1                                                     | 2                         | 1                          | 1                     | 5                         |



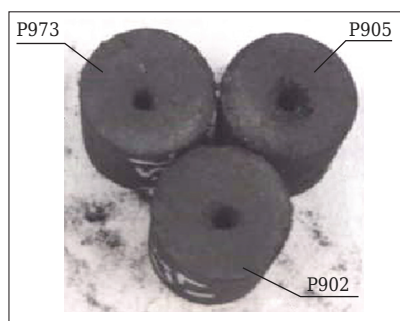
**Рис. 3.** Соотношение общего коэффициента бурения с содержанием глинозема в леточных массах



**Рис. 4.** Бурение леточных масс с высоким содержанием кремния



**Рис. 5.** Бурение проб алумосиликатных леточных масс серии P960



**Рис. 6.** Бурение пробы леточных масс с высоким содержанием алюминия

та бурения в материалах серий P960 и P900\*. Массы серии P900 являются производными от серии масс для ремонта. Во время испытаний наблюдалось уменьшение объема леточных масс с высоким содержанием кремнезема на 30 единиц и более. Чем выше общий коэффициент бурения, тем легче происходит открытие летки методом бурения.

На рис. 3 содержание глинозема в пробах увеличивается слева направо. Содержание кремнезема в материале образцов, расположенных в левой части графика, около 70 % при содержании в них глинозема 3—5 %. По направлению к правой части графика доля компонентов изменяется постепенно в реверсивном порядке. Пробы, расположенные в центре рис. 3, содержат около 35 % глинозема и около 35 % кремнезема.

### ОТКРЫТИЕ ЛЕТКИ МЕТОДОМ БУРЕНИЯ

Леточные массы серий P919 и P920, пробы которых представлены на рис. 4, классифицируются как материалы с высоким содержанием кремнезема. Показатели прочности этих масс и общего

\* В таблице эти серии материала не отражены.

коэффициента бурения находятся в обратно пропорциональной зависимости, т. е. при низкой прочности материала коэффициент бурения высокий и наоборот. Глубина проникновения бура в материал летки имеет большое значение, так как с увеличением этого показателя облегчается проведение работ по открытию летки. Однако необходимо учитывать, что если этот показатель слишком высок, то это свидетельствует о низкой прочности леточной массы.

Алумосиликатные леточные массы, представленные на рис. 5, были разработаны путем изменения гранулометрического состава и содержания нитрида кремния. Они входят в группу материала серии P960. Образец 2110-4 является самой прочной для бурения леточной массой в этой группе. Следует обратить внимание на маленький диаметр отверстия.

На рис. 6 показаны пробы леточных масс различных серий (см. таблицу) для доменных печей большого объема. Массы для восстановления летки доменных печей бурятся легче, так как материал более мелкозернистый и подвергался меньшему экструзивному давлению. Более высокая текучесть материала обуславливает его повышенную пористость и, следова-



| Ряд сверху | Обозначение образца (слева направо) |              |          |                          |
|------------|-------------------------------------|--------------|----------|--------------------------|
| 1          | R-2                                 | <b>2116</b>  | R-красн. | X2100                    |
| 2          | <b>1133</b>                         | <b>1650P</b> | 1175-7   | Масса для закрытия летки |
| 3          | 2117                                | 2100         | Re       | <b>1650</b>              |
| 4          | 2110-4                              | R-W          | R-AM     | R-красн.                 |

**Рис. 7.** Пробы леточных масс, прошедших испытание на абразивный износ

тельно, пониженную прочность. Образец серии P905 является леточной массой для ремонта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

Результаты исследования показаны на рис. 7. Масса для закрытия летки и образец 1650 являются высокремнеземистыми леточными массами, так же как и образцы 1133, 2116 и 1650P. Это отмечено жирным шрифтом. Содержание в образцах глинозема возрастает начиная со второго столбца справа, а также третьего ряда сверху, как отмечено стрелками на рис. 7.

При абразивном вскрытии летки предусматривается применение другого метода оценки эрозии леточного отверстия. Под влиянием потоков расплавленного металла и шлака возникает физическая и химическая эрозия леточного отверстия. Проведенные испытания показали, что метод открытия летки бурением имеет ряд преимуществ — низкие потери при истирании (низкую прочность на истирание), повышенный коэффициент бурения в горячем состоянии под нагрузкой, высокая степень проникновения бура, а также умеренные потери материала при открытии летки. Для того чтобы определить возможность открытия летки бурением, можно использовать несколько различных методов тестирования.

Особенно следует подчеркнуть, что на прочность заделки леточного отверстия доменных печей влияют как содержание глинозема в ле-

точной массе, так и конструкционные особенности самой летки. Предложенные к рассмотрению методы тестирования можно использовать и при разработке новых сортов леточных масс со все более высоким содержанием в них глинозема, и для оценки сложности бурения леточных масс при открытии летки. Это важный фактор, который необходимо учитывать при принятии решения о целесообразности применения для закрытия летки той или иной леточной массы. Следующим этапом на пути совершенствования технологии выбора характеристик применяемых леточных масс могла бы быть разработка специальных методов тестирования при определенных заданных температурах наряду с методами определения коэффициента бурения леточной массы в горячем состоянии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании общего коэффициента бурения, который сочетается с низкими потерями на истирание (прочностью на истирание) и высокой прочностью при раздавливании в горячем состоянии, а также при измерении степени проникновения при бурении и потерь материала можно применять различные виды тестирования, которые позволяют определить, насколько легко открыть летку методом бурения. Следует особенно подчеркнуть, что помимо содержания глинозема в леточной массе на прочность закрытия леточного отверстия доменной печи оказывают влияние и иные компоненты, входящие в состав леточной массы. Наряду с изучением влияния растущего содержания глинозема рассмотрены методы тестирования леточной массы, которые можно было бы использовать на практике заранее, еще на этапе выбора материала, так как оценка сложности бурения летки доменной печи — это важный фактор при принятии решения о целесообразности применения определенного материала для закрытия летки. Следующим этапом при оценке характеристик применяемых леточных масс наряду с методами определения прочности леточной массы при раздавливании в горячем состоянии могла бы стать разработка специальных методов тестирования при заданных температурах. ■

Получено 02.04.13

© М. Александер, В. Гартен, 2013 г.



**LMPC 2013 — Металлообработка и литье 2013**

**22—25 сентября 2013 г.**

**г. Остин, Техас, США**

# ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

- 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. Реферат и ключевые слова желательно представлять также в английском варианте. 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. Все материалы статьи редакция просит предоставлять в электронном виде.
- Если статья отправлена по e-mail, допускается оформление изображений только в виде отдельных файлов формата TIF (цветные и тоновые — 300 dpi, штриховые — 600 dpi), JPEG, CDR. Изображения (за исключением диаграмм Excel), введенные в файлы формата doc, в качестве оригиналов не принимаются, как не обеспечивающие стандартного качества полиграфического исполнения.
- Представляя рукопись в редакцию, авторы передают издательское право на публикацию ее в журнале. В качестве гонорара авторы получают 1 экземпляр журнала или оттиск своей статьи, 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, опубликованный 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.

## RULES OF DRAWING UP OF ARTICLES

- It is necessary to state in the article the aim of the research work, to cite factual data, to give their analysis and conclusions. The text of the article should be supplemented with a short abstract and key words. Both the abstracts and key words should be also presented in English. Bibliographical list should be drawn up in accordance to the standard GOST 7.1–2003. Please don't make references to sources which are difficult of access. Figures should be distinct, simplified and not overloaded with inscriptions. It is desirable not to scribe a graticule on the diagrams (with the exceptions of nomograms).
- Scientific degree, address and telephone of every author should be given in the article. All the materials of the articles are required to be presented to the editorial board in electronic form.
- If the article is sent by e-mail it is required to draw up the images only in the form of separate files in TIF format (tone images — 300 dpi, stroke images — 600 dpi), JPEG, CDR. Images (with the exception of Excel diagrams), introduced into files of doc format are not accepted as originals because they don't ensure the required standard polygraphic quality.
- Providing the article to the Editorial office the authors thereby convey the copyright of publication to the publisher. The authors get either one copy of the journal or one copy of the article as the compensation, the copy can be sent to the main author or to any other author (by authors' direction). It is not allowed offering the Editorial office an article which has been published by other journals or was sent to other publishing houses.
- The article sent to the editorial office by foreign author is refereed firstly by an independent reviewer. Then it is edited and red-penciled, then it is translated into Russian and published in the journal «Novye Ogneupory». Further both the article and the original author's article are sent off to be published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics». Thus the final article published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics» can vary slightly from the original variant sent by the author. The article published in the journal «Novye Ogneupory» forwarded also to the author by e-mail in pdf format.

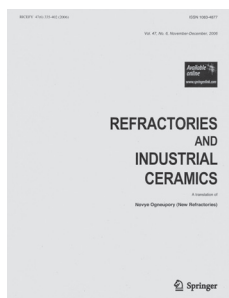
## Технические требования к рекламе внутри журнала «Новые огнеупоры» (для каждой страницы)

- Формат документа до обреза 215×300 мм, после обреза: ширина 205 мм, высота 290 мм. Необходимая прибавка (на обрез) по 5 мм со всех сторон.
- Значимые элементы (текст или изображение) должны отстоять не менее чем на 7 мм от края документа (205×290 мм). Разрешение, необходимое для печати, 300 dpi, формат документа TIF, jpeg, цветовая модель CMYK.

## Technical requirements to advertising in the journal «New Refractories» (for every page)

- Format of a document to the edge 215×300 mm, after the edge: width 205 mm, height 290 mm. Necessary addition (for the edge) 5 mm on every side.
- Important elements (text or images) should be placed not less than 7 mm from the edge of document (205×290 mm). Resolution required for printing is 300 dpi, document format is TIF, JPEG, color model CMYK.

## 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:

[www.springerlink.com/content/1083-4877](http://www.springerlink.com/content/1083-4877).

Редакция

К. Т. Н. С. Р. Замятин, В. Е. Гельфенбейн, Ю. Л. Журавлёв, О. Л. Бабакова

ЗАО «Опытный завод огнеупоров», г. Верхняя Пышма, Россия

УДК 666.762.1:666.974.2].001.8

## ХРОМИСТЫЙ ГЕКСААЛЮМИНАТКАЛЬЦИЕВЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ И БЕТОНЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

Разработан объемопостоянный высокоглиноземистый бонитовый заполнитель на основе обожженного шлака, образующегося при производстве металлического хрома. Содержание гексаалюмината кальция  $\text{CaO}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  при обжиге шлака при различных температурах увеличивается от 55–60 до 70 % (обжиг при 1450 °С) и до 90 % (обжиг при 1650 °С). Разработаны составы низкоцементных бетонов на основе хромистого бонитового заполнителя.

**Ключевые слова:** хромистый бонит, огнеупорный заполнитель, фазовый состав, термомеханические характеристики, низкоцементный бетон.

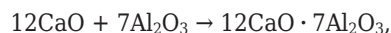
**П**роблема получения качественных отечественных высокоглиноземистых заполнителей для огнеупорных бетонов является актуальной в связи с отсутствием для их изготовления необходимых сырьевых материалов (бокситов, андалузитов). Цены на высокоглиноземистое сырье на мировом рынке в последние годы резко повысились [1].

Задача заключается в разработке альтернативного высокоглиноземистого сырья, не зависящего от поставки китайского сырья.

Фирмами «Алматис ГмбХ», Германия, и «Алматис Инк.», США, разработан [2] и изучен [3] синтетический огнеупорный заполнитель гексаалюминатного состава. Содержание  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$  в нем составляет от 40 до 90 %; другие минеральные фазы представлены корундом ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и низкоглиноземистыми алюминатами кальция ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Заполнитель характеризуется высокой плотностью, которая достигает 90 % от теоретической плотности  $\text{CA}_6$ , и открытой пористостью 5–15 %. Синтетический заполнитель известен как бонит и обладает рядом уникальных свойств, таких как высокая огнеупорность, низкая растворимость в железосодержащем шлаке, повышенная стабильность в восстановительной атмосфере (например, в СО), высокая химическая устойчивость в щелочной среде, низкая смачиваемость расплавами как черных, так и цветных металлов. Благодаря сочетанию этих показателей бонит перспективен для использования в алюминиевой, цементной, нефтехимической отраслях промышленности, а также в черной металлургии.

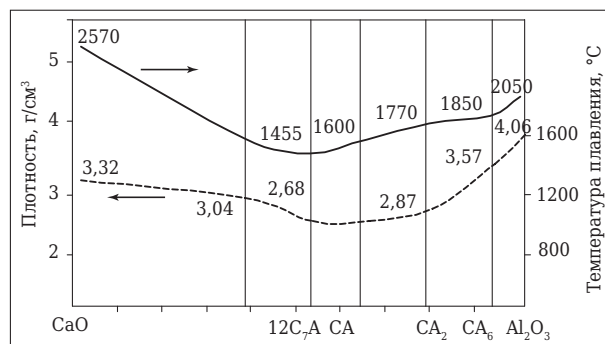
Технология получения спеченного бонитового заполнителя основана на формовании брикетов из чистых тонкомолотых исходных материалов, последующем их спекании при высокой

температуре и дроблении до необходимого зернового состава. При нагревании исходной шихты в соответствии с диаграммой состояния системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  последовательно образуются следующие минералы с увеличением объема [4] в связи с изменением их плотности (рис. 1):



Следует отметить, что получить гомогенный по фазовому составу бонитовый заполнитель плавлением не представляется возможным из-за перитектического поведения гексаалюмината кальция [3]. При охлаждении расплава при взаимодействии корунда с жидкой фазой помимо гексаалюмината кальция кристаллизуются также высокоосновные алюминаты кальция, препятствующие получению в бетонах стабильной структуры при их службе.

Широкое использование бонитовых бетонов сдерживается высокой стоимостью бонитового заполнителя и достаточно сложной технологи-



**Рис. 1.** Температура плавления (—) и плотность (---) алюминатов кальция

Таблица 1. Состав шлаков производства металлического хрома

| Состав                                                                                       | Шлаки                 |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
|                                                                                              | текущего производства | отвальные |
| Химический, мас. %:                                                                          |                       |           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                               | 81,3                  | 80,1      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                               | 9,5                   | 8,4       |
| SiO <sub>2</sub>                                                                             | 0,1                   | 0,1       |
| CaO                                                                                          | 7,5                   | 9,7       |
| MgO                                                                                          | 1,0                   | 1,1       |
| FeO                                                                                          | 0,7                   | 0,5       |
| Фазовый, %:                                                                                  |                       |           |
| (Al, Cr) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                         | 30–33                 | 15–20     |
| CaO · 6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> O · 12Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 55–60                 | 65–70     |
| CaO · 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                        | 3–4                   | 4–5       |
| CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                         | —                     | —         |
| 12CaO · 7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                      | 3–4                   | 2–3       |
| шпинель MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                 | 3–4                   | 2–3       |
| металлический хром                                                                           | 1–2                   | 1–2       |

ей его получения. Авторами настоящей статьи изучен алюминаткальциевый наполнитель, полученный из шлаков, образующихся при производстве металлического хрома, и известный как плавленный глиноземистый продукт марки ПГ-75 (ТУ 14-141-41—99) компании ОАО «Ключевский завод ферросплавов». Глиноземистый продукт ПГ-75, полученный из шлаков текущего производства и отвальных шлаков, при относительно постоянном содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (81—83 %) отличается нестабильностью фазового состава (табл. 1) [5]: содержание в нем хромистого гексаалюмината кальция CaO · 6(Al,Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет от 55 до 70 %, хромистого корунда (Al,Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15—33 %, шпинели Mg((Al,Cr)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 2—4 %, низкоглиноземистых алюминатов кальция 5—9 %, в том числе диалюмината кальция CaO · 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3—5 % и майенита 12CaO · 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2—4 %, металлического хрома 1—2 % [5]. Основу шлака составляет хромистый СА<sub>6</sub>, иначе СА<sub>6</sub> с изоморфной примесью трехвалентного

оксида хрома Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, называемый хромистым бонитом. Этот минерал аналогично СА<sub>6</sub> имеет гексагональную сингонию и характеризуется совершенной спайностью по четырем плоскостям, благодаря чему обладает наивысшей алюмофобностью, устойчивостью к другим металлическим расплавам, к восстановительной и щелочной средам, имеет низкую теплопроводность при высокой термостойкости.

Были отобраны три пробы шлака в виде кусков различной текстуры размерами 50—60 мм и исследованы после нагревания при 1450 и 1650 °С. Результаты исследования приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что шлак производства металлического хрома отличается не только фазовым составом, но и неоднородностью показателей: кажущаяся плотность отдельных проб изменяется от 3,0 до 4,3 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость — от 7,2 до 19,7 %; встречаются как плотные, так и разрыхленные структурные разновидности. При нагревании шлака при 1450 °С

Таблица 2. Изменение свойств шлака при нагревании

| Проба                                | Кажущаяся плотность*, г/см <sup>3</sup> | Открытая пористость*, % | Изменение массы*, % | Усадка по осям, %  |
|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| <i>Шлак исходный</i>                 |                                         |                         |                     |                    |
| 1                                    | 3,00                                    | 7,20                    | —                   | —                  |
| 2                                    | 3,00                                    | 19,70                   | —                   | —                  |
| 3                                    | 4,30 (3,40)                             | 13,00 (13,30)           | —                   | —                  |
| <i>Шлак после обжига при 1450 °С</i> |                                         |                         |                     |                    |
| 1                                    | 2,76                                    | 24,20                   | —5,60               | От +2,10 до +0,20  |
| 2                                    | 2,80                                    | 24,00                   | —0,08               | От +13,60 до +0,10 |
| 3                                    | 2,88 (2,81)                             | 20,00 (23,00)           | —0,90 (—2,19)       | От +4,60 до —2,05  |
| <i>Шлак после обжига при 1650 °С</i> |                                         |                         |                     |                    |
| 1                                    | 2,65                                    | 26,00                   | —3,50               | От +0,60 до —0,60  |
| 3                                    | 2,90 (2,78)                             | 17,00 (21,50)           | —0,50 (—2,00)       | От —0,02 до —0,30  |

\* В скобках указаны средние значения.

Таблица 3. Составы бонитовых низкоцементных бетонов

| Компонент                                                       | Содержание компонента, мас. %, в составе |                        |                  |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------|
|                                                                 | бонитовом                                | бонитокарбидкремниевом | бонитошпинельном |
| Заполнитель на основе $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ | 70                                       | 55                     | 54               |
| Шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$                | —                                        | —                      | 16               |
| Карбид кремния $\text{SiC}$                                     | —                                        | 15                     | —                |
| Тонкомолотый глиноземистый материал                             | 20                                       | 20                     | 20               |
| Цемент (75 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ )                          | 10                                       | 10                     | 10               |
| Дефлокулянт (сверх 100 %)                                       | 0,15                                     | 0,15                   | 0,15             |
| Вода (сверх 100 %)                                              | 6,0                                      | 9,7                    | 5,1              |

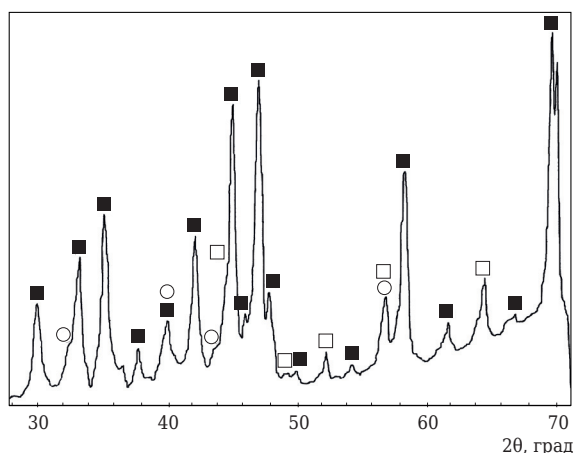
Таблица 4. Свойства бонитовых низкоцементных бетонов

| Показатели                                                                   | Состав                                   |                        |                  |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------|
|                                                                              | бонитовый                                | бонитокарбидкремниевый | бонитошпинельный |
| Массовая доля (на прокаленное вещество), %:                                  |                                          |                        |                  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                                                      | 80                                       | 65                     | 74               |
| $\text{CaO}$                                                                 | 8,5                                      | 8,5                    | 8,5              |
| Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> :                                     |                                          |                        |                  |
| при 350 °С                                                                   | 2,96                                     | 2,47                   | 3,16             |
| при 1000 °С                                                                  | 2,88                                     | 2,36                   | 3,13             |
| при 1650 °С                                                                  | 2,86                                     | —                      | 3,13             |
| Открытая пористость, %:                                                      |                                          |                        |                  |
| при 350 °С                                                                   | 17,8                                     | 29                     | 15,4             |
| при 1000 °С                                                                  | 18,0                                     | 35                     | 15,5             |
| при 1650 °С                                                                  | 21,4                                     | —                      | 15,8             |
| Предел прочности при сжатии, МПа:                                            |                                          |                        |                  |
| при 350 °С                                                                   | 80                                       | 42                     | 98               |
| при 1000 °С                                                                  | 90                                       | 40                     | 124              |
| при 1650 °С                                                                  | 100                                      | —                      | 132              |
| Изменения линейных размеров, %:                                              |                                          |                        |                  |
| при 350 °С                                                                   | —                                        | —0,3                   | —0,08            |
| при 1000 °С                                                                  | —                                        | —0,1                   | +0,30            |
| при 1650 °С                                                                  | +0,5                                     | —                      | —0,60            |
| Температура деформации под нагрузкой $t_{0,6 \text{ p}}$ , °С                | 1650                                     | 1650                   | 1650             |
| Средняя скорость ползучести $\varepsilon_{t \text{ 25-15}}$ , мм/ч           | 0,1                                      | —                      | —                |
| Термостойкость (950 °С — воздух), %, при потере $\sigma_{\text{изг}}$ после: |                                          |                        |                  |
| 5 теплосмен                                                                  | 62,3                                     | —                      | —                |
| 10 теплосмен                                                                 | 56,7                                     | —                      | —                |
| Теплопроводность, Вт/(м·К)                                                   | На 30 % меньше, чем у корундового бетона | —                      | —                |

низкоглиноземистые алюминаты кальция пере-кристаллизуются в бонит, общее содержание которого увеличивается до 70 %. При этом шлак разрыхляется, его кажущаяся плотность снижается с 3,40 до 2,81 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость увеличивается с 13,3 до 23,0 %, рост отдельных разновидностей шлака достигает 13,6 %. Увеличение объема и разрыхление структуры при нагревании связано с кристаллизацией алюминатов кальция низкой плотности из исходных материалов большей плотности (см. рис. 1). Температура плавления различных алюминатов кальция определяется содержанием в них  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При нагревании до 1650 °С проис-

ходит преимущественно спекание, сопровождающееся уплотнением, усадкой и образованием стабильной микропористой структуры. Содержание  $\text{CaO} \cdot 6(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  увеличивается до 90 % (рис. 2).

Разработана технология получения плотного хромистого бонитового заполнителя путем обжига высокоглиноземистого шлака алюмотермического производства металлического хрома при 1500—1750 °С [6]. Полученный материал содержит минеральные фазы в следующем отношении, мас. %: хромистый гексаалюминат кальция  $\text{CaO} \cdot 6(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  86,0—94,0, хромистый корунд  $(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  1,5—10,0, шпин-



**Рис. 2.** Фрагмент дифрактограммы плавленного глиноземистого продукта марки ПГ-75, нагретого при 1650 °С: ■ —  $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ ; □ —  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ; ○ —  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

нель  $\text{Mg}(\text{Al},\text{Cr})_2\text{O}_3$  2,0—4,0, диалюминат кальция  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  0,1—0,5. Объемопостоянство полученного заполнителя позволяет использовать его в огнеупорных бетонах при более высоких температурах; при этом исключается неравномерный рост отдельных слоев при нагревании бетона.

Разработана технология низкоцементных бетонов с использованием плотного хромистого бонитового заполнителя. Составы и свойства низкоцементных бетонов с использованием бонитового заполнителя и глиноземистой связки приведены в табл. 3 и 4. Бетоны на основе хромистого бонитового заполнителя отличаются объемопостоянством и высокими физико-керамическими показателями (см. табл. 4).

Использование хромистого бонитового заполнителя целесообразно для изготовления низкоцементных бонитовых бетонов на глиноземистой связке, с которой бонит хорошо сочетается без ухудшения огневых свойств даже при значительном колебании содержания  $\text{CaO}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Попытки использования шлака для производства алюмосиликатных огнеупоров (системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—CaO—SiO}_2$ ) приводят к резкому ухудшению их деформативных свойств [8]. Низкоцементные бетоны на основе хромистого бонитового заполнителя находят широкое применение в различных тепловых агрегатах и устройствах. Бетоны успешно испытаны в футеровке дна сталеразливочных ковшей, используются для изготовления гнездовых блоков, горелочных камней, в печах для переработки нефтешламов и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан хромистый бонитовый заполнитель для огнеупорных бетонов. После обжига

шлака производства металлического хрома при 1650 °С количество гексаалюмината кальция  $\text{CaO} \cdot 6(\text{Al},\text{Cr})_2\text{O}_3$  в шлаке увеличивается с 55—70 до 90 %. При этом перекристаллизация низкоглиноземистых алюминатов кальция в бонит происходит с разрыхлением структуры и последующим уплотнением. Полученный объемопостоянный заполнитель успешно используется для получения высокоглиноземистых низкоцементных бетонов.

## Библиографический список

1. **Амтхауэр, К.** Новые европейские клинкерные заполнители с содержанием 96 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / К. Амтхауэр, А. Бур, М. Шнабель [и др.] // Новые огнеупоры. — 2012. — № 12. — С. 12—18.
2. **Пат. 1178023 ЕП, МПК С04В 35/44; С04В 35/66.** Высокоплотный огнеупорный материал, содержащий гексаалюминат кальция / Гнаук В., Берг К., Бур А.; опубл. 06.02.02.
3. **Бюхель, Г.** Бонит — новый сырьевой материал, предлагающий новые возможности в производстве огнеупоров / Г. Бюхель, А. Бур, Д. Гириш, Р. Рэчел // Новые огнеупоры. — 2006. — № 7. — С. 66—72.
4. **Перепелицын, В. А.** Огнеупоры на основе гексаалюмината кальция / В. А. Перепелицын, Н. М. Пермикина // Вестник УГТУ. — 2000. — № 1. — С. 84.
5. **Перепелицын, В. А.** Техногенная сокровищница Урала / В. А. Перепелицын, В. М. Рытвин, В. Г. Игнатенко // Минеральное сырье Урала. — 2007. — № 4 (12). — С. 24—28.
6. **Пат. 2401820 Российская Федерация, МПК С1, С04В 35/44 (2006.01).** Огнеупорный заполнитель на основе хромистого гексаалюмината кальция и способа получения / Замятин С. Р., Гельфенбейн В. Е., Журавлёв Ю. Л., Матвеева О. Л.; заявл. 22.06.09; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29.
7. **Пат. 2437862 Российская Федерация, МПК С1, С04В 35/66, С04В 28/06, С04В 11/20 (2006/11).** Огнеупорная бетонная смесь (варианты) / Замятин С. Р., Гельфенбейн В. Е., Журавлёв Ю. Л., Бабакова О. Л.; заявл. 13.01.11; опубл. 27.11.11, Бюл. № 36.
8. **Босьякова, Н. А.** Изучение возможности применения высокоглиноземистых шлаков в производстве огнеупоров / Н. А. Босьякова, Э. В. Степанова, Е. В. Мурашко [и др.] // Новые огнеупоры. — 2012. — № 9. — С. 14—16.
9. **Bosyakova, N. A.** A study of the potential for the use of high-alumina slag in the production of refractories / N. A. Bosyakova, E. V. Stepanova, E. V. Murashko [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 53, № 5. — P. 289—291. ■

Получено 22.04.13

© С. Р. Замятин, В. Е. Гельфенбейн, Ю. Л. Журавлёв, О. Л. Бабакова, 2013 г.

ЗАО «ПКФ «НК», г. Старый Оскол Белгородской обл., Россия

УДК 666.762.1.043.2.001.8

## ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ ЗАО «ПКФ «НК»

Представлены сведения о созданных в ЗАО «ПКФ «НК» теплоизоляционных материалах. Приведены основные физико-химические свойства разработанных энерго- и ресурсосберегающих изделий.

**Ключевые слова:** энергосбережение, теплоизоляционные изделия, теплопроводность, футеровка, высокотемпературные теплоизоляционные материалы.

**В** настоящее время экономия энергии является одной из актуальных задач Российской Федерации. С сожалением приходится констатировать, что энергоемкость экономики России в 3 раза выше энергоемкости мировой экономики [1]. Очевидно, что важная роль в решении проблемы энергосбережения принадлежит высокоэффективной теплоизоляции тепловых агрегатов [2—4].

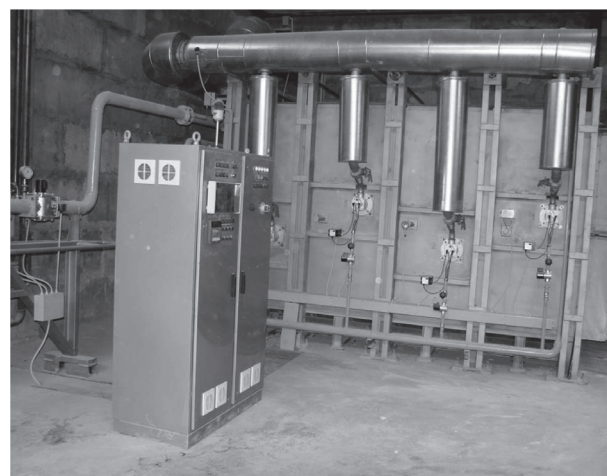
За последние 10 лет в ЗАО «ПКФ «НК» освоены целый ряд алюмосиликатных и корундовых теплоизоляционных изделий. Разработанные теплоизоляционные изделия имеют низкую и длительно не меняющуюся теплопроводность, достаточную механическую прочность, необходимую огнеупорность и неизменность свойств при высоких температурах. Построено производственный участок, включающий две печи — туннельную и периодического действия (рис. 1), контроль качества выпускаемой продукции осуществляется в современной лаборатории предприятия. Изделия поставляются в ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат», ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «Михайловский ГОК», ОАО «Лебединский ГОК» и др.

ЗАО «ПКФ «НК» производит алюмосиликатные теплоизоляционные изделия (в том числе по ГОСТ Р 52803) методом полусухого формования с использованием пустотелых гранул — зольных полых алюмосиликатных микросфер, которые выделяются из золы-уноса тепловых электростанций и образуются в результате грануляции расплава минеральной части каменного угля при его сжигании. Эта технология получила достаточно широкое применение благодаря тому, что изделия из полусухих масс не требуют механической обработки в отличие от изделий, получаемых на основе пенометода. Это существенно облегчает технологический процесс производства. В частности, не требуется использование резательных станков. Отсутствие механической обработки снижает количество обслуживающего персонала, а также

не требует складирования и использования обрезки. Кроме того, применение полусухого способа формования облегчает выпуск фасонных изделий. Изделия формируются преимущественно методом объемного вибропрессования. В некоторых случаях используют статическое прессование и ручное трамбование.

Применение микросфер позволяет получить достаточно широкую гамму алюмосиликатных теплоизоляционных изделий как по плотности, так и по максимальной температуре эксплуатации (см. таблицу). Предприятие производит также алюмосиликатные изделия пластическим способом формования без использования микросфер (ШЛ-1,3 по ГОСТ 5040 и др.). К сожалению, этот способ не лишен недостатков. Размеры изделий, сформованных из пластичных масс, значительно уменьшаются при сушке и обжиге, что ведет к деформации изделий. Кроме того, метод не позволяет получить изделия с низкой кажущейся плотностью. Однако отсутствие микросфер в составе шихты существенно снижает себестоимость продукции.

ЗАО «ПКФ «НК» производит высокотемпературные теплоизоляционные изделия, в частности КЛ-1,1 (ГОСТ 5040), которые по-



**Рис. 1.** Периодическая печь участка производства теплоизоляционных изделий

## Некоторые характеристики теплоизоляционных изделий, выпускаемых ЗАО «ПКФ «НК»

| Показатели                                                         | NK-23         | NK-25         | NK-26         | NK-29         |
|--------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Массовая доля, %:                                                  |               |               |               |               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее                          | —             | —             | 50            | 63            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более                          | —             | —             | 1,0           | 1,0           |
| Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> , не более                  | 0,5           | 0,8           | 0,8           | 1,35          |
| Остаточные изменения размеров, %, не более (при температуре, °С)   | 1,0<br>(1200) | 1,0<br>(1300) | 1,0<br>(1350) | 1,1<br>(1500) |
| Предел прочности при сжатии, МПа, не менее                         | 1,2           | 2,5           | 2,5           | 4,0           |
| Теплопроводность, Вт/(м·К), не более, при средней температуре, °С: |               |               |               |               |
| (350±25)                                                           | 0,20          | 0,35          | 0,35          | 0,55          |
| (650±25)                                                           | 0,25          | 0,40          | 0,40          | 0,60          |

ставляются уже в течение нескольких лет для футеровки арматурного слоя вакуум-камер и установок металлизации цеха окомкования и металлизации ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Предприятием изготавливаются также для различных тепловых агрегатов корундовые теплоизоляционные изделия марки КЛ-1,3 (ГОСТ 5040).

На некоторых промышленных предприятиях (огнеупорных, керамических) достаточно широко используются высокотемпературные печи периодического действия. Футеровка таких печей в процессе службы подвергается резкому нагреву и охлаждению, в результате чего между поверхностью и внутренней частью материала возникает перепад температур; при снижении температуры возникает обратный процесс. При неоднородном распределении температур в материале из-за различия ТКЛР высокотемпературной и низкотемпературной частей материала возникает напряжение, которое может привести к разрушению материала [5]. Согласно теории двух стадий термостойкости разрушение материала под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождения трещин и их роста. Зародившиеся трещины в гетерогенных материалах развиваются медленно или могут вообще не развиваться [6]. Известно, что одним из распространенных методов повышения термостойкости керамики является армирование волокнами, препятствующими распространению зародышевых трещин [7].

ЗАО «ПКФ «НК» выпускает изделия NK-29 с повышенной термостойкостью (см. таблицу). Изделия состоят из высокоглиноземистого легковесного заполнителя, сцепленного круглыми, тонкими извилистыми алюмосиликатными волокнами, контактирующими в отдельных зонах между собой и с зернами заполнителя (рис. 2). Присутствие волокон в огнеупоре

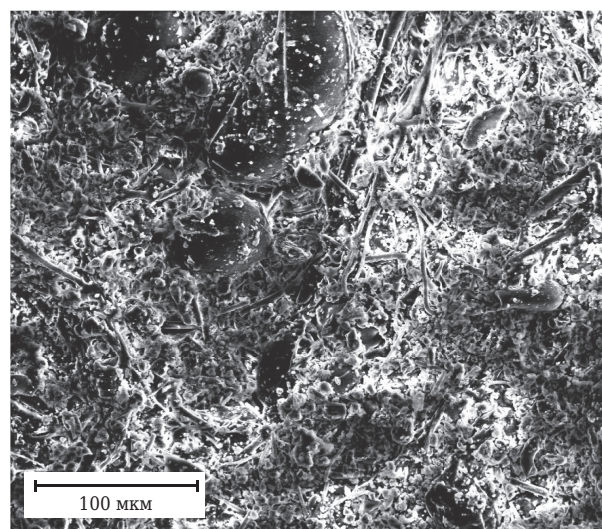


Рис. 2. Микроструктура изделия марки NK-29

обеспечивает ему устойчивость к резким температурным колебаниям. Кроме того, благодаря такой структуре доля теплового потока, передающаяся кондукцией по волокнам к заполнителю изделий, невелика. Это является следствием значительного теплового сопротивления образующихся таким образом точечных контактов. В данном случае основной вклад в общий поток тепла вносит молекулярный, конвективный и лучистый перенос тепла в пространстве между волокнами и заполнителем. Последняя составляющая доминирует при высоких температурах эксплуатации изоляции [7].

Во многих работах по анализу эффективной теплопроводности  $\lambda_{изл}$  приводится выражение для радиационной теплопроводности [8]:

$$\lambda_{изл} = 4f\sigma T^3 \delta,$$

где  $f$  — коэффициент, связанный с оптико-геометрическими характеристиками, принятой моделью поры и схемой расчета, для пор в

гомогенном материале со степенью черноты  $\varepsilon_m$  принимают  $f = \varepsilon_m / (2 - \varepsilon_m)$  [7];  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $T$  — температура;  $\delta$  — размер поры.

Как видно из формулы,  $\lambda_{изл}$  зависит не только от температуры, степени черноты поверхности, но и от особенностей пористой структуры. Особенно велик вклад излучения в эффективную теплопроводность крупнопористой огнеупорной теплоизоляции в связи с малым поглощением его в порах [8]. Вкладом излучения, например, объясняется то, что шамотные изделия с крупными порами при высокой температуре более теплопроводны, чем изделия с мелкими порами, при одинаковой пористости. До 500 °С, наоборот, изделия с мелкими порами более теплопроводны [6]. Очевидно, что для конкретной температуры эксплуатации теплоизоляционных материалов имеется некоторая оптимальная поровая структура, при которой в наибольшей степени подавляется передача тепла. Разработанные изделия НК-29 имеют мелкопористую структуру, обеспечивающую сравнительно невысокое значение радиационной составляющей эффективной теплопроводности (см. рис. 2). Как было показано выше, это чрезвычайно важно для высокотемпературной теплоизоляции.

Теплоизоляционные изделия НК-29 находят применение в различных тепловых агрегатах. Так, они показали длительный срок службы в печи периодического действия ЗАО «ПКФ «НК» (см. рис. 1). Печь эксплуатируется уже более пяти лет при максимальной температуре 1490 °С. Изделия НК-29 были установлены в рабочий слой футеровки как стен, так и свода этой печи. Следует отметить, что отсутствие плотных огнеупоров в конструкции этой периодической печи существенно снижает аккумуляцию тепла кладкой. Изделия НК-29 успешно были применены в рабочем слое футеровки агрегата горячего цинкования ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» и печей обжига керамической плитки ОАО «Объединение строительных материалов и бытовой техники» (г. Старый Оскол). В 2012 г. при ремонте

туннельной печи ЗАО «ПКФ «НК» изделия НК-29 были использованы также в зоне обжига. Имеются и другие успешные примеры использования этих изделий.

Ассортимент выпускаемых теплоизоляционных изделий не ограничивается приведенными выше примерами. Он постоянно расширяется, а применяемые технологии непрерывно совершенствуются. ЗАО «ПКФ «НК» планирует и в дальнейшем уделять особое внимание освоению новых видов теплоизоляционных материалов и приглашает к сотрудничеству в промышленном применении выпускаемой продукции.

### Библиографический список

1. **Лисиенко, В. Г.** Хрестоматия энергосбережения : справочное издание : в 2 кн. Кн. 1 ; под ред. В. Г. Лисиенко / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. — М. : Теплоэнергетик, 2002. — 688 с.
2. **Ижорин, М. Н.** Сооружение промышленных печей. Том II. Строительство печей : справочное издание ; под ред. М. Н. Ижорина / М. Н. Ижорин, Ю. П. Сторожков. — М. : Теплотехник, 2006. — 720 с.
3. **Исламов, М. Ш.** Проектирование и эксплуатация промышленных печей / М. Ш. Исламов. — Л. : Химия, 1986. — 280 с.
4. **Кащеев, И. Д.** Свойства и применение огнеупоров : справочное издание / И. Д. Кащеев. — М. : Теплотехник, 2004. — 352 с.
5. **Масленникова, Г. Н.** Керамические материалы / Г. Н. Масленникова, Р. А. Мамаладзе, С. Мидзута, К. Коумото. — М. : Стройиздат, 1991. — 320 с.
6. **Стрелов, К. К.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. — М. : Металлургия, 1985. — 480 с.
7. **Кац, С. М.** Высокотемпературные теплоизоляционные материалы / С. М. Кац. — М. : Металлургия, 1981. — 274 с.
8. **Литовский, Е. Я.** Теплофизические свойства огнеупоров : справочное издание / Е. Я. Литовский, Н. А. Пучкевич. — М. : Металлургия, 1982. — 152 с. ■

Получено 04.04.13  
© Р. В. Зубашенко, 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



12<sup>th</sup> International Conference on Ceramic Processing Science (ICCPs-12)  
August 4-7, 2013 | Portland, Oregon  
Abstracts due February 6, 2013

**12-я Международная конференция по процессам обработки керамики (ICCPs-12)**  
4-7 августа 2013 г. г. Портланд, США

Д. Т. Н. А. И. Афанасьев, Д. Т. Н. С. А. Ляпцев, Д. Т. Н. В. Я. Потапов

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

УДК 622.367.6:621.928.6

## ХАРАКТЕРИСТИКИ АСБЕСТОСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ ДЛЯ ИХ РАЗДЕЛЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований асбестосодержащих горных пород, на основании которых разработана методика математического моделирования процесса разделения и расчета конструктивных параметров разделительных аппаратов.

**Ключевые слова:** барабанно-полочный фрикционный сепаратор, асбестовая руда, фрикционные и упругие характеристики, математическое моделирование.

Совершенствование технологических аппаратов горного производства в последние годы осуществляется за счет введения в рудоподготовительный передел аппаратов предварительного разделения горной массы, позволяющих после первых стадий дробления удалять из процесса породные фракции. Предварительное разделение может быть реализовано гравитационными, магнитными или специальными методами — избирательным дроблением-грохочением, радиометрической сепарацией и т. д. Чаще всего в практике разработки конструкций горных машин для разделения и классификации руд используют различие в трении и упругости минералов. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании и проектировании разделительных аппаратов является создание аппаратов, использующих комплекс физико-механических свойств горных пород [1, 2], что обеспечивает более полное разделение полезных ископаемых в одном аппарате.

Разработка и совершенствование аппаратов для разделения горных пород напрямую связана с комплексной оценкой вещественного состава и физико-механических свойств руды. На основании этих исследований происходит выбор признаков, которые и являются основными критериями для разработки аппаратов. Особый интерес представляют физические характеристики асбеста и вмещающих пород, связанные с упругостью и трением. Упругие свойства частиц характеризуются коэффициентом восстановления  $k$ , трение скольжения — коэффициентом статического трения  $f$  и кинематического трения  $f_{ск}$ , а также коэффициентом трения при ударе  $\lambda$ .

Для создания аппаратов разделения горных масс по упругим и фрикционным характеристикам авторами разработана методика отбора

и ранжирования значимых признаков. Методика проверена на основе анализа априорной информации, полученной из опыта применения технологии сепарации асбеста, слюды и угля. Так, слюда имеет связь по фрикционным характеристикам, определяемым корреляционным отношением  $\eta = 0,98$  с информационным весом признака 0,168. В ранге признака фрикционные характеристики угля стоят на 3-м месте с информационным весом 0,131. Установленные значимые параметры определяли экспериментально и использовали в дальнейшем для математического моделирования поведения разделяемого продукта в проектируемых аппаратах.

Для исследований свойств монофаз асбестовой руды были отобраны различные продукты: исходная руда, черновые концентраты, промпродукты и т. д. Эти продукты были классифицированы по крупности на ситах с размером ячеек 40, 35, 20, 12, 8, 6, 4, 2,5, 1,2 и 0,63 мм. Полученные классы крупности вручную и с помощью различных разделительных аппаратов были разделены на такие монофазы, как свободное распушенное волокно, свободное нераспушенное волокно («пешка»), породные фракции игольчатой, кубической и близкой к кубической формы. Эти формы принимает исходная руда по мере прохождения по стадиям рудоподготовки к разделению. В связи с невозможностью выделения зерен различной формы в продуктах крупностью менее 4 мм они были разделены только на свободно распушенное волокно и породу. Для полной характеристики состава исходной руды исследовали типы руд, представленные мелкой сеткой, крупной сеткой, отороченными жилами, состоящие из асбеста и породных минералов (серпентинита, перидотита и офита).

Для измерения коэффициента статического трения использована известная методика,

закрывающаяся в плавном увеличении угла наклона плоскости с расположенными на ней изучаемыми частицами и фиксации угла наклона движения частиц. Коэффициент статического трения есть тангенс угла наклона, при котором начинается скольжение частицы по плоскости [3]. Чтобы установить коэффициент кинетического трения, необходимо установить наклонную плоскость под углом, превышающим угол трения покоя на  $2-3^\circ$ , и измерить время прохождения частицей участка плоскости фиксированной длины. Коэффициент кинетического трения рассчитывается по формуле [4]:

$$f_{\text{ск}} = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2S}{gt^2 \cos \alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол наклона плоскости, град;  $S$  — длина участка, м;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $t$  — время прохождения частицей участка  $S$ , с.

Примеры экспериментального определения коэффициентов статического и кинетического трения показаны на рис. 1, а, б. Исследования

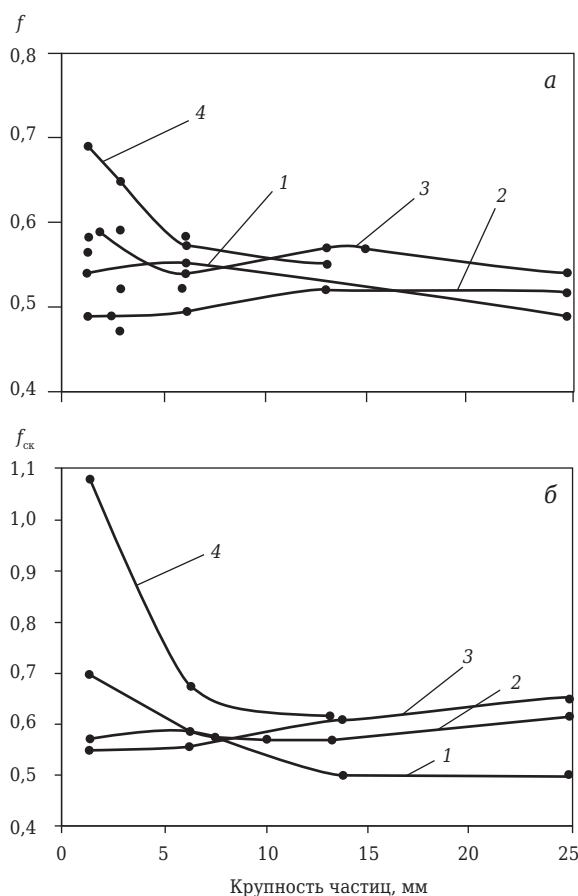


Рис. 1. Зависимости коэффициентов статического  $f$  (а) и кинетического  $f_{\text{ск}}$  (б) трения горных пород по поверхности, покрытой резиной, от крупности частиц: 1 — асбест; 2 — перидотит; 3 — серпентинит; 4 — оливин

показали, что коэффициенты статического и кинетического трения асбеста изменяются в широком диапазоне, что позволяет при выборе параметров отделения асбеста от породных включений использовать это для формирования поверхности загрузочных и разделительных устройств аппаратов.

Для определения коэффициентов восстановления и трения при ударе авторами настоящей статьи разработана собственная методика, основанная на обработке результатов измерения расстояния  $l_i$  от места удара частицы, брошенной с высоты  $h_i$  на наклонную плоскость, до места ее падения на горизонтальную плоскость (рис. 2). Согласно этой методике указанные коэффициенты определяются как аргументы, доставляющие минимум функционалу [4]:

$$F(\lambda, k) = \sum_{i=3}^n \left\{ \frac{4h_i}{l_i} (k+1) (\operatorname{tg} \alpha_i - \lambda) \times \right. \\ \left. \times [k - \operatorname{tg} \alpha_i (\operatorname{tg} \alpha_i - k\lambda - \lambda)] - \cos^4 \alpha_i \right\}^2, \quad (2)$$

где  $n$  — число испытаний для различных углов наклона плоскости  $\alpha_i$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в УГГУ и НИИ-проектасбесте (г. Асбест Свердловской обл.), позволил установить следующие основные закономерности.

1. Упругие свойства асбестового волокна зависят от его агрегатного состояния: с увеличением расщепленности их упругость снижается, при удельной поверхности  $3000-5000 \text{ см}^2/\text{г}$  волокно приобретает свойства абсолютно неупругого тела. Основной причиной значительного рассеяния дальности отскока агрегатов волокон является их вытянутая форма, приводящая к косому удару. В этом случае центр тяжести частицы значительно смещен от линии удара. У породных частиц, имеющих округлую фор-

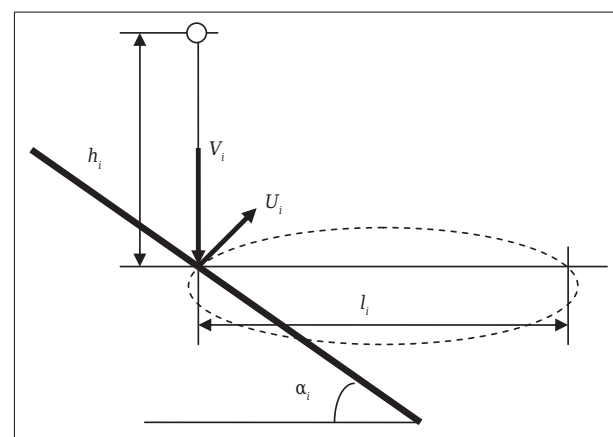


Рис. 2. Расчетная схема при проведении испытаний упругих и фрикционных свойств горных пород при ударе

му, разброс дальности отражения значительно меньше. Относительное среднеквадратичное отклонение дальности их отражения при углах наклона плоскости  $20\text{--}30^\circ$ , как правило, составляет  $30\text{--}40\%$ .

2. Упругие свойства вмещающей породы в незначительной степени зависят от крупности частиц. Коэффициент восстановления увеличивается в среднем с 0,28 до 0,30 у частиц крупностью  $45+20$  мм и до 0,37 у частиц крупностью  $1,2+0,63$  мм. То есть контрастность данного признака разделения более ярко выражена, чем скорость витания асбестового волокна и породных частиц, которая практически сблизается в классах менее 1 мм.

3. Как для породных частиц, так и для нераспушенного асбестового волокна эффект взаимодействия с поверхностью разделения зависит от высоты подачи продукта и угла наклона поверхности к горизонту. Зависимости расстояния отражения породных частиц от высоты подачи и угла наклона поверхности разделения имеют унимодальный характер с экстремумом в интервале  $20\text{--}25^\circ$ .

Результаты серии проведенных испытаний послужили основанием для разработки конструкций нескольких аппаратов для разделения горных пород. Разработанные конструкции можно представлять как пассивный полочный сепаратор, состоящий из разгонной плоскости и установленных ниже ее полок различной конфигурации. Проведенные в 90-х годах XX века испытания по обогащению асбестовой руды показали потенциальную работоспособность сепаратора. Однако до настоящего времени его рациональные параметры не были определены, так как не было математической модели процесса сепарации. Разработанная авторами настоящей статьи математическая модель процесса сепарации основана на анализе уравнений движения материальной частицы в пространстве аппарата, содержащих силы взаимодействия частиц с элементами конструкций. Коэффициенты восстановления и трения являются случайными величинами, меняющимися в установленных экспериментальными исследованиями пределах, поэтому процесс разделения в сепараторе является недетерминированным.

Математическая модель включает уравнения движения частицы на каждом этапе разделения. Некоторые из уравнений составлены в конечной форме, а некоторые являются дифференциальными. Так, уравнение движения частицы по узлу стратификации (шероховатой наклонной плоскости) записано с помощью известной теоремы об изменении кинетической

энергии для материальной точки [5], откуда получено значение скорости, приобретенной частицей в конце участка скольжения. Уравнения движения вдоль криволинейных образующих аппарата составлены в дифференциальной форме и проинтегрированы аналитически, а движение частицы в циркулирующем потоке воздуха интегрируется численно методом Рунге — Кутты непосредственно на компьютере. Кроме того, в систему уравнений движения включены соотношения при ударе частицы об установленные в аппарате полки. Комплекс составленных уравнений решается на компьютере для различных вариантов расположения элементов конструкций аппаратов, случайные величины реализуются с помощью датчика случайных чисел. В результате многократных расчетов для различных начальных условий производится статистический анализ разброса частиц с различным содержанием полезного компонента и подбираются параметры устройств, обеспечивающие максимальный разброс.

Имитационное моделирование процесса разделения позволило усовершенствовать конструкцию барабанно-полочного фрикционного сепаратора [6], а также разработать принципиально новое разделительное устройство — сепаратор для разделения материалов по трению и упругости [7]. Барабанно-полочный фрикционный сепаратор работает следующим образом. Исходный материал, состоящий из частиц, разных по физическим свойствам, подается на наклонную поверхность. В результате движения материала по этой поверхности происходит расслоение материала. Частицы, обладающие высоким коэффициентом трения, разгоняются незначительно и на сходе с криволинейной поверхности продолжают двигаться по более крутой траектории, чем породные частицы. Далее частицы ударяются о барабан, вращающийся навстречу потоку материала, падающего с наклонной поверхности. Имея разные упругие характеристики, частицы от поверхности барабана отскакивают в приемники соответствующих фракций. В результате имитационного моделирования процесса разделения были установлены угол наклона и радиус кривизны фрикционной поверхности, расположение и кинематические характеристики вращающегося барабана, места расположения приемников горной массы. Получено положительное решение на выдачу патента на соответствующий способ разделения сыпучих материалов [8].

Сепаратор по трению и упругости включает корпус с загрузочным лотком в виде наклон-

ной плоскости и отражательные элементы, закрепленные консольно. Разделение сыпучих материалов в этом сепараторе также осуществляется поэтапно: исходный продукт подается на поверхность желоба, который обеспечивает не только подачу материала в зону разделения, но и подготавливает материал к разделению с различными коэффициентами трения (в узле стратификации). После прохождения по желобу сформированный поток продуктов в виде веера подается на ярусно расположенные отражательные элементы, установленные таким образом, чтобы обеспечить полное ударное взаимодействие с исходным материалом. В результате этого взаимодействия образуется продольный веер разделяемых частиц материала. Неупругая (обогащенная) фракция располагается в начальной зоне веера, упругая (обедненная) — на противоположном его краю. В результате имитационного моделирования установлены схемы пространственного расположения отражающих элементов, углы наклона элементов к горизонту, расстояния между ярусами элементов, расстояния от нижней кромки загрузочного желоба до верхнего яруса элементов, положения отсекающих шиберов.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет всесторонне исследовать процесс разделения частиц по трению и упругим свойствам и служит для рассмотрения большого числа вариантов конструкций и оптимизации режимов работы аппарата при относительно небольших затратах, не прибегая к изготовлению макетов, опытных образцов и к их экспериментальному исследованию. Входящие в расчетные формулы коэффициенты трения покоя и трения скольжения, а также коэффициенты восстановления и размеры частиц являются случайными величинами, вследствие чего аналитически без ЭВМ рассчитать траекторию движения частицы и осуществить прогноз технологических показателей разделения практически невозможно.

## Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2007. — 317 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Трубчатый ленточный конвейер с переворотом холостой ветви ленты / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашчев, С. Н. Сычев, С. А. Ляпцев // Новые огнеупоры. — 2010. — № 7. — С. 10—15.
3. **Davydov, S. Ya.** Tubular belt conveyer with turnover of the return run of the belt / S. Ya. Davydov, I. D. Kashcheev, S. N. Sychev, S. A. Lyaptsev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 250—256.
4. **Гриб, В. В.** Лабораторные испытания материалов на трение и износ / В. В. Гриб, Г. Е. Лазарев. — М.: Наука, 1968. — 141 с.
5. **Потапов, В. Я.** Методика определения упругих и фрикционных характеристик сыпучих материалов / В. Я. Потапов, Е. Ф. Цыпин, С. А. Ляпцев, А. И. Афанасьев // Изв. вузов. Горный журнал, 1998. — № 5/6. — С. 103—108.
6. **Вебер, Г. Э.** Дополнительные главы механики для горных инженеров / Г. Э. Вебер, С. А. Ляпцев. — Свердловск: УрГУ, 1989. — 200 с.
7. **Потапов, В. Я.** Совершенствование барабанно-полощного сепаратора для разделения частиц, обладающих парусностью / В. Я. Потапов // Современные проблемы науки и образования (приложение «Технические науки»). — 2012. — № 6. — С. 4.
8. **Пат. 111780 Российская Федерация.** Сепаратор для разделения материалов по трению и упругости / Потапов В. Я., Афанасьев А. И., Ляпцев С. А., Цыпин Е. Ф., Потапов В. В., Иванов В. В.; заявл. 24.06.11; опубл. 27.12.11, Бюл. № 36.
9. **Пат. 201018658 «Д» Российская Федерация.** Способ разделения сыпучих материалов и устройство для его осуществления / Потапов В. Я., Цыпин Е. Ф., Потапов В. В., Иванов В. В.; заявл. 20.11.11; опубл. 20.11.11, Бюл. № 4. ■

Получено 21.03.13

© А. И. Афанасьев, С. А. Ляпцев, В. Я. Потапов,  
2013 г.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



7–11 октября 2013 г. г. Киев, Украина

Национальная академия наук Украины (НАНУ)  
Украинское материаловедческое общество (УМО)  
Национальный технический университет Украины «КПИ»  
Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ  
Национальный информационный центр по РП7 в Украине  
ООО «ИНТЕМ» (Украина)

4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «HighMatTech»

## 75 ЛЕТ ПРОФЕССОРУ ЕВГЕНИЮ СТЕПАНОВИЧУ ЛУКИНУ

**31** июля 2013 г. исполнилось 75 лет со дня рождения д. т. н., профессору кафедры химической технологии керамики и огнеупоров РХТУ им. Д. И. Менделеева **Е. С. Лукину**. Он родился в 1938 г. в г. Балашиха Московской области в семье служащего. После окончания средней школы в 1956 г. Евгений Степанович поступил в МХТИ им. Д. И. Менделеева, который окончил в 1961 г. с отличием и был оставлен для работы в институте на кафедре химической технологии керамики и огнеупоров в качестве старшего лаборанта. Затем последовательно занимал должности м. н. с., ассистента (1964—1968 гг.), доцента (1968—1988 гг.). С 1988 г. является профессором кафедры.

Без отрыва от основной работы в 1965 г. Евгений Степанович защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование некоторых свойств керамики чистых окислов при высоких температурах», в 1988 г. — докторскую на тему «Высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой», а в 1989 г. был утвержден в звании профессора. В докторской диссертации сформулированы основные закономерности явления наследования свойств предыдущей фазы последующей в керамической технологии, что является очень важным для конструирования составов и технологии керамических материалов с заданными структурой и свойствами.

Свою педагогическую работу Е. С. Лукин совмещает с плодотворной научно-исследовательской деятельностью. Он широко известен своими научными работами по технологии керамики, преимущественно в области технической керамики. Под его руководством выполнены уникальные работы по изучению термического старения различных видов плотной оксидной керамики и выпущена монография «Термическое старение керамики» (в соавторстве с Н. Т. Андриановым). Им разработаны прозрачные керамические материалы из оксидов иттрия, скандия, магния, циркония и соединений оксидов — иттрий-алюминиевого граната, шпинели, галлий-гадолиниевого граната; люминесцентная прозрачная керамика и новые неорганические сцинтилляторы; прочная керамика на основе титаната алюминия; метод гетерофазного осаждения при распылении для получения нанопорошков из разнообразных оксидов; высокопрочные керамические материалы на основе



оксидов иттрия, скандия, алюминия и иттрий-алюминиевого граната для электроизоляторов термоэмиссионных преобразователей энергии; керамика Сикор на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , превосходящая по прочности, химической стойкости в парах и плазме цезия и устойчивости к радиации все применяемые для этих целей виды керамики; впервые в мире синтезировано соединение — скандат иттрия и получена плотная керамика на его основе с высокой термостойкостью и улучшенными электроизоляционными и химическими свойствами; керамические ма-

териалы на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  и в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ — $\text{ZrO}_2$  с высоким уровнем свойств и температурой спекания 1300—1500 °С; керамика Рубиновый коралл для изготовления часовых камней и подшипников; пористый материал «Покер» для фильтрующих элементов, мембран, носителей катализаторов; специальных огнеупоров на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2$ ; высокоплотная и высокопористая биокерамика на основе гидроксипатита и другие материалы. Разработанные им материалы используют в авиастроении, космической технике, медицине, машиностроении, атомной промышленности, электронике и в других отраслях промышленности. За это время Е. С. Лукин подготовил около 320 инженеров-технологов, 24 кандидата наук, 1 доктора наук.

Е. С. Лукин — соавтор 5 монографий, основного практикума по технологии керамики и огнеупоров, нового учебника и практикума по специальности. Опубликовал около 340 статей, 51 авторское свидетельство и 15 патентов. Работал заместителем декана (1976—1982 гг.) и деканом (1988—1992 гг.), был членом партийного бюро факультета. Е. С. Лукин является действительным членом Академии инженерных наук, Международной академии информатизации, Российской академии естественных наук, член редколлегий журнала «Новые огнеупоры», член диссертационных советов РХТУ им. Д. И. Менделеева и БГТУ им. В. Г. Шухова.

Е. С. Лукин является заслуженным изобретателем СССР, отличником высшего образования, заслуженным работником высшей школы Российской Федерации, награжден золотой медалью Минвуза СССР и золотой медалью ВВЦ. В 2013 г. ему присуждена высшая награда Академии инженерных наук — медаль им. Н. Н. Семёнова.

**Коллектив кафедры химической технологии керамики и огнеупоров, а также редакционная коллегия и редакция журнала «Новые огнеупоры» поздравляют Евгения Степановича с юбилеем и желают счастья, здоровья и новых творческих успехов на благо науки о керамике.**

Д. Т. Н. Е. И. Суздальцев, Е. В. Горелова

ОАО ОНПП «Технология», г. Обнинск Калужской обл., Россия

УДК 666.762.2.017:620.197.7

## КВАРЦЕВАЯ КЕРАМИКА, ОБЪЕМНО-ПРОПИТАННАЯ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИМ СВЯЗУЮЩИМ СПИРОЦИКЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Представлен способ получения высокотермостойкой беспористой кварцевой керамики, заключающийся в объемной пропитке продуктом МФСС-8 (раствор метилфенилспиросилоксана в ацетоне) — кремнийорганическим связующим спироциклического строения. Представлены основные свойства полученного материала, результаты его апробации в конструкции изделий радиотехнического назначения.

**Ключевые слова:** объемно-пропитанная кварцевая керамика, кремнийорганическое связующее, полимеризация, изделия радиотехнического назначения.

**В** настоящее время в конструкции изделий радиотехнического назначения широко применяется кварцевая керамика, так как она является одним из лучших радиопрозрачных материалов. Однако на эксплуатационные характеристики изделий из кварцевой керамики сильно влияет ее открытая пористость (8—11 %), так как поглощение материалом влаги приводит к резкому изменению диэлектрических характеристик, что вызывает необходимость герметизации изделия [1]. Кроме того, кварцевая керамика является сравнительно малопрочным материалом, что значительно ограничивает область ее применения.

Одним из методов одновременного решения проблемы упрочнения пористых материалов и их влагозащиты является частичная или полная пропитка растворами кремнийорганических полимеров с их дальнейшей полимеризацией. Для упрочнения изделий из кварцевой керамики, используемой в условиях высокотемпературных воздействий с сохранением стабильности диэлектрических свойств, целесообразнее всего использовать термостойкие кремнийорганические полимеры, имеющие достаточно широкий интервал стабильности диэлектрических свойств. В зависимости от назначения изделия и требований, которые к нему предъявляются, используются следующие способы пропитки: полная пропитка; односторонняя пропитка на небольшую глубину (до 1 мм) или на глубину, переменную по высоте.

Идея использования кремнийорганических смол для защиты кварцевой керамики от воздействия внешних климатических факторов не нова [2]. Однако долгие годы в производстве изделий радиотехнического назначения исполь-

зовали так называемую поверхностную пропитку на незначительную глубину (до 1—2 мм). Это было вызвано опасениями, что при эксплуатации изделий из кварцевой керамики в результате интенсивного нагрева могут произойти деструкция полимера и возможное повреждение материала образующимися газами. Использование поверхностной пропитки кварцевой керамики имеет существенные недостатки. К основным недостаткам следует отнести то, что защита материала от влаги обеспечивается присутствием на поверхности керамики достаточно тонкой полимерной пленки, которая может быть легко нарушена даже при незначительном механическом воздействии. В результате этого материал начинает впитывать влагу, что отрицательно сказывается на его радиотехнических свойствах.

В результате проведенных исследований предположили, а впоследствии и доказали экспериментально, что обеспечить гарантированное нулевое водопоглощение кварцевой керамики возможно путем ее объемной пропитки кремнийорганической смолой — продуктом МФСС-8 (раствор метилфенилспиросилоксана в ацетоне). Выбор полимера обусловлен его хорошими адгезионными свойствами, высокой термостойкостью (до 450 °С длительно), отсутствием углерода в продуктах деструкции полимера. При объемной пропитке кварцевой керамики МФСС-8 и последующей ее полимеризации обеспечение нулевого влагопоглощения происходит не только за счет образования внешней пленки кремнийорганической смолы, но и за счет закрытия поровых каналов внутри самой керамики. Это подтверждается экспериментом, при котором объемно-пропитанные

образцы кварцевой керамики подвергались постепенной сошлифовке по толщине; при этом контролировали водопоглощение образцов. Каких-либо изменений этого параметра зафиксировано не было. В связи с этим была поставлена задача — всесторонне исследовать объемно-пропитанную кварцевую керамику и разработать техническую документацию на сам материал и технологию при работе с изделиями. Следует отметить, что повышение механической прочности изделий после пропитки продуктом МФСС-8 обусловлено тем, что в результате пропитки происходят залечивание поверхностных дефектов в виде микротрещин и царапин, увеличение эффективной площади или объема механически нагруженной зоны образца (изделия) за счет введенного в поры полимера, а также перераспределения напряжений в материале при усадке полимера. Экспериментально установлено, что полностью пропитанная полимером кварцевая керамика имеет водопоглощение менее 0,1 %, предел прочности при статическом изгибе не менее 50 МПа. Более подробная информация об основных свойствах полученного материала представлена в таблице.

В ходе многочисленных экспериментов было установлено, что объемно-пропитанная кварцевая керамика способна эксплуатироваться длительное время до 450 °С, кратковременно — при температурах выше 1050 °С без деградации свойств. Ниже представлены предельные возможности объемно-пропитанной кварцевой керамики при воздействии высоких температур в условиях стационарного нагрева, при которых ее предел прочности при статиче-

ском изгибе и диэлектрические характеристики не изменяются:

| Температура, °С | Время, ч, не менее |
|-----------------|--------------------|
| 300 .....       | 216                |
| 350 .....       | 15                 |
| 450 .....       | 15                 |
| 550 .....       | 7                  |
| 650 .....       | 4                  |
| 750 .....       | 4                  |
| 850 .....       | 4                  |
| 950 .....       | 4                  |
| 1000 .....      | 1                  |
| 1050 .....      | 0,016              |
| 1100 .....      | 0,016              |

Образцы испытывали также в условиях лучистого нагрева; при этом были достигнуты два температурных пика при 1500 °С. После испытаний разрушений образцов не обнаружено.

При разработке новых изделий радиотехнического назначения большое внимание уделяют их эрозионной устойчивости к дождевому и пылевому воздействию. Установлено, что объемно-пропитанная кварцевая керамика обладает повышенной устойчивостью к пылевой и дождевой эрозии. Для сравнения: обычная кварцевая керамика обладает низкой эрозионной стойкостью при дождевом воздействии даже при сравнительно невысоких скоростях полета летательных аппаратов.

Материал был опробован в конструкции двух изделий. Результаты апробации оказались положительные. Более того, изделия пропитывали на стадии заготовки с припуском наружной и внутренней поверхности 1 мм. После

#### Основные свойства объемно-пропитанной кварцевой керамики

| Показатели                                                                                                             | Кварцевая керамика         |                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                                                                                                                        | исходная                   | объемно-пропитанная        |
| Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup> (г/см <sup>3</sup> )                                                            | 1940—2050 (1,94—2,05)      | 1990—2070 (1,99—2,07)      |
| Открытая пористость, %                                                                                                 | 7—12                       | 0,2, не более              |
| Водопоглощение, %, не более                                                                                            | —                          | 0,1                        |
| Предел прочности при статическом изгибе при 20 °С (среднее значение), МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее             | 34 (3,5)                   | 50 (5,1)                   |
| Предел прочности при статическом изгибе (среднее значение), МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее, при температуре, °С: |                            |                            |
| —60                                                                                                                    | —                          | 66 (6,7)                   |
| 400                                                                                                                    | —                          | 58 (5,9)                   |
| 800                                                                                                                    | —                          | 74 (7,6)                   |
| 1100                                                                                                                   | 88 (9,0)                   | 82 (8,4)                   |
| Модуль упругости при 20 °С, МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее                                                       | 2,6·10 <sup>4</sup> (2700) | 3,6·10 <sup>4</sup> (3700) |
| Ударная вязкость (среднее значение), кДж/м <sup>2</sup> (кгс·см/см <sup>2</sup> ), не менее                            | 0,78 (0,80)                | 1,8 (1,8)                  |

пропитки и полимеризации заготовку подвергали механической обработке. После снятия припуска изделия доводились по РТХ. На уже готовых изделиях проверяли водопоглощение путем выдержки в дистиллированной воде в течение 1 сут. Водопоглощение изделий оказалось нулевым.

После успешной апробации объемно-пропитанной кварцевой керамики были начаты исследования основных свойств материала с добавкой 1 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и объемной пропиткой раствором МФСС-8. Данный вид керамики отличается повышенным коэффициентом черноты (0,4—0,5 при длине волны  $\lambda = 0,65$  мкм), что немаловажно при работе изделий в условиях аэродинамического нагрева [1]. Благодаря объемному модифицированию удалось получить беспористый материал, что, в свою очередь, привело к более чем 20 %-ному увеличению коэффициента черноты. Кроме того, пропитка материала кремнийорганической смолой должна привести к тому, что при воздействии тепловых потоков на материал происходит выпаривание — выгорание смолы и отведение от изделия вместе с парогазовым облаком излишнего тепла. Это предположение планируется проверить в дальнейших работах.

Таким образом, были проведены всесторонние исследования объемно-пропитанной кварцевой керамики и подготовлены паспорт и тех-

нические условия на этот материал. Материал был успешно апробирован в конструкциях двух изделий и внедрен в технологию их изготовления. При этом изделия пропитываются на стадии заготовки и потом подвергаются механической обработке до необходимых размеров. С применением различных видов испытаний показана высокая термостойкость и стабильность основных свойств материала в широком диапазоне температур. Работы в данном направлении продолжаются.

\* \* \*

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и правительства Калужской области, грант № 12-08-97502.*

### Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. 2. Материалы, их свойства и области применения: справочное издание / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М.: Теплоэнергетик, 2008. — 464 с.
2. **Пат. 2256262 Российская Федерация.** Антенный обтекатель ракеты / Бородай Ф. Я., Русин М. Ю., Пашутина Т. А.; опубл. 10.07.05, Бюл. № 19. ■

Получено 23.04.13

© Е. И. Суздальцев, Е. В. Горелова,  
2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

## 56th INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON REFRACTORIES 2013



## 56-й международный коллоквиум по огнеупорам 2013 ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

25–26 сентября 2013 г.

Аахен, Германия

### ТЕМЫ:

- |                         |                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------|
| ★ Стекло                | ★ Формованные и неформованные огнеупоры |
| ★ Цемент, известь, гипс | ★ Управление качеством                  |
| ★ Керамика              | ★ Служба огнеупоров в футеровке         |
| ★ Обжиг                 | ★ Износ и коррозия                      |
| ★ Химические процессы   | ★ Рециклинг                             |
| ★ Огнеупорное сырье     | ★ Охрана окружающей среды               |

[www.feuerfest-kolloquium.de/kolloquium-2013](http://www.feuerfest-kolloquium.de/kolloquium-2013)

## Инновационные технологии получения керамики

Д. Т. Н. А. Д. Шляпин<sup>1</sup>, К. Т. Н. А. Ю. Омаров<sup>1</sup>, К. Т. Н. В. П. Тарасовский<sup>1, 2</sup>,  
Ю. Г. Трифонов<sup>1</sup>, А. И. Айрих<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> ЗАО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка Московской обл., Россия

УДК 666.32.11-492.2.004.12

# ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ХИМИЧЕСКОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АК12

В процессе химического диспергирования алюминиевого сплава марки АК12 образуется осадок гидроксида алюминия, содержащий большое количество ионов Na. Эти ионы влияют на структуру и фазовый состав образцов из керамики, так как в результате спекания образуется вторая фаза — нефелин, которая равномерно распределяется по границам зерен  $Al_2O_3$ . Изучено влияние степени отмывки исходного порошка  $Al_2O_3$  на физико-механические свойства керамики из этих порошков — предел прочности при изгибе, ударную вязкость, плотность, пористость и трещиностойкость.

**Ключевые слова:** химическое диспергирование, алюминиевый сплав марки АК12, порошок оксида алюминия, керамический материал.

## ВВЕДЕНИЕ

Основная тенденция современного развития мирового промышленного производства — переход к энергосберегающим технологиям, которые обеспечивают высокую степень использования отходов производства и, как следствие, высокую экологическую чистоту этого производства. Получение высококачественного порошка оксида алюминия с помощью химического диспергирования алюминиевых сплавов является актуальной задачей, поскольку в производственном процессе остается большое количество отходов от обработки алюминиевых сплавов, утилизация которых традиционными способами связана с

большими затратами энергии. Ранее [1] был предложен механизм переработки отходов механической обработки алюминиевых сплавов в порошки оксида алюминия с широким спектром свойств, которые могут найти применение при производстве керамики и огнеупоров. Ниже приведены результаты исследований влияния степени очистки порошка гидроксида алюминия от NaOH на физико-механические свойства корундовой керамики, полученной из этих порошков. Степень очистки порошка гидроксида алюминия от NaOH оценивали по pH промывных вод.

## МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПЫТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Технологический процесс изготовления образцов для исследования из осадков — продуктов химического диспергирования алюминиевого сплава можно представить в виде схемы, приведенной на табл. 1. В схеме используются традиционные и общепринятые как в керамической технологии, так и в порошковой металлургии процессы и оборудование. Исключение составляет только первая технологическая операция, для которой потребовалось разработать конструкцию и изготовить реактор [2] из щелочестойкого материала для химического диспергирования алюминиевых сплавов. Полученный осадок (в виде суспензии) — продукт реакции

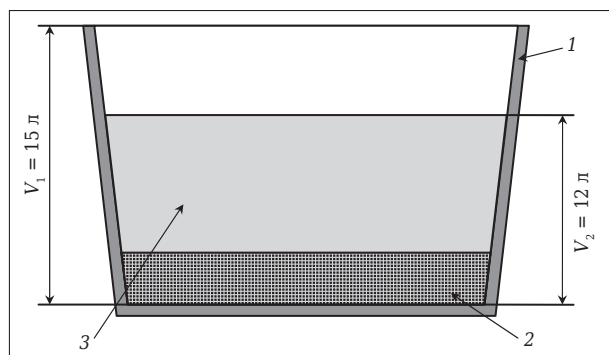


Иллюстрация к процессу отмывки осадка методом декантации: 1 — емкость из щелочестойкого пластика; 2 — отмываемый осадок (суспензия) после отстаивания; 3 — сливаемый слой жидкости над осадком

Таблица 1. Технологическая схема получения образцов керамики из продуктов порошков химического диспергирования сплава Al—Si (12 мас. %)

| Номер | Технологическая операция                                            | Оборудование и параметры технологического процесса                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Химическое диспергирование исходного алюминиевого сплава            | Реактор с системой теплоотвода из реакционного объема, 20 %-ный раствор NaOH |
| 2     | Отмывка осадка путем декантации                                     | Емкость из щелочестойкого пластика, водопроводная вода                       |
| 3     | Выделение осадка путем вакуумной фильтрации                         | Форвакуумный насос, воронка Бюхнера, колба Бунзена                           |
| 4     | Сушка осадка на воздухе                                             | Сушильный шкаф СНОЛ-3.5, 60—200 °С, конечная влажность осадка 0              |
| 5     | Термообработка полученного порошкового продукта на воздухе          | Печь СВК-5163 с хромитлантановыми нагревателями, 1350 °С, 1 ч                |
| 6     | Приготовление шихты путем смешивания порошка с органической связкой | 10 %-ный раствор ПВС, 3-10 % на сухой остаток вещества                       |
| 7     | Прессование                                                         | Гидравлический пресс П-50, давление 200 МПа                                  |
| 8     | Выжигание органической связки на воздухе                            | Сушильный шкаф СНОЛ-3.5, 350 °С, 1—5 ч                                       |
| 9     | Спекание на воздухе                                                 | Печь СВК-5163 с хромитлантановыми нагревателями, 1500 °С, 1 ч                |

находится в щелочной среде, поэтому необходима его отмывка от щелочи дистиллированной водой путем декантации (технологическая операция № 2). В емкость из щелочестойкого пластика (см. рисунок) переносят образовавшийся осадок. Затем в емкость наливают дистиллированную воду из расчета 12—15 л воды на 300—500 г высушенного осадка; далее производят перемешивание и отстаивание осадка в течение 40—60 мин. Образовавшийся слой жидкости над осадком после его промывки аккуратно сливают, оставляя осадок в емкости. Декантацию проводят многократно до заданного значения рН среды (промывной жидкости). В результате последовательных декантаций происходит уменьшение концентрации ионов  $\text{Na}^+$  вследствие их удаления из суспензии.

После завершения отмывки осадка его отделяют от жидкости путем вакуумной фильтрации (технологическая операция № 3). Сушкой отмытого осадка на воздухе (технологическая операция № 4) получают порошок, который прокаливают на воздухе (технологическая операция № 5) с целью синтеза оксидной фазы. Для приготовления шихты (технологическая операция № 6) в порошок вводят временную органическую связку, в качестве которой выбран поливиниловый спирт (ПВС). Использовали 10 %-ный водный раствор ПВС. Образцы формовали (технологическая операция № 7) на гидравлическом прессе методом двухстороннего прессования в стальной пресс-форме, давление прессования 200 МПа. Удаление органической связки (технологическая операция № 8) проводили на воздухе при температуре 350 °С и изотермической выдержке 1 ч. Образцы спекали (технологическая операция № 9) на воздухе при 1500 °С в течение

1 ч (скорость нагрева печи 300 °С/ч). Температурно-временные параметры процесса спекания позволяют обеспечивать достаточную прочность получаемой высокопористой керамики.

Значения рН среды жидкости для  $n$ -кратной промывки осадка — продукта химического диспергирования сплава Al—Si (12 мас. %) приведены ниже:

|           |                 |      |      |      |      |      |                 |      |                  |      |
|-----------|-----------------|------|------|------|------|------|-----------------|------|------------------|------|
| $n \dots$ | 0 <sup>*1</sup> | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6 <sup>*2</sup> | 7    | 8                | 9    |
| рН...     | 12,9            | 12,7 | 12,6 | 12,4 | 12,1 | 11,9 | 11,8            | 11,1 | 10,8             | 10,7 |
| $n \dots$ | 10              | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16              | 17   | 18 <sup>*3</sup> |      |
| рН...     | 10,5            | 10,4 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3            | 10,3 | 10,3             |      |

<sup>\*1</sup> Значение рН при  $n = 0$  относится к исходному осадку до его отмывки — материал типа 1.

<sup>\*2</sup> После 6-кратной декантации при рН = 11,8, принятом как среднее значение, производили отбор части осадка для изготовления образцов (при  $n = 6$  наблюдалась коагуляция осадка) — материал типа 2.

<sup>\*3</sup> рН = 10,3 соответствует максимальной степени отмывки осадка — материал типа 3.

Особенностью процесса отмывки осадка является неизменность рН среды после 12-й декантации, что связано с невозможностью удаления ионного слоя, состоящего из гидроксильных групп  $\text{OH}-$ , с поверхности частиц осадка, обладающих повышенной адсорбционной способностью. Количество гидроксильных групп в ионном слое связано со степенью дисперсности частиц осадка: чем выше дисперсность частиц, тем больше концентрация гидроксильных групп. По-видимому, удаление ионного слоя возможно только химическим методом (например, путем кислотной отмывки). Из порошков изготавливали образцы и исследовали их свойства.

Таблица 2. Свойства керамических образцов, полученных химическим диспергированием сплава Al—Si (12 мас. %)

| Тип материала образцов* | Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> | Открытая пористость, % | Закрытая пористость, % | Общая пористость, % | Относительная усадка, % |          |
|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|----------|
|                         |                                        |                        |                        |                     | линейная                | объемная |
| 1                       | 1,67                                   | 22,9                   | 35,1                   | 58,0                | 2,2                     | 6,2      |
| 2                       | 2,76                                   | 1,8                    | 29,2                   | 31,0                | 18,6                    | 45,0     |
| 3                       | 2,92                                   | 0,7                    | 26,3                   | 27,0                | 16,4                    | 40,0     |

\* Материал типа 1 получен из исходного осадка при максимальном pH = 12,9, материал типа 2 — из осадка при среднем значении pH = 11,8, материал типа 3 — из осадка при минимальном pH = 10,3.

Таблица 3. Механические свойства керамических образцов, изготовленных из порошка химического диспергирования сплава Al—Si (12 мас. %)

| Тип материала образцов (см. табл. 2) | Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа | Трещиностойкость $K_{1c}$ , МПа·м <sup>1/2</sup> | Ударный изгиб $a_n$ , 10 <sup>3</sup> Дж/м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1                                    | 5                                                | 0,2                                              | 1,0                                                     |
| 2                                    | 95                                               | 2,0                                              | 1,6                                                     |
| 3                                    | 125                                              | 3,0                                              | 2,5                                                     |

### ПЛОТНОСТЬ, ПОРИСТОСТЬ И УСАДКА КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Минимальные значения плотности и усадки при максимальной пористости (открытой, закрытой, общей) [3] характерны для материала, полученного из материала типа 1 (табл. 2). По-видимому, это связано с синтезом алюминатов натрия (вследствие избытка Na<sup>+</sup> в исходном осадке), образование которых происходит с увеличением объема. В результате этого процесса, вероятно, разрыхляется структура спекаемых образцов. У материала типов 2 и 3 (из отмытых осадков) наблюдается значительное повышение плотности и усадки по сравнению с материалом типа 1. Для него характерна значительная доля закрытой пористости, образование которой связано с зональным уплотнением высокодисперсной порошковой системы при жидкофазном механизме спекания (в качестве жидкой фазы выступает расплав нефелина) [2].

Следует отметить, что увеличение степени отмытки осадка (материал типа 3 в сравнении с материалом типа 2) приводит к повышению плотности при некотором снижении пористости (открытой, закрытой и общей) и относительной усадки. Можно предположить, что в этом случае происходят уменьшение толщины прослойки нефелина между зернами  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и образование межзеренных контактов. При этом реализуется наиболее плотная укладка зерен  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и наблюдается снижение пути зернограницного проскальзывания при появлении жидкой фазы в спекаемом материале.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ (ПРОЧНОСТЬ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ, УДАРНЫЙ ИЗГИБ)

Механические свойства керамических образцов, полученных химическим диспергированием сплавов алюминия, изучали на образцах размерами 8×8×50 мм по общепринятым методикам [4]. Испытания проводили на машине «Tiratest 2300» и на маятниковом копре. За показатель свойства принимали среднеарифметическое значение результатов испытаний шести образцов. Для изучения трещиностойкости по параметру  $K_{1c}$  в образце создавали надрез при помощи алмазного круга толщиной 100 мкм (радиус кривизны вершины надреза 50 мкм) на половину высоты образца. Предел прочности при изгибе и трещиностойкость определяли путем приложения к середине образца сосредоточенной нагрузки (3-точечный изгиб) при скорости перемещения траверсы нагружающего устройства 1 мм/мин. Прочность при ударном изгибе характеризовалась работой, совершаемой ножом маятникового копра, для разрушения призматического образца.

Из табл. 3 видно, что образцы из материала типа 1 имеют крайне низкие показатели механических свойств, что связано, вероятно, как обсуждалось ранее, с разрыхлением его структуры вследствие синтеза значительного количества алюминатов натрия. Следует отметить, что образцы из материала типа 1 легко разрушались руками. Для образцов из материала типов 2 и 3 характерен достаточно высокий уровень  $\sigma_{изг}$  (95 и 125 МПа) с учетом их значи-

тельной общей пористости — 27—31 % (для сравнения:  $\sigma_{изг}$  высокоплотной алюмооксидной керамики промышленного производства составляет 200—300 МПа [5]). В то же время у таких образцов отмечается большое значение параметра трещиностойкости  $K_{1c}$  (2,0 и 3,0 МПа·м<sup>1/2</sup>), сопоставимого с трещиностойкостью высокоплотной мелкокристаллической алюмооксидной керамики [6], спеченной из порошков промышленного производства. Достаточно высокие значения  $\sigma_{изг}$  и  $K_{1c}$  образцов из материала типов 2 и 3 можно объяснить частичной релаксацией напряжений на нефелиновых прослойках между зернами  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в процессе нагружения.

Следует также отметить, что увеличение степени отмывки исходного осадка приводит к повышению показателей механических свойств. Это, вероятно, происходит за счет некоторого уменьшения количества нефелиновой фазы, которая располагается в областях тройных стыков зерен  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , образуя дискретные прослойки между ними. При этом между зернами  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  формируются контакты, через которые реализуется прочное диффузионное сращивание в процессе спекания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью процесса отмывки образцов порошков, полученных химическим диспергированием сплавов Al—Si (12 мас.%) путем декантации, является постепенное снижение рН среды с увеличением кратности циклов отмывки с 12,9 до 10,3. В результате проведенных исследований показано, что увеличение степени отмывки осадка (при снижении рН среды от 12,9 до 10,3) приводит к повышению

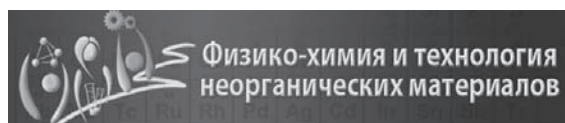
плотности (от 1,67 до 2,92 г/см<sup>3</sup>) и улучшению механических показателей спеченных образцов керамики ( $\sigma_{изг}$  от 5 до 125 МПа,  $K_{1c}$  от 0,2 до 3,0 МПа·м<sup>1/2</sup>,  $a_n$  от  $1 \cdot 10^3$  до  $2,5 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>). Это связано с более плотной укладкой зерен  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  вследствие образования дискретных прослоек нефелина между ними и их диффузионного сращивания по межзерненным контактам при спекании.

## Библиографический список

1. **Омаров, А. Ю.** Технологическая схема спекания нанодисперсных порошков, полученных методом химического диспергирования / А. Ю. Омаров, Ф. З. Бадаев, Ю. Г. Трифонов // Новые огнеупоры. — 2012. — № 10. — С. 32—35.
2. **Омаров, А. Ю.** Способы получения водорода как топлива для автомобилей / А. Ю. Омаров, В. В. Козляков, Н. П. Стукалова // Изв. МГИУ. Естественные и технические науки. — 2009. — № 4. — С. 35—42.
3. **Лукин, Е. С.** Технический анализ и контроль производства керамики / Е. С. Лукин, Н. Т. Андриянов. — М.: Стройиздат, 1986. — 272 с.
4. Практикум по технологии керамики и огнеупоров; под ред. Д. Н. Полубояринова. — М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1972. — 351 с.
5. **Дудин, В. В.** К определению ударной вязкости хрупких материалов / В. В. Дудин, А. Л. Городнев, Б. С. Скидан [и др.] // Заводская лаборатория. — 1974. — № 7. — С. 876—879.
6. Химическая технология керамики: учебное пособие для вузов; под ред. И. Я. Гузмана. — М.: РИФ «Стройматериалы», 2003. — 496 с. ■

Получено 04.02.13

© А. Д. Шляпин, А. Ю. Омаров, В. П. Тарасовский, Ю. Г. Трифонов, А. И. Айрих, 2013 г.



Физико-химия и технология неорганических материалов

## X Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов

приглашает принять участие в конференции молодых научных сотрудников и аспирантов академических институтов, государственных научных центров, предприятий, занимающихся проблемами металлургии и материаловедения, а также студентов старших курсов и молодых научных сотрудников высших учебных заведений.

Сайт конференции: <http://www.m.imetran.ru>

Адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, 49, комната № 306 основного корпуса ИМЕТ РАН  
Тел.: (499) 135-94-84. E-mail: [info@imetran.ru](mailto:info@imetran.ru)

Ло Сюйдун<sup>1, 2</sup>, Цюй Дианьли<sup>1</sup>, Се Чжипэн<sup>2</sup>, Чжао Веньянь<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Факультет высокотемпературных материалов и магневых ресурсов Ляонинского университета науки и технологии, г. Аньшань, Китай

<sup>2</sup> Главная лаборатория новой керамики и тонкой обработки Университета Цинхуа, г. Пекин, Китай

<sup>3</sup> Факультет материаловедения и инжиниринга Цзиндэчжэньского керамического института, г. Цзиндэчжэнь, Китай

УДК 546.655.3/4-31:666.763.58(510)

## ВЛИЯНИЕ $\text{CeO}_2$ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ФОРСТЕРИТА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ НИЗКОСОРТНОГО МАГНЕЗИТА

Обсуждено влияние диоксида церия  $\text{CeO}_2$  на кристаллическую структуру форстерита, синтезированного из низкосортного магнезита и природного кремнезема. Для изучения кристаллической структуры и микроструктуры образцов были использованы рентгеновская дифракция (XRD) и сканирующая электронная микроскопия (SEM). Программное обеспечение X'Pert plus было применено для определения параметров кристаллической решетки образцов. В соответствии со стандартами, используемыми Кабинетом министров (правительством), были определены кажущаяся плотность, открытая пористость, водопоглощение и предел прочности при сжатии на холоду образцов. Результаты показали, что форстерит можно синтезировать из низкосортного магнезита и природного кремнезема посредством реакции в твердой фазе. Соответствующая добавка  $\text{CeO}_2$  полезна для образования форстерита. Дефект, вызываемый  $\text{CeO}_2$  в активном периклазе, ускоряет диффузию ионов. Установлено, что оптимальная добавка  $\text{CeO}_2$  составляет 0,8–1,2 %, форстерит демонстрирует однородную микроструктуру, кажущаяся плотность составляет 2,15–1,18 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость 29,5–30,1 %, водопоглощение 13,5–14,0 %, предел прочности при сжатии на холоду 13,4–14,2 МПа.

**Ключевые слова:** низкосортный магнезит, природный кремнезем, форстерит, добавка  $\text{CeO}_2$ .

**Ф**орстерит — кристаллический силикат магния с химической формулой  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  в системе  $\text{MgO—SiO}_2$ , принадлежащий к группе оливинов [1]. Экстремально низкая электропроводность форстерита делает его идеальным материалом для лазера с перестройкой частоты (tunable laser). Материал обладает также хорошей огнеупорностью вследствие высокой температуры плавления, низким термическим расширением, хорошей химической стабильностью и отличными изоляционными свойствами даже при высокой температуре [2]. Форстерит, применяемый также для биоактивной керамики, показывает значительное улучшение вязкости разрушения (fracture toughness), величина которой превосходит нижний предел, характерный для костного имплантата [3, 4]. Различные исследователи изучали синтез и характеристики форстерита. Нанокристаллический форстеритовый порошок был синтезирован по цитрат-нитратной (citrate-nitrate) технологии с использованием водного раствора нитрата магния, коллоидного кремнезема, лимонной кислоты и аммиака [5]. Форстеритовые нанопорошки были синтезированы также по золь-гель технологии с использованием в качестве исходных магнезиальных

и кремнистых материалов гексагидрата нитрата магния и тетраэтил ортосиликата (tetra ethyl ortho-silicate) [5]. Кроме того, форстерит синтезируют через твердофазную реакцию, которая более предпочтительна [6]. Чтобы облегчить диффузию реагентов для образования форстерита в твердофазной реакции, требуются высокая температура и длительное время реакции. Вследствие этого для снижения температуры спекания и улучшения свойств синтетического продукта часто применяется метод введения добавки минерализаторов, таких как редкоземельные элементы [7–10]. Цель настоящей работы — синтез форстерита из низкосортного магнезита и природного кремнезема. Было исследовано влияние добавки  $\text{CeO}_2$  на кристаллическую структуру полученного форстерита. В сравнении с обычными технологиями синтеза форстерита это исследование инновационное с точки зрения сырья материала, процесса и технологии.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве сырьевых материалов были использованы порошки низкосортного магнезита [Хайчэн (Haicheng), северо-восток Китая]

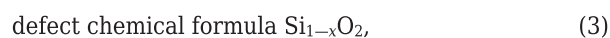
и природного кремнезема [Ляоян (Liaoyang), северо-восток Китая]. Низкосортный магнезит разлагается при 650 °С в течение 1,5 ч с получением активного периклаза [12]. Диоксид церия CeO<sub>2</sub>, используемый в работе, был аналитическим реагентом. Форстерит содержал 57,0 мас. % активного периклаза и 43,0 мас. % природного кремнезема (SiO<sub>2</sub> > 98,0 мас. %) согласно соотношению 2MgO:2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SiO<sub>2</sub> (образец 1). Сырьевые материалы взвешивали согласно определенным пропорциям, в которых содержание CeO<sub>2</sub> составляет 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 и 2,0 мас. % (образцы 2–6 соответственно). Смеси подвергали гомогенизации с использованием вибромельницы и прессованию под давлением 100 МПа в пресс-формах из нержавеющей стали. Прессованные образцы нагревали при 1500 °С. Выдержка составляла 2 ч, скорость нагрева 5 °С/мин. После нагрева печь охлаждалась сама по себе (cool by itself).

Метод Архимеда был применен для измерения кажущейся плотности, открытой пористости и водопоглощения спеченных образцов. Предел прочности при сжатии на холоду измеряли на универсальной установке для испытаний (СНТ-4605). Рентгеноструктурный анализ образцов проводили с помощью рентгеновского дифрактометра (X' Pert-MPD) с Cu Kα-излучением (40 кВ, 100 мА, 0,154184 нм). Внешний вид кристалла и микроструктуру образцов наблюдали с применением микроскопа SEM JSM6480 LV японского производства.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Механизм влияния CeO<sub>2</sub> на синтез форстерита

Твердофазная реакция образования форстерита протекает на поверхности раздела, и реакционная диффузия рассматривается как процедура контроля [13]. Таким образом, скорость реакционной диффузии к поверхности раздела определяет скорость твердофазной реакции и количество образовавшегося форстерита [14, 15]. В процессе образования форстерита дефектные уравнения реагентов MgO и SiO<sub>2</sub> можно представить следующим образом:



$$\Delta r_2 = \frac{r_{\text{Ce}^{4+}} - r_{\text{Si}^{4+}}}{r_{\text{Se}^{2+}}} \cdot 100 \% = 117,5 \%, \Delta r \gg 30 \%, \quad (4)$$

$$\Delta r_1 = \frac{r_{\text{Ce}^{4+}} - r_{\text{Mg}^{2+}}}{r_{\text{Mg}^{4+}}} \cdot 100 \% = 20,8 \%,$$

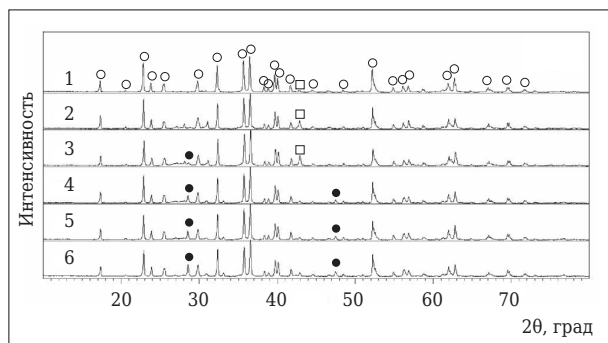
$$15 \% < \Delta r_2 < 30 \%, \quad (5)$$

где defect chemical formula — дефектная химическая формула.

Дефекты, вызванные присутствием CeO<sub>2</sub> в реагентах активного периклаза и природного кремнезема, проявляются как дефектные химические формулы (1)–(3). В уравнениях (1) и (2) в результате того, что Ce<sup>4+</sup> занимает позицию Mg<sup>2+</sup> в структуре активного периклаза и образует вакансии Mg<sup>2+</sup> и промежуток O<sup>2-</sup>, образуются дефектные химические формулы Mg<sub>1-2x</sub>Ce<sub>x</sub>V<sub>Mgx</sub>O и Mg<sub>1-x</sub>Ce<sub>x</sub>O<sub>1+x</sub>. И, как показано в уравнении (3), Ce<sup>4+</sup> занимает позицию Si<sup>4+</sup> в структуре кремнезема и образуется дефектная химическая формула Si<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>. Величины Δr<sub>1</sub> и Δr<sub>2</sub> соотношения радиусов ионов растворенного вещества и растворителя рассчитываются в соответствии с приведенными формулами (4) и (5). Радиус ионов Mg<sup>2+</sup>, Si<sup>4+</sup> и Ce<sup>4+</sup> составляет 0,072, 0,040 и 0,087 нм соответственно. Формула (3) предполагает маловероятную растворимость CeO<sub>2</sub> в кремнеземе при Δr<sub>1</sub> > 30 % в соответствии с классической теорией точечных дефектов и твердофазных реакций, а также различную структуру CeO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>. Если величина Δr<sub>2</sub> составляет 20,8 % (15 % < Δr<sub>2</sub> < 30 %), растворимость CeO<sub>2</sub> в активном периклазе, в котором Mg<sup>2+</sup> замещен на Ce<sup>4+</sup>, обоснована. В результате этого дефекты вакансии и промежуточный анион, вызванные присутствием CeO<sub>2</sub> в структуре форстерита, ускоряют диффузию ионов и способствуют образованию форстерита в ранний период реакции. Повышенное содержание CeO<sub>2</sub> увеличивает концентрацию вакансий катионов и промежуточных анионов на поверхности раздела и внутри активного периклаза. Эти дефекты изменяют упорядоченное расположение реагентов и теоретически облегчают твердофазную реакцию с образованием форстерита.

### Влияние CeO<sub>2</sub> на кристаллический состав форстерита

Рентгеновский спектр опытных образцов с различными добавками CeO<sub>2</sub> показан на рис. 1. В образцах 1–3 образовались две кристаллические фазы — форстерит и периклаз; форстерит — главная кристаллическая фаза. Наблюдается повышенная интенсивность дифракционного пика периклаза, что связано, по-видимому, с эффектом замещения CeO<sub>2</sub>. Церийсодержащие кристаллические фазы на



**Рис. 1.** Рентгеновский спектр образцов с различной добавкой  $\text{CeO}_2$ : образец 1 без  $\text{CeO}_2$ ; образцы 2–6 с добавкой 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 и 2,0 %  $\text{CeO}_2$ : ○ — форстерит; □ — периклаз; ● —  $\text{CeO}_2$ .  $\times 2000$

рентгенограмме образцов 1 и 2 не были полностью идентифицированы. Незначительное количество  $\text{CeO}_2$  было определено в образце с  $\text{CeO}_2 = 0,8\%$ . Форстерит и диоксид церия наблюдаются как главные фазы в образцах 4–6 с  $\text{CeO}_2 > 1,2\%$  (рис. 2). Это может быть объяснено значительной разницей между кристаллическими структурами форстерита и  $\text{CeO}_2$ . Хотя в форстерите может происходить частичное замещение  $\text{Mg}^{2+}$  на  $\text{Ce}^{4+}$ , известный форстерит  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  имеет ромбическую структуру, принадлежащую к группе симметрии кристаллической решетки (space group)  $Pmnb$ , а  $\text{CeO}_2$  — кубическую, принадлежащую к группе симметрии кристаллической решетки  $Fm3m$  [16]. Форстерит состоит из  $\text{Mg}$ –О-октаэдра и  $\text{Si}$ –О-тетраэдра, связанных совместными вершиной и гранью; у  $\text{CeO}_2$   $\text{Ce}$ –О-кубы связаны совместной гранью, что ограничивает образование твердого раствора с форстеритом.

### Влияние $\text{CeO}_2$ на параметры кристаллической ячейки форстерита

Процесс синтеза форстерита с использованием низкосортного магнезита и природного кремнезема представляет собой мультифазовую реакцию. Образование вакансий  $\text{Mg}^{2+}$ , вызванных тем, что  $\text{Ce}^{4+}$  занимают частично позиции  $\text{Mg}^{2+}$  в форстерите, теоретически приводит к

уменьшению размеров кристаллической решетки. Для детального анализа размеров кристаллической решетки форстерита рассчитывали параметры кристаллической решетки форстерита с помощью программного обеспечения X'Pert plus. Кристалл форстерита — это ромбическая система, и соотношение между площадью (space)  $d_{hkl}$  кристаллографической плоскости, параметрами кристаллической ячейки и символами кристаллографической плоскости (crystal face symbols) ( $hkl$ ) выражается уравнением

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2.$$

Параметры кристаллической решетки форстерита показаны в табл. 1. Параметры кристаллической решетки и объем элементарной ячейки кристаллической решетки (unit cell) в образце 1 без  $\text{CeO}_2$  отличаются от аналогичных параметров единичного кристалла форстерита. Различие между единичным кристаллом и кристаллической структурой форстерита может быть вызвано температурой реакции, ее продолжительностью, дефектами кристаллической решетки и взаимодействием между мультикристаллами в процессе образования кристаллической фазы [13, 14]. Можно заключить, что форстерит сохраняет ромбическую структуру в сочетании с тенденцией уменьшения параметров кристаллической решетки и размеров кристалла вплоть до теоретических значений в образцах 1–6. При содержании  $\text{CeO}_2$  от 0 до 2,0 % ось  $a$  колеблется в очень узком диапазоне (от  $4,7518 \cdot 10^2$  до  $4,7577 \cdot 10^2$  пм), а оси  $b$  и  $c$  слегка укорачиваются с ростом содержания  $\text{CeO}_2$ ; объем кристаллической решетки уменьшается с  $292,09 \cdot 10^6$  до  $289,59 \cdot 10^6$  пм<sup>3</sup>, достигая величины  $289,95 \cdot 10^6$  пм<sup>3</sup>.

### Влияние $\text{CeO}_2$ на микроструктуру форстерита

На рис. 2 показана микроструктура образцов 1–6, обожженных при 1500 °С. Образцы 2 и

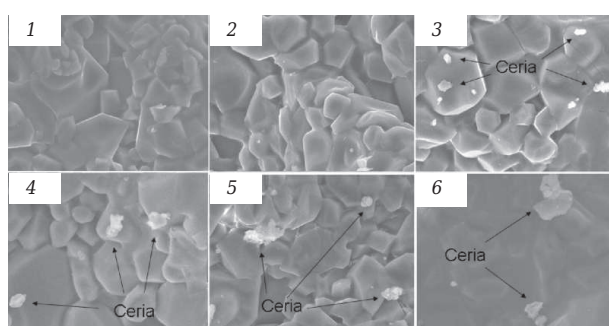
**Таблица 1. Параметры кристаллической ячейки форстерита в опытных образцах**

| Монокристалл | $a, 10^2$ пм* | $b, 10^2$ пм | $c, 10^2$ пм | $\alpha = \beta = \gamma, ^\circ$ | Объем решетки, $10^6$ пм <sup>3</sup> |
|--------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Образец      | 4,7549        | 10,199       | 5,9792       | 90                                | 289,95                                |
| 1            | 4,7518        | 10,243       | 6,0014       | 90                                | 292,09                                |
| 2            | 4,7577        | 10,216       | 5,9894       | 90                                | 291,10                                |
| 4            | 4,7544        | 10,213       | 5,9873       | 90                                | 290,73                                |
| 5            | 4,7525        | 10,215       | 5,9885       | 90                                | 290,71                                |
| 6            | 4,7548        | 10,206       | 5,9834       | 90                                | 290,37                                |
| 3            | 4,7520        | 10,194       | 5,9780       | 90                                | 289,59                                |

\* 1 нм (нанометр) = 1000 пм (пикометр) (Примечание пер.).

Таблица 2. Свойства опытных образцов с различными добавками  $\text{CeO}_2$ 

| Образец | Кажущаяся плотность, $\text{г/см}^3$ | Открытая пористость, % | Водопоглощение, % | Предел прочности при сжатии на холоду, МПа |
|---------|--------------------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| 1       | 2,05                                 | 32,4                   | 15,8              | 12,4                                       |
| 2       | 2,08                                 | 32,0                   | 15,4              | 12,8                                       |
| 3       | 2,15                                 | 30,1                   | 14,0              | 13,4                                       |
| 4       | 2,18                                 | 29,5                   | 13,5              | 14,2                                       |
| 5       | 2,24                                 | 28,1                   | 12,5              | 16,6                                       |
| 6       | 2,28                                 | 27,8                   | 12,2              | 17,8                                       |


 Рис. 2. Микроструктура излома образцов с различной добавкой  $\text{CeO}_2$ : Cerita — диоксид церия. SEM

3 показывают относительно более плотную и более однородную (по размерам зерен) микроструктуру по сравнению с образцом 1. Эта однородная микроструктура, а также низкая открытая пористость приводят к повышению предела прочности при сжатии образцов на холоду [14]. Сравнение образцов 1—3 показало, что очевидно ромбическая структура форстерита в образце 3 и зерновой состав форстерита более однородный, чем у образцов 1 и 2. В образце 3 форстерит накапливается компактно с четкой границей с тонкозернистой ромбической структурой форстерита. По данным рентгеноструктурного анализа,  $\text{CeO}_2$  располагается на поверхности форстерита и по границам форстеритовых зерен в образцах 3—6; это выявляет присутствие зерен  $\text{CeO}_2$ . Диоксид церия и примеси, которые образуют жидкую фазу при высокой температуре, собираются по границам форстеритовых зерен. Внешний вид зерен форстерита и стеклофазы при комнатной температуре нечеткий; наблюдается необычный рост отдельных кристаллов в образце 6 (см. рис. 2). Связующее действие стеклофазы может повысить предел прочности при сжатии на холоду форстеритового материала.

### Влияние $\text{CeO}_2$ на свойства форстерита

Были определены кажущаяся плотность, открытая пористость, водопоглощение и предел прочности при сжатии на холоду образцов 1—6, спеченных при  $1500^\circ\text{C}$  в течение 2 ч; результаты приведены в табл. 2. Добавка  $\text{CeO}_2$  значительно влияет на свойства опытных образцов.

Для образцов 2—6 характерна более высокая кажущаяся плотность по сравнению с образцом 1. С ростом добавки  $\text{CeO}_2$  кажущаяся плотность образцов 3 и 5 составляет  $2,15$  и  $2,24 \text{ г/см}^3$  соответственно, что выше на  $0,1$  и  $0,2 \text{ г/см}^3$  плотности образца 1. Изменения открытой пористости и водопоглощения непосредственно релевантны. С ростом добавки  $\text{CeO}_2$  наблюдается снижение открытой пористости и водопоглощения: первый показатель у образцов 3 и 5 достигает  $30,1$  и  $28,1\%$ , что ниже на  $2$  и  $4\%$ , чем у образца 1, второй показатель составляет  $14,0$  и  $12,5\%$ , что ниже на  $2$  и  $3\%$ , чем у образца 1. При добавке в форстерит  $0,4\%$   $\text{CeO}_2$  предел прочности при сжатии на холоду образца 2 увеличился незначительно — от  $12,4$  до  $12,8$  МПа. При добавке в форстерит  $2,0\%$   $\text{CeO}_2$  предел прочности при сжатии на холоду образца 6 повысился значительно — от  $12,4$  до  $17,8$  МПа. Это указывает на то, что  $\text{CeO}_2$ , очевидно, оказывает эффект усиления спекания форстерита, что хорошо согласуется с результатами SEM. Явное изменение характеристик спекания свидетельствует об избытке жидкости, появляющейся при высокой температуре при введении добавки  $\text{CeO}_2$  в форстерит в количестве более  $1,6\%$ , что отрицательно влияет на высокотемпературные характеристики форстерита. В этой связи определили необходимое количество добавки  $\text{CeO}_2$ , которая не должна превышать  $1,6 \text{ мас.}\%$ . Принимая во внимание характеристики спекания, а также удовлетворительные показатели плотности и прочности, определили, что количество добавки  $\text{CeO}_2$  в форстерит должно составлять  $0,8$ — $1,2\%$ . При этом комбинация главных свойств материала оптимальна: его кажущаяся плотность составляет  $2,15$ — $2,18 \text{ г/см}^3$ , открытая пористость  $29,5$ — $30,1\%$ , водопоглощение  $13,5$ — $14,0\%$ , предел прочности при сжатии на холоду  $13,4$ — $14,2$  МПа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Форстерит можно синтезировать из низкосортного магнезита и природного кремнезема с применением твердофазной реакции. Дефект, вызванный  $\text{CeO}_2$  в активном периклазе, ускоряет диффузию ионов и полезен для образования

форстерита. Вакансии  $Mg^{2+}$ , вызванные  $Ce^{4+}$ , частично занимают позиции  $Mg^{2+}$  в форстерите, что приводит к уменьшению размеров кристаллической решетки. Диоксид церия  $CeO_2$  и примеси распределяются по границам форстеритовых зерен, в результате чего повышается предел прочности при сжатии на холоду. При введении добавки  $CeO_2$  в количестве 0,8 % форстерит показывает несколько более однородную по размерам зерен микроструктуру. Наиболее эффективная добавка  $CeO_2$  в смесь сырьевых материалов составляет 0,8—1,2 % с учетом сочетания оптимальных свойств форстерита.

### Библиографический список

1. **Tavangarian, F.** Synthesis and characterization of spinel-forsterite nanocomposites / *F. Tavangarian, R. Emadi* // *Ceram. Int.* — 2011. — Vol. 37. — P. 2543.
2. **Saberi, A.** Synthesis and characterization of nanocrystalline forsterite through citrate-nitrate route / *A. Saberi, Z. Negahdari, B. Alinejad* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2009. — Vol. 35. — P. 1705.
3. **Kharaziha, M.** Synthesis and characterization of bioactive forsterite nanopowder / *M. Kharaziha, M. H. Fathi* // *Ceram. Int.* — 2009. — Vol. 35. — P. 2449.
4. **Ni, S.** Preparation and characterization of forsterite ( $Mg_2SiO_4$ ) bioceramics / *S. Ni, L. Chou, J. Chang* // *Ceram. Int.* — 2007. — Vol. 33. — P. 83.
5. **Saberi, A.** Synthesis and characterization of nanocrystalline forsterite through citrate-nitrate route / *A. Saberi, Z. Negahdari, B. Alinejad* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2009. — Vol. 35. — P. 1705.
6. **Sanosh, K. P.** Sol-Gel synthesis of forsterite nanopowders with narrow particle size distribution / *K. P. Sanosh, A. Balakrishnan, L. Francis, T. N. Kim* // *J. Alloys Compd.* — 2010. — Vol. 495. — P. 113.
7. **Okada, K.** Low temperature preparation and machinability of porous ceramics from talc and foamed glass particle / *K. Okada, F. Ikawa, T. Isobe* [et al.] // *J. Euro. Ceram. Soc.* — 2003. — Vol. 23. — P. 1283.
8. **Guo, W.** Influence of  $La_2O_3$  on preparation and performance of porous cordierite from rice husk / *W. Guo, H. B. Lu, C. X. Feng* // *J. Rare Earth.* — 2010. — Vol. 28. — P. 614.
9. **Yao, Y. J.** Effect of behaviors of Aluminum nitride ceramics with rare earth oxide additives / *Y. J. Yao, T. Qiu* // *J. Rare Earth.* — 2007. — Vol. 25, sup 1. — P. 58.
10. **Liu, S. F.** Effect of  $CeO_2$  addition on the properties of cordierite-bonded porous SiC ceramics / *S. F. Liu, Y. P. Zeng, D. L. Jiang* // *J. Euro. Ceram. Soc.* — 2009. — Vol. 29. — P. 1795.
11. **Shi, Z. M.** Effect of  $CeO_2$  on phase transformation towards cordierite in  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  system / *Z. M. Shi, K. M. Liang, S. R. Gu* // *Mater. Lett.* — 2001. — Vol. 51. — P. 68.
12. **Luo, X. D.** Structure Characterization of Cordierite Synthesized from Decomposed Magnesite Pyrophyllite / *X. D. Luo, D. L. Qu, G. D. Zhang, H. X. Lui* // *Chinese J. Inorg. Chem.* — 2011. — Vol. 27. — P. 434.
13. **Ruan, Y. Z.** Point defect phenomena of crystalline structure in some common structure materials / *Y. Z. Ruan, R. P. Wu, Y. Yu* // *Chinese J. Struct. Chem.* — 2005. — Vol. 24. — P. 1066.
14. **Zeng, J. X.** Effects of  $Na_2SiF_6$  on preparing mullite material with sludge from the aluminum profile factory and pyrophyllite / *J. X. Zeng, Y. Z. Ruan, Y. R. Chen* // *Chinese J. Struct. Chem.* — 2010. — Vol. 29. — P. 1562.
15. **Wu, R. P.** Influence of  $Cr_2O_3$  on the structure and property of Mg-Al spinel synthesized by waste slag in Aluminum factory / *R. P. Wu, Y. Yu, Y. Z. Ruan* [et al.] // *Chinese J. Struct. Chem.* — 2007. — Vol. 26. — P. 1455.
16. **Song, K. X.** Microwave dielectric characteristics of ceramics in  $Mg_2SiO_4-Zn_2SiO_4$  / *K. X. Song, X. M. Chen, C. W. Zheng* // *Ceram. Int.* — 2008. — Vol. 34. — P. 917. ■

Получено 01.11.12

© Xudao Luo, Duanli Zhipeng Xie, Wenyan Zhao, 2013 г.

Пер. — И. Г. Очагова

(ОАО «Черметинформация»), 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Unitecr 2013



13-й Всемирный конгресс и объединенная  
международная конференция по огнеупорам  
г. Виктория, Канада • 10—13 октября 2013 г.

<http://www.expoclub.ru>

К. т. н. В. П. Рева<sup>1</sup>, К. т. н. Д. В. Онищенко<sup>1</sup>, д. т. н. В. В. Петров<sup>2</sup>,  
д. т. н. В. А. Ким<sup>2</sup>, д. т. н. А. И. Евстигнеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,  
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

УДК 666.762.8:621.762.22

## ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКА КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ПО МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрена возможность использования порошков карбида вольфрама, полученного механохимическим синтезом, в качестве материала для изготовления твердого сплава ВК8. Представлены результаты сравнительных испытаний физико-механических и эксплуатационных свойств твердого сплава, изготовленного по различным режимам.

**Ключевые слова:** механохимический синтез, карбид вольфрама, твердый сплав ВК8, режимы спекания, режущие пластины.

### ВВЕДЕНИЕ

**В** последние десятилетия для производства современных режущих инструментов интенсивно применяют твердые сплавы. Они состоят из карбидов вольфрама, титана, тантала, скрепленных кобальтовой связкой. Карбиды вольфрама, титана и тантала обладают высокой твердостью, износостойкостью и теплоустойчивостью [1, 2]. Инструменты, оснащенные твердым сплавом, хорошо сопротивляются истиранию сходящей стружкой и материалом заготовки и не теряют своих режущих свойств при температуре нагрева до 750—1100 °С. Скорость резания инструментами, оснащенными твердыми сплавами, в 3—4 раза превосходит скорость резания инструментами из быстрорежущей стали. Твердосплавные инструменты пригодны для обработки закаленных сталей, а также неметаллических материалов, таких как стекло, фарфор. Недостатком твердых сплавов по сравнению с быстрорежущей сталью является их повышенная хрупкость, которая возрастает с уменьшением содержания в сплаве кобальта.

Производство твердых сплавов относится преимущественно к области порошковой металлургии. Порошки карбидов смешиваются с порошком кобальта, затем прессуются изделия требуемой формы и подвергаются спеканию при температуре, близкой к температуре плавления кобальта. Таким образом формируются пластинки твердого сплава различных размеров и форм, которыми оснащаются резцы,

фрезы, сверла, зенкеры, развертки и др. Пластины твердого сплава крепятся к державке или к корпусу напайкой или механически при помощи винтов и прижимов.

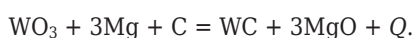
Применение твердых сплавов на основе карбида вольфрама позволяет вести обработку металлов со сверхвысокими скоростями резания, так как сплавы этой группы обладают очень высокой твердостью, износостойкостью и красностойкостью. Среди приоритетных и востребованных твердосплавных композиций следует отметить сплав ВК8, которым оснащают инструмент для бурения, волочения, черного точения жаропрочных и нержавеющей сталей, а также сплавов титана. Сплав ВК-8 за счет высокой прочности и ударной вязкости применяют для изготовления твердосплавных штампов, работающих в условиях больших ударных нагрузок. Стойкость твердосплавных штампов по сравнению со стальными возрастает в 30—50 раз, чем обеспечивается большой экономический эффект.

Авторами публикаций [3—5] показано, что аморфный углерод, синтезируемый пиролизом из возобновляемого растительного сырья (отходов сельскохозяйственных культур и сфагнового мха), обладает ценным комплексом физико-химических свойств. Кроме того, он является эффективным углеродным агентом для проведения механохимического синтеза карбида вольфрама. Синтезируемый карбид вольфрама имеет пониженное содержание серы по сравнению с карбидами, полученными с использованием классических углеродных агентов [6].

Цель настоящей работы — отработка технологии спекания твердого сплава ВК8, сформированного из порошка карбида вольфрама, полученного механохимическим синтезом, а также исследование его физико-механических и эксплуатационных свойств.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной компонент твердого сплава ВК8 — карбид вольфрама был получен механохимическим синтезом на вибрационной мельнице [4]. Морфология ультрадисперсного порошка карбида вольфрама показана на рис. 1. Синтез карбида вольфрама осуществляли в соответствии с реакцией



Использовали оксид вольфрама квалификации х. ч. и магний чистотой 99,95 %.

В качестве углеродсодержащего материала применяли аморфный углерод, полученный пиролизом при 950 °С из овса и бурого сфагнома. Активацию исходных компонентов и механохимический синтез карбида вольфрама осуществляли в герметичном контейнере (механореакторе) энергонапряженной вибромельницы [4], работающей при частоте колебаний контейнера 750 мин<sup>-1</sup> и амплитуде 90 мм. В качестве мелющих тел применяли шары из стали ШХ15 диаметром 14 мм. Интенсивность измельчения составляла 1:15. О прохождении синтеза судили по скачкообразному повышению температуры в механореакторе, измеряемой на его внешней стенке с помощью инфракрасного лазерного пирометра С-20.1, после чего виброобработку прекращали. Полученный продукт подвергали трехкратной отмывке в растворе соляной кислоты плотностью 1,15 г/см<sup>3</sup>.

В качестве связки для создания твердосплавной смеси применяли ультрадисперсный порошок кобальта ПК-1у по ГОСТ 9721 размерностью 3—7 мкм и плотностью 8,93 г/см<sup>3</sup>. Смешивание порошковых компонентов в пропорциях, соответствующих химическому составу изготавливаемого твердого сплава, в количестве 80 г осуществляли в планетарной шаровой мельнице РМ-400, Германия, в течение 150 мин. Использовали контейнер из нержавеющей стали, футерованный твердым сплавом ВК3, а также мелющие твердосплавные шары из сплава ВК6 диаметром 14 мм. Заполнение контейнера составляло 0,35. Смешивание осуществляли в 75%-ном растворе этилового спирта. Отгонку спирта осуществляли с помощью универсального дистиллятора К-355 фирмы «BUCHI Labortechnik AG», Швейцария, по стандартной методике в течение 35 мин. В качестве коммерческого продукта использовали твердосплавную смесь ВК8 производства Кировоградского завода твердых сплавов (СТО 00196144-0727-210 СМК).

Спекание твердосплавной композиции ВК8 осуществляли в высокотемпературной вакуумной печи «Nabertherm VHT 100/22-МО», Германия, по трем экспериментальным режимам. Режим I: предварительное спекание с противоточной подачей водорода, температура нагрева 930 °С, длительность нагрева 147 мин, выдержка 60 мин, окончательное спекание при 1410 °С в вакууме 1·10<sup>-4</sup> мбар в течение 85 мин. Режим II: спекание в вакууме при 1400 °С при максимальном для данной печи вакууме 1·10<sup>-5</sup> мбар в течение 155 мин. Режим III — изостатическое горячее прессование в вакууме на лабораторном прессе горячего изостатического прессования фирмы AIP, США, при 1430 °С, давлении 1,3 т/см<sup>2</sup> и выдержке 5 мин.

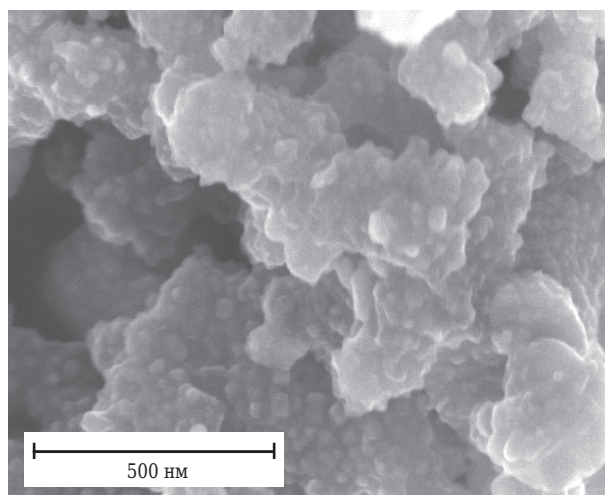
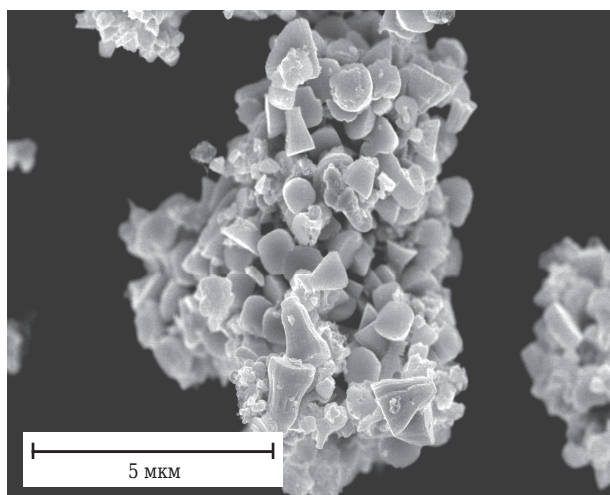
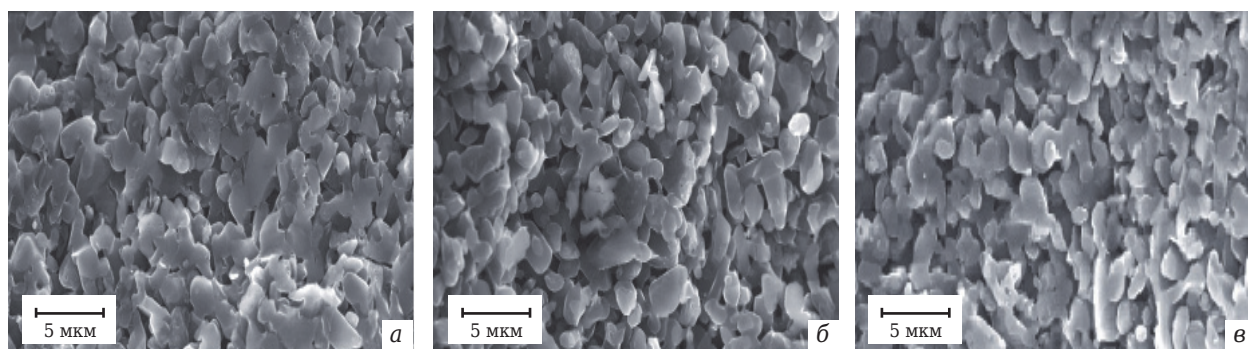


Рис. 1. Морфология порошка карбида вольфрама



**Рис. 2.** Микроструктура экспериментального твердого сплава ВК8: а — спекание по смешанному режиму; б — спекание в вакууме; в — изостатическое горячее прессование

Для улучшения прессуемости смеси, уменьшения трения между прессовкой и стенками пресс-формы, придания заготовкам дополнительной прочности в смесь дополнительно вводили пластификатор. В качестве пластификатора при холодном прессовании использовали синтетический каучук, растворенный в бензине АИ-95 в соотношении 1:0,4, в количестве 3 мас. %, так как при данном содержании пластификатора спеченные образцы имеют наилучшие показатели прочности при изгибе. При увеличении количества пластификатора до 5—10 мас. % происходит увеличение содержания свободного углерода в смеси до 0,5 мас. %; при этом при введении 3 мас. % пластификатора содержание свободного углерода составляет 0,01 мас. %. Это обусловлено особенностями разложения синтетического каучука на стадии спекания, что негативно влияет на эксплуатационные свойства твердосплавной продукции. Высушенные смеси измельчали в планетарной шаровой мельнице РМ-400 фарфоровыми шарами диаметром 16 мм в течение 140 мин и просеивали через сито с размером ячейки 0,25 мм. Прессование штабиков размерами  $8 \times 8 \times 4$  мм из подготовленных к прессованию смесей производили на порошковом прессе ЕРМ-500 GA, КНР, в стальной пресс-форме. Давление прессования  $1,3 \text{ т/см}^2$ .

Для определения кислорода и азота применяли элементный анализатор серии ONH-2000 фирмы «Eltra», Германия. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания на лабораторных весах AXIS AG 100 с устройством для гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018. Твердость сплавов оценивали по длине диагонали отпечатка при вдавливании алмазной пирамиды на приборе ТК-2М, модуль упругости (модуль Юнга) — по резонансу между собственными колебаниями образца и возбуждениями от генератора. Предел прочности при изгибе сплавов определяли по методике испытаний твердых сплавов по

ГОСТ 20019. При этом использовали образцы размерами  $5 \times 5 \times 35$  мм, предварительно отшлифованные до заданной ГОСТ 2789 шероховатости поверхности. Испытывали 5 образцов для получения достоверных значений в одной точке. Испытания проводили на универсальной испытательной машине EUS-20, Германия, при трехточечном нагружении с расстоянием между опорами  $(30 \pm 0,5)$  мм; максимальная нагрузка 10 кН (ГОСТ 28840). При испытании фиксировали разрушающую нагрузку; производили запись диаграммы нагрузка ( $P$ ) — перемещение по линии действия силы ( $F$ ). Скорость перемещения подвижной траверсы при испытаниях составляла 3 мм/мин. Предел прочности при сжатии определяли на универсальной тестовой машине UTS-100 по ГОСТ 27034. При этом использовали образцы размерами  $4 \times 4$  мм и высотой  $(10 \pm 0,1)$  мм. Торцевые стороны образцов после изготовления подвергались алмазной шлифовке для получения отклонения от перпендикулярности и параллельности не более 0,01 мм. Для исключения влияния трения на результаты испытаний между опорами и образцом вставляли прокладки из алюминиевой фольги толщиной 0,03 мм. Скорость перемещения активной траверсы при испытаниях выдерживали в интервале 1,0–1,5 мм/мин.

Ударную вязкость определяли по энергии излома образцов на маятниковом копре «Zwick 5102», сопротивление разрушению сплавов — с использованием силового критерия механики разрушения (коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ ). По стандарту определения характеристик трещиностойкости при статическом нагружении для испытания материалов использовали образцы с концентратором напряжений в виде надреза с нанесенной в его вершине трещиной. Расчеты  $K_{Ic}$  для образцов-штабиков при испытании на трехточечный изгиб проводили по ГОСТ 25.506. Морфологию поверхности порошков карбида вольфрама исследовали на электронном сканирующем

Таблица 1. Физико-механические и структурные характеристики твердого сплава ВК8 после спекания в различной атмосфере (числитель — экспериментальная смесь, знаменатель — коммерческий продукт)

| Характеристики                                         | Режим спекания твердосплавных смесей  |                                       |                                       |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                        | I                                     | II                                    | III                                   |
| Объемная доля твердой фазы, %                          | $\frac{84 \pm 1,7}{83,9}$             | $\frac{85 \pm 1,2}{83,1 \pm 1,2}$     | $\frac{89 \pm 1,1}{86,3 \pm 1,1}$     |
| Средний условный размер частицы карбида вольфрама, мкм | $\frac{2,22 \pm 0,03}{2,41 \pm 0,03}$ | $\frac{2,1 \pm 0,03}{2,17 \pm 0,03}$  | $\frac{1,7 \pm 0,02}{1,9 \pm 0,02}$   |
| Средняя условная толщина прослойки кобальта, мкм       | $\frac{0,74 \pm 0,04}{0,77 \pm 0,04}$ | $\frac{0,54 \pm 0,04}{0,63 \pm 0,04}$ | $\frac{0,34 \pm 0,03}{0,45 \pm 0,03}$ |
| Плотность, $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>                 | $\frac{14,5 \pm 0,4}{14,6 \pm 0,4}$   | $\frac{14,6 \pm 0,4}{14,7 \pm 0,4}$   | $\frac{14,9 \pm 0,4}{15 \pm 0,4}$     |
| Твердость, ГПа                                         | $\frac{13,7 \pm 0,7}{11,2 \pm 0,7}$   | $\frac{14,4 \pm 0,7}{12,3 \pm 0,7}$   | $\frac{18,3 \pm 0,7}{15,4 \pm 0,7}$   |
| Модуль упругости, $10^{-4}$ МПа                        | $\frac{61 \pm 1}{60 \pm 1}$           | $\frac{61,5 \pm 1}{60,5 \pm 1}$       | $\frac{63 \pm 1}{61,5 \pm 1}$         |
| Предел прочности, ГПа:                                 |                                       |                                       |                                       |
| при изгибе                                             | $\frac{2,24 \pm 0,1}{2,12 \pm 0,1}$   | $\frac{2,64 \pm 0,1}{2,37 \pm 0,1}$   | $\frac{2,97 \pm 0,1}{2,74 \pm 0,1}$   |
| при сжатии                                             | $\frac{4,5 \pm 0,2}{4,3 \pm 0,2}$     | $\frac{4,7 \pm 0,2}{4,5 \pm 0,2}$     | $\frac{4,9 \pm 0,2}{4,7 \pm 0,2}$     |
| Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>                   | $\frac{35 \pm 2}{34 \pm 2}$           | $\frac{62 \pm 2}{51 \pm 2}$           | $\frac{95 \pm 2}{77 \pm 2}$           |
| Вязкость разрушения, МПа·м <sup>1/2</sup>              | $\frac{11 \pm 0,5}{10 \pm 0,5}$       | $\frac{14 \pm 0,5}{12 \pm 0,5}$       | $\frac{17 \pm 0,5}{14 \pm 0,5}$       |

микроскопе высокого разрешения «Hitachi S5500», Япония. Микроструктуру твердого сплава исследовали на электронном сканирующем микроскопе JSM 6510LA (фирмы JEOL, Япония).

В качестве режущего инструмента использовали сборные резцы с режущими четырехгранными пластинами. Испытания режущих пластин [7] из сплава ВК8 в составе резцов проводили на токарно-винторезном станке повышенной точности модели ИС1-1 (95ТС-1) с помощью продольного точения болванки диаметром 70 мм из жаропрочного сплава ХН70Ю. Охлаждающие жидкости в процессе испытаний не применяли. Инструмент с режущими пластинами из сплава ВК8 испытывали при следующих режимах резания: скорость резания — варьируемая, подача 0,3 мм/об, глубина резания 0,7 мм. Критерием износа служило предельное значение фаски изнашивания задней поверхности. Износ задней поверхности резца из сплава ВК8 в зависимости от времени резания при черновом точении определяли на инструментальном (стереоскопическом) микроскопе «45X Motic SMZ-168-TL», Китай.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура экспериментального твердого сплава ВК8, полученного при трех режимах спекания, показана на рис. 2. Наиболее дисперсная, развитая структура наблюдается у твердого сплава, полученного изостатическим горячим прессованием; при этом средний условный размер частицы карбида вольфрама составляет 1,7 мкм (табл. 1). В структуре сплава, спеченного по смешанному режиму, наблюдаются сравнительно крупные зерна карбида вольфрама; средний условный размер частицы карбида вольфрама составляет 2,22 мкм. Однако следует отметить, что твердый сплав, изготовленный из коммерческой твердосплавной смеси по любому из режимов спекания, имеет частицы карбида с размером в среднем на 10 % большим, чем у экспериментальных смесей. Твердые сплавы, изготовленные по экспериментальным режимам, имея после спекания по любому из режимов меньшую по сравнению с коммерческим продуктом плотность, показали на 14—18 % большую твердость (см. табл. 1). Как видно из табл. 1, твердые сплавы из экспериментальных смесей имеют более высокие физико-механические характеристики, чем

Таблица 2. Стойкость пластин из твердого сплава ВК8

| Пластины из твердого сплава | Стойкость пластин, мин, при скорости резания, м/мин |     |    |    |     |     |      |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------|-----|----|----|-----|-----|------|
|                             | 20                                                  | 25  | 30 | 35 | 40  | 100 | 150  |
| Промышленного               | 27                                                  | 15  | 11 | 5  | 2,3 | 0,7 | 0,55 |
| Экспериментального          | 135                                                 | 115 | 85 | 69 | 43  | 6,9 | 5,7  |

сплавы из коммерческого продукта. Причем если разница в свойствах сплавов, полученных по смешанному режиму спекания, не превышает 5 %, то у сплавов, полученных спеканием в вакууме и изостатическим горячим прессованием, разница в свойствах составляет от 15 до 20 %.

Сравнительные испытания режущих пластин из твердого сплава ВК8 показали, что стойкость при резании у экспериментальных пластин, изготовленных методом изостатического горячего прессования, в зависимости от скорости резания от 5 до 19 раз выше, чем у промышленных резцов (табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, спеченный твердый сплав ВК8, изготовленный с использованием порошка карбида вольфрама, синтезированного по механохимической технологии, обладает высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств. Это предопределяет перспективы его практического применения при изготовлении высокоэффективных режущих инструментов.

## Библиографический список

1. **Самсонов, Г. В.** Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянко, Ф. И. Чаплыгин. — Киев : Наукова думка, 1974. — 176 с.

2. **Скорород, В. В.** Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений / В. В. Скорород. — Киев : Техника, 1982. — 167 с.

3. **Онищенко, Д. В.** Возобновляемое растительное сырье как основа для получения функциональных нанокompозитных материалов универсального назначения / Д. В. Онищенко, В. В. Чаков // Журнал прикладной химии. — 2011. — Т. 84, № 9. — С. 1562—1566.

4. **Онищенко, Д. В.** Получение нанопорошка карбида вольфрама методом механической активации / Д. В. Онищенко, В. П. Рева // Физика и химия обработки материалов. — 2011. — № 2. — С. 71—77.

5. **Рева, В. П.** Особенности механохимического синтеза карбида вольфрама с участием природного графита / В. П. Рева, Д. В. Онищенко // Новые огнеупоры. — 2012. — № 10. — С. 61—66.

**Reva, V. P.** Features of mechanochemical synthesis of tungsten and titanium carbides with participation of natural graphite / V. P. Reva, D. V. Onishchenko // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 53, № 5. — P. 330—334.

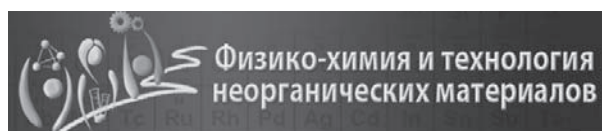
6. **Онищенко, Д. В.** Приоритетные критерии механохимического синтеза карбидов титана и вольфрама с участием различных углеродных компонентов / Д. В. Онищенко, В. П. Рева, В. Г. Курявый // Металлург. — 2012. — № 12. — С. 41—45.

7. **Башков, В. М.** Испытания режущего инструмента на стойкость / В. М. Башков, П. Г. Кацев. — М. : Машиностроение, 1985. — 136 с. ■

Получено 26.04.13

© В. П. Рева, Д. В. Онищенко, В. В. Петров, В. А. Ким, А. И. Евстигнеев, 2013 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## V международная конференция

## «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»

На конференции планируется обсудить и обобщить весь спектр результатов исследований в области прочности, деформации и разрушения материалов и наноматериалов. В рамках проведения конференции будут проведены семинары и выставка, знакомящие участников и гостей конференции с новейшими образцами оборудования для исследования структуры, процессов деформации и разрушения материалов и наноматериалов. К открытию конференции будет выпущен сборник трудов.

Сайт конференции: <http://www.dfmn.imetran.ru>. E-mail: [dfmn@imetran.ru](mailto:dfmn@imetran.ru)

Адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, 49

26—29 ноября 2013 г.

Москва, ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН»

Д. Т. Н. В. З. Абдрахимов, К. Т. Н. Е. С. Абдрахимова

ФГБОУ ВПО «Самарская академия государственного и муниципального управления»,  
г. Самара, Россия

УДК 666.76.043.2:66.046.4

## ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ПРИ ОБЖИГЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ

Исследованы процессы горения теплоизоляционных материалов из отходов производств без применения природных традиционных материалов. Показано, что при термообработке керамических теплоизоляционных материалов в интервале 400—600 °С из изделия удаляется основная часть летучих веществ, в интервале 1050—1100 °С значительно ускоряется процесс восстановления железа, при 1100 °С в обожженном керамическом материале органические соединения практически отсутствуют.

**Ключевые слова:** теплоизоляционный материал, отходы горючих сланцев, золошлаковая смесь, межсланцевая глина, горение, пироуглерод, оксид железа, углеводороды.

**Ц**ель настоящей работы — исследовать процессы горения при обжиге теплоизоляционных материалов из техногенного сырья (отходов производств энергетики) с повышенным содержанием углерода без применения традиционных природных материалов, так как именно процессы горения при обжиге теплоизоляционного материала формируют основные физико-механические свойства изделий.

Ранее [1—3] была показана принципиальная возможность использования золошлаковой смеси от сжигания горючих сланцев и межсланцевой глины в производстве теплоизоляционного материала. В качестве отощителя, интенсификатора и частично выгорающей добавки использовали золошлаковую смесь от сжигания горючих сланцев. При сжигании горючих сланцев образуются золы и шлаки. Зола-унос — тонкодисперсный материал, состоящий из минеральной части сжигаемого топлива и улавливаемый из дымовых газов ТЭС. Размер частиц золы-уноса колеблется от 3—5 до 100—150 мкм. Плотность золы-уноса составляет 2,0—2,5 г/см<sup>3</sup>, насыпная плотность 0,85—1,05 г/см<sup>3</sup>, удельная поверхность 1150—1280 см<sup>2</sup>/г. Шлак — агрессивные и сплавившиеся частицы золы размерами от 0,15 до 30 мм.

Процесс образования золошлаковой смеси происходит по следующей технологии: сланец

с шахт Кашпирского рудника доставляется на Сызранскую ТЭС, загружается в приемные бункера и ленточными питателями подается в молотковые дробилки на первую стадию измельчения. Полученная крупа (размер зерен до 15 мм) поступает в шахтные мельницы на вторую стадию измельчения. Поток воздуха тонкий порошок через специальную форсунку вдвигается в топку паровых водотрубных котлов. В топке начинается термообработка сланцев. В газоходах и пылеосадительных устройствах происходит естественное фракционирование золы. Крупные частицы оседают в топке (25 %), средние в экономайзере (5 %), мультициклонах (35 %), а самые легкие в электрофильтрах (30 %). Некоторая часть золы улетает с газами в атмосферу (5 %). Усредненный химический состав золошлаковой смеси представлен в табл. 1. Повышенное содержание в золошлаковой смеси Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и R<sub>2</sub>O позволяет интенсифицировать (снизить температуру обжига) процессы обжига, а Δm<sub>прк</sub> — снизить плотность теплоизоляционного керамического изделия.

Межсланцевую глину использовали в качестве связующего для получения теплоизоляционного материала. Она образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и по числу пластичности относится к высокопластичному глинистому

Таблица 1. Химический состав компонентов, мас. %

| Компонент          | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO | R <sub>2</sub> O | Δm <sub>прк</sub> |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----|------------------|-------------------|
| Золошлаковая смесь | 55,30            | 14,56                          | 6,4                            | 1,51  | 0,5 | 4,78             | 16,5              |
| Межсланцевая глина | 47,03            | 16,80                          | 5,6                            | 10,90 | 2,1 | 3,40             | 12,8              |

сырью (число пластичности 27—32) с истинной плотностью 2,55—2,62 г/см<sup>3</sup>. Химический состав межсланцевой глины представлен в табл. 1.

В настоящей работе изложены вопросы кинетики выгорания угольных частиц при обжиге теплоизоляционного материала оптимального состава, мас. %: межсланцевая глина 80, золашлаковая смесь 20 [1—3]. Физико-механические показатели теплоизоляционного материала: предел прочности при сжатии 2,3—2,6 МПа, средняя плотность 0,75—0,9 г/см<sup>3</sup>, морозостойкость более 50 циклов, температура обжига 1150—1160 °С.

Для исследования состава газов, выделяющихся при обжиге теплоизоляционного материала, был использован хроматограф ХЛ-4 (см. рисунок) [4]. Хроматографический метод — это физико-химический метод разделения сложных смесей газов на составляющие компоненты. При этом происходит распределение компонентов смеси между двумя фазами, одна из которых неподвижная, а другая — подвижная. В газовой хроматографии, как известно, подвижной фазой является газ [4].

Процесс горения твердого углерода включает пять этапов [4—10]: 1 — доставка окислителя из атмосферы к поверхности раздела фаз путем молекулярной и конвективной диффузии; 2 — адсорбция молекул окислителя на поверхности графита; 3 — взаимодействие адсорбированного окислителя с атомами углерода и образование продуктов реакции, также адсорбированных на графите; 4 — десорбция продуктов реакции; 5 — удаление (редиффузия) продуктов в атмосферу. По мнению авторов публикаций [5, 7], процесс горения включает три стадии: диффузионную, адсорбционную и химическую.

Газовая среда, окружающая керамический материал при нагревании, как известно, является одним из движущих факторов интенсивности протекания физико-химических процессов. В начале термообработки до 180 °С из образцов выделяется остаточная вода [5, 6]. Изучение динамики газовой выделения из исследуемого материала показывает, что в условиях нормального давления начиная с 250 °С в результате

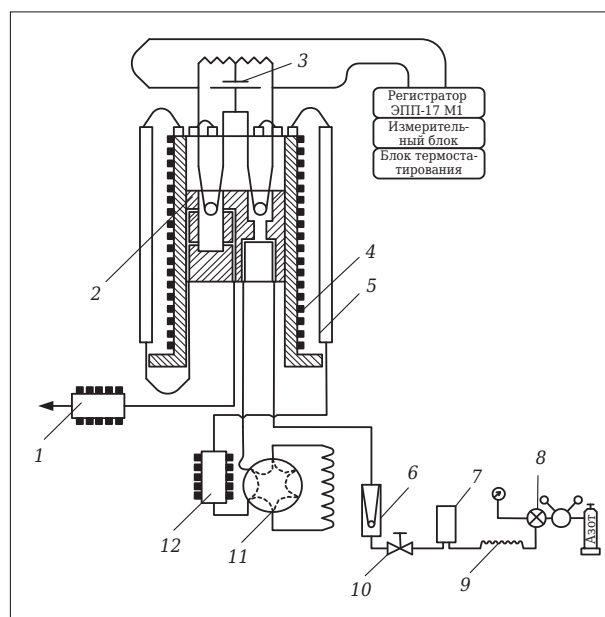


Схема устройства хроматографа ХЛ-4: 1, 4 — нагреватели; 2 — детектор; 3 — источник питания; 5 — колонка; 6 — ротаметр; 7 — осушитель газа; 8 — редуктор; 9 — капилляр; 10 — дроссель газов; 11 — кран-дозатор; 12 — испаритель жидкой пробы

разложения органических веществ наблюдается выделение H<sub>2</sub>, CO, SO<sub>3</sub> и CO<sub>2</sub>. При термообработке изделий в интервале 400—600 °С из теплоизоляционного материала удаляются летучие углеводороды, и в изделиях остаются частицы только одной (из четырех известных) аллотропических форм углерода — графита [4—7]. При 400—500 °С физическая адсорбция диоксида углерода на поверхности графита уступает место хемадсорбции без выделения CO [7—10]. Такая хемадсорбция приводит к возникновению на поверхности графита двух комплексов: кетенового CH<sub>2</sub> = C = O и кето > C = O (карбонильная группа).

Авторы публикации [10] полагают, что при нагреве теплоизоляционных материалов до 600 °С в большинстве случаев углеводороды удаляются из изделий. В изделиях остается только высокотемпературная устойчивая форма углерода — графит. С повышением температуры кетеновые комплексы становятся неустойчивыми и при 600—700 °С покидают

Таблица 2. Состав газовой среды, выделяющейся при обжиге керамического материала, %

| Температура обжига, °С | H <sub>2</sub> | CO    | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> |
|------------------------|----------------|-------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 250                    | 3,03           | 27,03 | 6,44           | 27,94           | 34,36          | 1,04            |
| 350                    | 4,82           | 35,72 | 5,83           | 24,0            | 28,80          | 1,78            |
| 550                    | 7,88           | 40,30 | 2,07           | 28,82           | 19,84          | 2,83            |
| 950                    | 8,02           | 51,03 | 1,98           | 21,89           | 17,08          | —               |
| 1050                   | 6,20           | 70,25 | 1,90           | 5,07            | 16,58          | —               |

поверхность графита, а на их месте возникают новые кетеновые комплексы [7–10].

Условия доставки окислителей и отвода продуктов реакций от поверхности графита во многом зависят от характера макропотоков дымовых газов. При этом различаются два случая [10]. Первый — ламинарное течение макропотока. У этого потока отсутствует составляющая, перпендикулярная границе раздела фаз, и поэтому ламинарный поток не увеличивает диффузию. Второй случай — турбулентное течение конвективного потока, которое характеризуется сложной траекторией движения струек газа.

В процессе нагрева органические примеси обугливаются (главным образом во внутренних слоях керамического материала, изолированных от доступа кислорода воздуха), распадаясь на летучие и углистые остатки, которые сгорают с трудом. Процесс этот аналогичен сухой перегонке топлива. Обугливание с образованием углистого остатка происходит в интервале 500–800 °С [6–8]. При термообработке керамических материалов выделяется газовая фаза, которая также является активным реагентом, влияющим на протекающие в этих материалах физико-химические процессы [9, 10].

Правильная оценка качественного состава и количественного соотношения компонентов газовой фазы будет способствовать выбору оптимальных режимов термообработки для получения керамического материала с заданными свойствами.

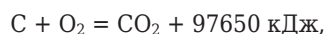
При термообработке до 180 °С суммарное содержание газов-восстановителей (водорода и угарного газа), как следует из табл. 2, составляет более 30 %, что свидетельствует о восстановительном характере газовой среды. В интервале 350–550 °С в составе газовой среды отмечается интенсивное уменьшение содержания окислителя (кислорода) и нейтрального газа (азота). В интервале 550–1050 °С наблюдается незначительное снижение содержания кислорода и азота.

При 800 °С и выше формируются пиролитические формы углерода (кокс и полукокс) [5]. Пиролитический углерод (пироуглерод) — это углеродные пленки, образующиеся на нагретых поверхностях из-за термического нарушения целостности вещества. Это класс материалов, различающихся структурой и свойствами, объединенных принципом получения. Получение пироуглерода происходит путем кристаллизации из газовой фазы на гладкой поверхности [5]. Изначально происходит образование «зародышей» на поверхности и их рост, в процессе которого атомы газообразного углерода взаимодействуют с углеродом «зародышей»,

в результате чего образуется твердая структура. Рост твердой структуры происходит в виде конуса; медленно расширяясь, основания конусов заполняют всю поверхность образования «зародышей», превращаясь в цилиндры. Внутренние слои углеродных атомов образуют графитоподобную структуру, свойства их определяются температурами образования: низкотемпературный (800–1100 °С) и высокотемпературный (1400–2200 °С) [5].

Исследования показали, что основными компонентами газовой фазы при обжиге керамических материалов при 950 °С являются CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и некоторые другие газы (см. табл. 2) [4, 5, 11–15]. При выгорании образовавшегося углистого остатка происходят следующие процессы [7, 10–15]: диффузия кислорода через слой керамики; химические реакции горения с образованием внутри керамики оксида углерода; диффузия образовавшегося оксида углерода к поверхности керамики; сгорание оксида углерода за счет кислорода окружающей среды.

Скорость выгорания углистого остатка определяется самым медленным процессом — диффузией кислорода через слой керамики. Кислород вступает в соединение с углеродом по следующим реакциям [5, 7, 10–15]:



Присутствие внутри керамического материала кокса при недостатке кислорода приводит к восстановлению CO<sub>2</sub> до оксида углерода по реакции



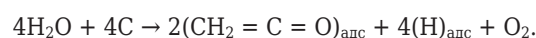
При обжиге керамических изделий выгорание углерода усложняется процессом дегидратации, которая при скоростном обжиге проходит при температурах выше 500 °С. Потеря химически связанной воды в монтмориллоните (межсланцевая глина) происходит постепенно в широком интервале (от 200 до 800 °С и выше, но основная масса воды выделяется выше 500 °С) в зависимости от характера и степени изоморфного замещения в кристаллической решетке одних атомов другими. В связи с этим затрудняются диффузия кислорода и, соответственно, выгорание углистого остатка. Количество органических примесей в образцах, обожженных в парогазовой среде и в среде водяного пара в интервале 750–850 °С, в 6–7 раз больше, чем в образцах, обожженных в окислительной среде [5, 7, 10–15].

Начиная с 800 °С взаимодействие CO<sub>2</sub> с графитом происходит не только с поверхности

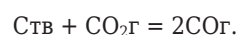
[5, 7, 10–15]. Молекулы  $\text{CO}_2$  внедряются в межбазисное пространство графита и ослабляют связи поверхности атомов углерода с массой кристалла графита, подготавливая их к взаимодействию с внешними молекулами  $\text{CO}_2$ . По данным [5, 7, 10–15], реакция  $\text{CO}_2$  с С слагается из двух этапов: первый — молекулы  $\text{CO}_2$ , ударяясь о поверхность графита, образуют адсорбированный и газообразный оксид углерода. Эта часть реакции идет по схеме реакции первого порядка. Как известно, реакция первого порядка описывается уравнением  $-dc/d\tau = k_1c$  в дифференциальной форме или уравнением  $k_1 = (1/\tau)\ln(c_0/c)$  в интегральной форме, где  $c_0$  — начальное содержание (концентрация) графита, %;  $c$  — содержание графита, %, в момент  $\tau$  [15].

Второй этап — десорбция адсорбированного оксида углерода: реакция идет по схеме второго порядка. Кинетическое уравнение реакции второго порядка при постоянном значении диоксида углерода в дифференциальной форме описывается уравнением  $-dc/d\tau = k_2c^2$  или  $k_2 = (1/\tau)(1/c - 1/c_0)$  [10].

Эксперименты, проведенные в условиях глубокого вакуума, показали [5, 7, 10–15], что в результате реакции  $\text{H}_2\text{O}$  с С образуются только  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , и притом только в эквимолекулярных количествах. В интервале  $750\text{--}1050^\circ\text{C}$  молекулы воды, ударяясь о поверхность графита, распадаются на кетеновые комплексы  $(\text{CH}_2 = \text{C} = \text{O})_{\text{адс}}$  и адсорбированные атомы водорода  $(\text{H})_{\text{адс}}$ :



Адсорбционный комплекс  $(\text{H})_{\text{адс}}$  является более прочным, чем кето-комплекс. При  $900^\circ\text{C}$  и выше кето-комплекс разлагается и, таким образом, на каждый 1 моль израсходованного  $\text{CO}_2$  образуется 2 моля  $\text{CO}$ , т. е. образование  $\text{CO}$  соответствует обычной стехиометрической реакции [7, 15–17]:

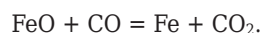
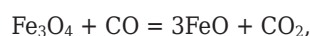


Присутствие в теплоизоляционном материале при спекании невыгоревшего углерода может явиться причиной не только образования черной сердцевины, но и появления трещины.

Эти дефекты особенно характерны для масс с повышенным содержанием органики. Дымовые газы [18], поступающие в зону подогрева изделий (температура материала  $400\text{--}1000^\circ\text{C}$ ), содержат следующие соединения, об. %:  $\text{H}_2\text{O}$  16,0,  $\text{CO}_2$  7,0,  $\text{O}_2$  8,0,  $\text{N}_2$  69,0. Совместное рассмотрение взаимодействия окислителей с углеродом крайне затруднительно, поскольку реакции проходят одновременно и тепловые эффекты накладываются друг на друга [18–20].

Углеводородные соединения, создавая восстановительную среду при низких температурах, способствуют переводу в расплав минеральной части при  $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$  [18–20]. По данным [10], на образование газовой фазы тратится графит, масса которого составляет всего 0,1 % массы изделия. Избыточное содержание углерода снижает прочность изделия [18].

Если в процессе спекания с участием жидкой фазы углеродистый материал будет изолирован от воздуха до того, как он полностью окислится, то при более высоких температурах он будет действовать как восстановитель [18–20]. В интервале  $1050\text{--}1100^\circ\text{C}$  значительно ускоряется процесс восстановления железа [18–20]. При этом в железосодержащих массах оксид железа может восстанавливаться по реакциям:



При температуре обжига  $1100^\circ\text{C}$  в обожженном керамическом материале органические соединения практически отсутствуют (табл. 3). При повышении температуры обжига до  $1100^\circ\text{C}$  образуются более сложные соединения (анортит, муллит), которые придают изделию высокую механическую прочность [18–20]. Сердцевина и поверхность образца сильно различаются содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$ . На поверхности керамического материала количество  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  больше, чем количество  $\text{FeO}$ , а в середине образца — наоборот (см. табл. 3).

При поддержании окислительной среды в зоне обжига более темный цвет возникает только в сердцевине обожженного изделия. При наличии в зоне обжига  $\text{CO}$  изделие име-

Таблица 3. Содержание органических соединений и оксидов железа в керамическом теплоизоляционном материале, %

| Теплоизоляционный материал                                      | Органика | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{FeO}$ |
|-----------------------------------------------------------------|----------|-------------------------|--------------|
| Исходная масса                                                  | 9,54     | 6,32                    | 1,02         |
| Черная сердцевина керамики, обожженной при $1100^\circ\text{C}$ | Следы    | 1,92                    | 4,13         |
| Поверхностный слой керамики                                     | »        | 4,02                    | 2,15         |

ет две зоны — более темный цвет в сердцевине и более светлый на поверхности; между ними располагается зона, имеющая нормальный для данной массы цвет.

В рассмотренном случае источником восстановления  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в  $\text{FeO}$  и образования черной сердцевины в керамическом материале является выгоревший углерод, а на поверхности  $\text{CO}$  в газовой среде зоны обжига.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале термообработки до  $180^\circ\text{C}$  из образцов выделяется остаточная вода. Изучение динамики газовой выделенности из исследуемого материала показывает, что в условиях нормального давления начиная с  $250^\circ\text{C}$  в результате разложения органических веществ наблюдаются выделения  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_3$  и  $\text{CO}_2$ . При  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  физическая адсорбция диоксида углерода на поверхности графита уступает место хемадсорбции без выделения  $\text{CO}$ . Такая хемадсорбция приводит к возникновению на поверхности графита двух комплексов — кетенового  $\text{CH}_2 = \text{C} = \text{O}$  и кето  $> \text{C} = \text{O}$  (карбонильная группа).

При нагреве теплоизоляционных материалов до  $600^\circ\text{C}$  углеводороды удаляются из гранул. В изделиях остается только высокотемпературная устойчивая форма углерода — графит. С повышением температуры кетеновые комплексы становятся неустойчивыми и при  $600\text{--}700^\circ\text{C}$  покидают поверхность графита, а на их месте возникают новые кетеновые комплексы. При  $900^\circ\text{C}$  и выше разлагается кето-комплекс, образование  $\text{CO}_2$  соответствует обычной стехиометрической записи реакции. В интервале  $1050\text{--}1100^\circ\text{C}$  значительно ускоряется процесс восстановления железа. При температуре обжига  $1100^\circ\text{C}$  в обожженном керамическом материале органические соединения практически отсутствуют.

## Библиографический список

1. Пат. 2362749 РФ, МПК С 04 В 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Денисов Д. Ю., Ковков И. В., Абдрахимов В. З., Журавль Л. В. ; заявитель и патентообладатель Самарский государственный университет ; заявл. 03.12.07 ; опубл. 27.07.09, Бюл. № 21.
2. Абдрахимов, В. З. Вовлечение отходов углеобогащения в процесс производства керамических материалов / В. З. Абдрахимов, В. А. Куликов, И. В. Ковков // Кокс и химия. — 2010. — № 11. — С. 39—43.
3. Абдрахимов, В. З. Теоретические и технологические аспекты использования техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов / В. З. Абдрахимов, Д. Ю. Денисов. — Самара : Самарская академия государственного и муниципального управления, 2010. — 72 с.
4. Абдрахимов, Е. С. Методика исследования состава газов, выделяющихся при обжиге керамического композиционного материала на основе бейделлитовой глины и продукта сгорания от базальтовой шихты / Е. С. Абдрахимов, Е. В. Вдовина // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 9. — С. 25—29.
5. Абдрахимов, Е. С. Исследование процессов горения при обжиге теплоизоляционного материала из техногенного сырья цветной металлургии и энергетики / Е. С. Абдрахимов, В. З. Абдрахимов // Журнал прикладной химии. — 2012. — Т. 82, вып. 8. — С. 1247—1252.
6. Абдрахимов, Е. С. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге керамических материалов из техногенного сырья / Е. С. Абдрахимов, В. З. Абдрахимов // Материаловедение. — 2008. — № 1. — С. 18—20.
7. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Часть 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами / О. А. Есин, П. В. Гельд. — Свердловск : Металлургия, 1962. — 671 с.
8. Абдрахимов, В. З. Производство керамических изделий на основе отходов энергетики и цветной металлургии / В. З. Абдрахимов. — Усть-Каменогорск : Восточно-Казахстанский государственный технический университет, 1997. — 289 с.
9. Абдрахимов, В. З. Химическая технология керамического кирпича с использованием техногенного сырья : учебное пособие рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ по образованию в области строительства в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимов. — Самара, СГАСУ, 2007. — 432 с.
10. Петров, В. П. Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения : материалы восьмых академических чтений РААСН. СГАСУ / В. П. Петров, Б. А. Максимов. — Самара, 2004. — С. 407—410.
11. Абдрахимов, В. З. Исследование железосодержащего традиционного природного и техногенного сырья на спекание керамических материалов. Влияние ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  на образование низкотемпературного муллита / В. З. Абдрахимов. — Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. — 427 с.
12. Вдовина, Е. В. Исследование методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии черной сердцевины при обжиге бейделлитовой легкоплавкой глины / Е. В. Вдовина, В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 5. — С. 26—32.
13. Вдовина, Е. В. Определение черной сердцевины при обжиге кирпича из бейделлитовой глины и продукта сгорания базальтовой шихты / Е. В. Вдовина, Е. С. Абдрахимов, В. З. Абдрахимов // Башкирский химический журнал. — 2007. — Т. 14, № 2. — С. 102—104.

14. **Абдрахимов, В. З.** Образование черной сердцевины при скоростном обжиге плиток для полов / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Стекло и керамика. — 1999. — № 8. — С. 30—32.

15. **Абдрахимов, В. З.** Образование черной сердцевины при скоростном обжиге керамических материалов / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова // Строительные материалы, оборудование XXI века. — 2006. — № 2. — С. 64, 65.

16. **Сайбулатов, С. Ж.** Золокерамические стеновые материалы / С. Ж. Сайбулатов, С. Т. Сулейменов, А. В. Ралко. — Алма-Ата : Наука, 1982. — С. 292.

17. **Сулейменов, С. Т.** Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах и минеральных отходах промышленности / С. Т. Сулейменов. — М. : Моноскрип, 1996. — С. 298.

18. **Абдрахимов, В. З.** Керамические строительные материалы / В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, Д. Ю. Денисов. — Самара : Самарская академия государственного и муниципального управления, 2010. — 364 с.

19. **Абдрахимов, В. З.** Роль оксида железа в формировании структуры керамических материалов / В. З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 2. — С. 31—37.

20. **Абдрахимов, В. З.** Исследование фазового состава теплоизоляционного материала на основе твердых солевых отходов и жидкого стекла / В. З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 11/12. — С. 33—38. ■

Получено 27.11.11

© В. З. Абдрахимов, Е. С. Абдрахимова, 2013 г.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО PROMAT GMBH  
ДЕПАРТАМЕНТ «ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ»  
РОССИЯ, 115477, МОСКВА, УЛ. КАНТЕМИРОВСКАЯ, 58  
ТЕЛЕФОН: + 7 495 231 2798, ФАКС: + 7 495 231 7977  
ИНТЕРНЕТ: WWW.PROMAT.RU, E-MAIL: HPI@PROMAT.RU

**Promat**  
High Performance Insulation

## ПROMALIGHT® НАНОПОРИСТЫЕ ПЛИТЫ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАЛЕРАЗЛИВНЫХ КОВШЕЙ



- Снижение температуры оболочки на 45 °С
- Снижение температуры поступающего расплава на 13 °С
- Снижение скорости остывания с 0,71 до 0,63 °С/мин
- Увеличение стойкости арматурного слоя
- Уменьшение времени на ремонты
- Увеличение объема стальной ковша на 5 %

## ЭЛЕКТРОПЛАВЛЕННЫЕ AZS-ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Изложены параметры технической эффективности современных стекловаренных печей для производства тарного стекла. Приведена структура огнеупорных и теплоизоляционных материалов, используемых в кладке стекловаренных печей. Сформулированы требования к качеству электроплавленных алюмоциркониевосиликатных (AZS) огнеупоров для высокопроизводительных стекловаренных печей. Приведена рациональная структура AZS-огнеупоров для кладки горячей зоны футеровки стекловаренной печи производительностью 280 т/сут.

**Ключевые слова:** стекловаренные печи, бадделеитокорундовые огнеупоры, удельный съем стекломассы.

Современные отечественные регенеративные стекловаренные печи, предназначенные для варки тарного стекла, характеризуются высоким уровнем энергоэффективности и удельной производительности. Затраты теплоты на варку не превышают 4800 кДж/кг сваренной стекломассы, а выработка стекла за кампанию печи достигает 5000 т/м<sup>2</sup> площади варочного бассейна. Последний показатель обеспечивается при удельном съеме стекломассы 2,3 т/(м<sup>2</sup>·сут) и кампании печей до 6 лет. Благодаря высокотемпературному подогреву воздуха, предназначенному для сжигания топлива (до 1300 °С), и низким потерям теплоты в окружающую среду (не более 10 %) КПД печей достигает 45–50 %. В то же время суммарная выработка стекла на лучших зарубежных печах составляет 8000 т/м<sup>2</sup>, что соответствует удельному съему стекломассы не менее 2,7 т/(м<sup>2</sup>·сут) и кампании печей 8 лет. При этом удельный расход теплоты на стекловарение не превышает 4500 кДж/кг, а КПД печей достигает 60 % [1].

Одним из важнейших условий создания стекловаренных печей с мировым уровнем технической эффективности является применение высококачественных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. В футеровке варочной части печи, выработочного канала и регенератора используется широкая гамма изделий (табл. 1). Среди них наиболее дорогостоящими являются электроплавленные бадделеитокорундовые огнеупоры, материальная доля которых не превышает 15 %, а стоимость составляет около 40 % от общих затрат на огнеупорные и теплоизоляционные материалы.

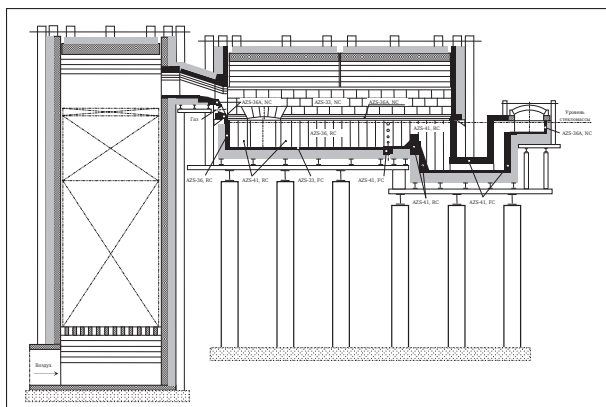
Электроплавленные AZS-огнеупоры применяются для горячей зоны футеровки конструк-

тивных элементов печей, контактирующих с расплавом стекла и высокотемпературными (~1600 °С) продуктами горения топлива и дегазации шихты (см. рисунок). Следует отметить, что кампания стекловаренных печей лимитируется износом бадделеитокорундовых изделий.

При выборе AZS-огнеупоров для элементов горячей зоны футеровки основное внимание уделяется их коррозионной стойкости и склонности к образованию пороков, нерастворимых в расплаве стекла. Коррозионная стойкость электроплавленных AZS-огнеупоров в основном зависит от содержания в них диоксида цир-

Таблица 1. Структура материалов для кладки стекловаренной печи производительностью 280 т/сут

| Изделия                              | Количество, т | Доля, % |
|--------------------------------------|---------------|---------|
| <i>Огнеупорные</i>                   |               |         |
| Динасовые                            | 109,0         | 4,45    |
| Шамотные                             | 448,9         | 18,31   |
| Муллитовые                           | 223,1         | 9,10    |
| Периклазовые                         | 1020,9        | 41,65   |
| Бадделеитокорундовые                 | 317,2         | 12,94   |
| Цирконовые                           | 30,2          | 1,23    |
| Керамические                         | 119,4         | 4,87    |
| Итого                                | 2268,7        | 92,55   |
| <i>Теплоизоляционные</i>             |               |         |
| Динасовые                            | 9,1           | —       |
| Шамотные                             | 79,8          | —       |
| Муллитокремнеземистые                | 39,9          | —       |
| Муллитокорундовые                    | 12,0          | —       |
| Пендиатомитовые                      | 39,5          | —       |
| Муллитокремнеземистые<br>волокнистые | 2,3           | —       |
| Итого                                | 182,6         | 7,45    |
| Всего                                | 2451,3        | 100     |



Продольный разрез стекловаренной печи с подковообразным пламенем: ■ — AZS-огнеупоры; ■ — прочие огнеупоры; ■ — теплоизоляция

кония (33, 36 и 41 %) и плотности. Плотность изделия определяется как содержанием  $ZrO_2$ , так и способом заливки расплава в форму. По расположению усадочной раковины изделия подразделяются на блоки с нормальной (NC), редуцированной (RC) усадочной раковины и без усадочной раковины (FC). Понятно, что наименьшую плотность имеют изделия AZS-33 типа NC (табл. 2), в которых пустоты (раковины) сконцентрированы со стороны отливки блока. Наибольшей плотностью характеризуются блоки AZS-41 типа FC. Следует отметить также, что их стоимость практически в 2 раза выше стоимости изделий AZS-33 типа NC. Несмотря на схожесть химического и минерального составов промышленных марок AZS-огнеупоров, их эксплуатационные свойства могут существенно различаться. Это связано с качеством сырьевых компонентов шихты, режимом ее плавления и особенностями технологического процесса изготовления огнеупоров [2].

Из всех примесей, содержащихся в бадделеитокорундовых изделиях, наиболее вредное влияние на коррозионную стойкость огнеупоров оказывает углерод. Присутствие углерода в плавных изделиях обусловлено применением сырья с примесями углеродсодержащих соединений, использованием графитовых электродов и восстановительным режимом плавления. Повышенное содержание углерода в расплаве (0,12—0,14 %) при восстановительной плавке увеличивает пористость изделий и, как следствие, уменьшает их стойкость к коррозионному воздействию стекломассы. По сравнению с окислительным режимом плавки на 100—150 °C снижается температура выделения стеклофазы и увеличивается склонность огнеупора к образованию пузырей при контакте с расплавом стекла. Снижение механической прочности изделий повышает в них количество трещин и посечек [3].

Таблица 2. Усредненные значения плотности электроплавных AZS-огнеупоров

| Огнеупор | Кажущаяся плотность, т/м <sup>3</sup> , огнеупора |      |      |
|----------|---------------------------------------------------|------|------|
|          | NC                                                | RC   | FC   |
| AZS-33   | 3,50                                              | —    | 3,70 |
| AZS-36   | 3,60                                              | 3,75 | 3,85 |
| AZS-36A* | 3,65                                              | —    | 3,90 |
| AZS-41   | 3,70                                              | 3,85 | 4,00 |

\* С пониженным содержанием стеклофазы (13—14 %).

Независимо от зоны применения (газовая среда или расплав стекла) на эксплуатационные характеристики AZS-изделий сильно влияет их уровень окисления. В варочном бассейне плохо или неравномерно окисленный огнеупор склонен к выделению пузырей, дестабилизирующих границу раздела трех фаз (газ — расплав — огнеупор). Ускоренная коррозия огнеупора в контактной зоне способствует увеличению выделения в стекломассу газообразных, стекловидных и кристаллических пороков. Снижение вязкости стеклофазы, а также высокое содержание примесей углерода, оксидов железа и титана усиливают последствия некачественного окисления огнеупора. В рабочем пространстве печи некачественно окисленный огнеупор склонен к повышенному выделению стеклофазы. Генерируемые продукты «выпотевания» стекают в стекломассу. Сложный химический состав этих продуктов затрудняет их растворение в расплаве, и они в виде пороков (высокоглиноземистая свиль, цирконовые камни и др.) остаются в стекле. Поэтому для кладки ответственных элементов рабочего пространства печи используют окисленные бадделеитокорундовые изделия с пониженным содержанием стеклофазы (13—14 %).

Состояние поверхности AZS-изделий также имеет самое непосредственное отношение к их коррозионной стойкости. Сквозные трещины и поверхностные дефекты (паутина, микротрещины, сколы, поверхностные царапины) являются очагами заведомо ускоренной коррозии. Серьезную опасность для службы огнеупоров представляют трещины, образующиеся в них при первичном разогреве печи. Благодаря капиллярным силам стекломасса проникает даже в волосные трещины, пограничные плоскости которых кажутся полностью совмещенными. Это способствует расширению трещин и в конечном счете полному растрескиванию бруса. Образование трещин при первичном нагреве неразрывно связано с остаточными внутренними напряжениями в изделии. Сам про-

Таблица 3. Структура AZS-огнеупоров для стекловаренной печи производительностью 280 т/сут

| Марка огнеупора | Количество, т, огнеупора типа |       |      | Итого |       |
|-----------------|-------------------------------|-------|------|-------|-------|
|                 | NC                            | RC    | FC   | т     | %     |
| AZS-33          | 97,4                          | —     | 52,6 | 150,0 | 47,29 |
| AZS-36          | —                             | 60,3  | 5,0  | 65,3  | 20,59 |
| AZS-36A         | 41,5                          | —     | —    | 41,5  | 13,08 |
| AZS-41          | —                             | 42,2  | 18,2 | 60,4  | 19,04 |
| Итого           | 138,9                         | 102,5 | 75,8 | 317,2 | 100   |

цесс изготовления плавлено-литых огнеупоров (литье — охлаждение) генерирует внутренние напряжения внутри застывшего и охлажденного блока. Минимизация поля внутренних напряжений — одна из важнейших задач в производстве бадделеитокорундовых изделий.

Неравномерный износ огнеупорной футеровки и зависимость стоимости AZS-изделий от их плотности и содержания диоксида циркония предопределяют дифференцированный подход к применению плавлено-литых бадделеитокорундовых огнеупоров в кладке печи. При этом учитываются условия эксплуатации печи, характеризующиеся удельным съемом стекломассы и плановым межремонтным периодом [2]. Основная цель рациональной схемы футеровки заключается в обоснованном снижении потребления дорогостоящих изделий AZS-41 типов RC и FC. Реализация этой цели становится возможной при наличии достаточной информации о полях температуры на ограждающих поверхностях кладки, а также о структуре и интенсивности конвекционных потоков в варочном бассейне. Результаты математического моделирования тепловой работы стекловаренной печи использованы автором статьи [4] при разработке проекта печи с удельным съемом стекломассы 2,55 т/(м<sup>2</sup>·сут), удельным расходом теплоты 4520 кДж/кг и плановой кампанией 8—9 лет.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что в структуре использованных в проекте AZS-огнеупоров доминируют изделия AZS-33 (47,29 %), большая часть которых приходится на блоки толщиной 200 мм типа NC, установленные в боковых стенах рабочего пространства печи. Изделия типа FC представлены донной плиткой толщиной 120 мм в варочном бассейне и толщиной 75 мм в выработочном канале (см. рисунок). Наиболее изнашиваемые элементы рабочего пространства (зуб подвесных боковых стен, опорные блоки влетов и горелочная структура воздушных каналов), а также боковые стены выработочного канала выполнены из изделий AZS-36A типа NC. В боковых стенах ванны в зоне варки (до порога) установлены блоки AZS-36 типа RC толщиной

250 и высотой 1400 мм. Периметр заглубленной части варочного бассейна (зона освещения) выполнен палисадами толщиной 250 и высотой 2200 мм из изделий AZS-41 типа RC. Этот материал использован для изготовления переливного порога и примыкающих к нему фасонных блоков. Барботажные блоки, проток и угловые бруссы загрузочных карманов, изготовленные из изделий AZS-41 типа FC, составляют 5,74 % от общего количества бадделеитокорундовых огнеупоров.

В заключение следует отметить, что оксидированные электроплавленные AZS-огнеупоры, характеризующиеся высокой огнеупорностью (~1700 °C) и коррозионной стойкостью к воздействию агрессивных сред, являются безальтернативным материалом для горячей зоны футеровки стекловаренных печей. Для снижения стоимости печных ограждений представляется целесообразным использование принципа рациональной схемы бадделеитокорундовых изделий в кладке печи. В интервале температур службы (1300—1600 °C) AZS-огнеупоры характеризуются высокой теплопроводностью — 5,2—7,7 Вт/(м·K). Для снижения тепловых потерь в окружающую среду наружная поверхность кладки требует установки эффективной теплоизоляции.

## Библиографический список

1. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009. — 340 с.
2. **Дзюзер, В. Я.** Огнеупоры для варочной части стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 5. — С. 24—32.
3. **Попов, О. Н.** Производство и применение плавнелитых огнеупоров / О. Н. Попов, П. Т. Рыбалкин, В. А. Соколов, С. Д. Иванов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.
4. **Дзюзер, В. Я.** Моделирование тепловой работы высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 9. — С. 23—27. ■

Получено 11.04.13  
© В. Я. Дзюзер, 2013 г.

Д. Т. Н. Ю. В. Красовицкий, К. Т. Н. Н. Н. Лобачёва

*ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,  
г. Воронеж, Россия*

УДК 621.928.9:666.76.001.8

## РАСЧЕТ ЗЕРНИСТЫХ ФИЛЬТРОВ-ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРОВ

Рассмотрены единые кинетические закономерности движения пылегазовых потоков через зернистые фильтровальные перегородки и предложены в размерах и обобщенных переменных расчетные зависимости для определения важнейшей эксплуатационной характеристики процесса — перепада давлений на фильтровальных перегородках. Такой подход позволяет оценить энергозатраты в различных эксплуатационных условиях, в частности при производстве огнеупорных изделий.

**Ключевые слова:** зернистые фильтры-пылеуловители, зернистые слои, экологические проблемы огнеупорного производства, математические модели фильтрования.

**Н**аиболее распространенный способ пылеулавливания — удаление частиц из пылегазового потока фильтрованием. Особенно эффективны в данном случае зернистые слои, прежде всего в экстремальных термодинамических условиях, когда применение других способов обеспыливания невозможно или недостаточно эффективно. Зернистые слои позволяют не только обеспечить предельно допустимые выбросы (ПДВ) в атмосферу, но и организовать в огнеупорном производстве утилизацию отходов. Зернистые слои отличаются относительной дешевизной и доступностью фильтровального материала, высокой степенью очистки, прочностью и термостойкостью в сочетании с хорошей проницаемостью, способностью противостоять резким изменениям давления, коррозионно- и окислительной средой, отсутствием электрокапиллярных явлений, возможностью регенерации различными способами, легкостью и разнообразием форм соединения отдельных фильтровальных элементов.

Возможности применения газоочистных аппаратов фильтрующего типа значительно расширяются в связи с внедрением новых пористых фильтров из синтетических, стеклянных и металлических волокон, пористых пластических масс, пористой металлокерамики и других зернистых материалов. Это предопределило вполне оправданный интерес к зернистым слоям при поиске эффективного способа обеспыливания отходящих газов и аспирационных выбросов в производстве огнеупоров. Различают следующие типы зернистых слоев:

— неподвижные, свободно насыпанные или уложенные определенным образом гранулированные материалы;

— периодически или непрерывно перемещающиеся зернистые материалы;

— зернистые материалы со связанной структурой слоя (спеченные или спрессованные порошки металлов, стекла, углеграфитовых материалов, пористая керамика, пластмасса и др.), неподвижные или работающие в центробежном слое;

— псевдооживленные гранулы или порошки.

Зернистым слоям различных типов свойственны единые гидродинамические и кинетические закономерности разделения гетерогенных систем с твердой дисперсной фазой, что обеспечивает общую методику анализа, изучения и прогнозирования эффективности таких фильтровальных слоев. Если фильтры с насыпным слоем используют не только для улавливания пыли, но и для химической очистки газов, на фильтровальные перегородки наносят слой сорбента, а насыпной слой выполняют из материалов.

До настоящего времени еще не разработаны достаточно полные теоретические положения, на основе которых можно с высокой точностью оценить влияние основных параметров на процесс фильтрования. Трудность создания теории фильтрования применительно к промышленным аппаратам обуславливается тем, что процесс протекает не только в порах фильтровального материала, но и в значительной степени в слое пыли, толщина и пористость которой непрерывно изменяются. Поэтому при анализе гидродинамики процесса фильтрова-

ния обычно используют идеализированные модели реальных зернистых слоев.

Внутренняя структура зернистых слоев отличается искривленными продольными или поперечными каналами с переменной и нерегулярной площадью и формой поперечного сечения, изменением размеров пор в широком диапазоне, одновременным существованием различных режимов течения и механизмов осаждения в соседних каналах, высокой относительной шероховатостью поверхности зерен, облитерацией, термо- и электрофорезом, адгезией и когезией при течении реальных гетерогенных сред. Эти особенности не позволяют использовать дифференциальные уравнения Навье — Стокса при исследовании гидродинамических особенностей обеспыливания газов зернистыми слоями, поскольку для их решения требуется широкая информация об истинной структуре зернистого слоя. Такая информация возможна лишь с помощью вероятностных характеристик. Поэтому в указанных исследованиях обычно используют гипотетические структуры, позволяющие создавать адекватные математические модели процесса. Таким образом, применение зернистых фильтров, безусловно, перспективно. Однако требуется тщательный анализ кинетики процесса для получения надежных расчетных

зависимостей. При этом практический интерес представляет кинетика следующих процессов: с отложением осадка на поверхности слоя, с постепенным закупориванием пор слоя, с отложением осадка на поверхности вращающегося слоя.

При улавливании полидисперсных пылей зернистыми слоями образующийся слой осадка не задерживает наиболее тонкие фракции, проскок пыли  $K$  меняется с течением времени  $\tau$ , т. е.  $K = f(\tau)$ , и поэтому

$$dK / d\tau \neq 0. \quad (1)$$

Определение перепада давлений в осадке  $\Delta p_{ос}$ , выполненное по традиционным формулам без учета соотношения (1), ведет к существенной ошибке.

Используем основное дифференциальное уравнение процесса фильтрования вида

$$-dv / Fd\tau = \frac{\Delta p}{R}, \quad (2)$$

где  $-dv/Fd\tau$  — скорость движения пылегазового потока через слой;  $\Delta p$  — движущая сила (перепад давления);  $R$  — сопротивление фильтровальной перегородки и осадка.

Математические преобразования уравнения (2) с учетом зависимости (1), учитывающие физико-химические параметры пыле-

Таблица 1. Математические модели фильтрования в размерных переменных

| Процесс фильтрования                                                                              | Математическая модель*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Примечание                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Отложение осадка на цилиндрическом слое [3]                                                       | $\Delta P_{общ.ц} = r_{п.н} R_{п.н} w \ln \frac{R_{п.н}}{R_{п.в}} + \frac{1}{2} r_{ос} R_{п.н} w \ln \left( \frac{2w x_n \tau}{R_{п.н}} + 1 \right)$ $\Delta P_{общ.ц} = r_{п.н} R_{п.н} w \ln \frac{R_{п.н}}{R_{п.в}} + \left[ \frac{1}{2} r_{ос} (1-s) R_{п.н} w \ln \left( \frac{2w x_n \tau}{R_{п.н}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{1-s}}$               | $K = K_n \exp(-m\tau)$ ,<br>$s = 0$ ,<br>$0 < s < 1$ |
| Отложение сжимаемого осадка на плоском слое [6]                                                   | $\Delta P_{общ.ц} = \mu r_{п.н} h_n w + [\mu r_{ос} (1-s) h_{ос}^2 / x_n \tau]^{\frac{1}{1-s}}$                                                                                                                                                                                                                                                              | $0 < s < 1$                                          |
| С постепенным закупориванием зернистого слоя [5]                                                  | $\Delta P_{общ.ц} = \left\{ \Delta p_n^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{x_n}{\pi l} \right) \cdot \left( \frac{wB}{N_n} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \tau - \left( \frac{K_n}{m} \right) (1 - e^{-m\tau}) \right] \right\}^{-2}$                                                                                                                                 |                                                      |
| С отложением осадка на поверхности зернистого вращающегося цилиндрического слоя при $K_n = 0$ [1] | $\Delta p_{ос.дин} = \Delta p_{ос.ст} - \Delta p_{ос.ц};$ $\Delta p_{ос.ц} = \frac{\pi^2 n^2 \rho_{ос} R_{п.н} g}{900 g} \frac{x_n w}{\left[ \left( \frac{2x_n w}{R_{п.н} \tau} + \frac{1}{\tau} \right) R_{п.н} \right]} \cdot \left[ 2R_{п.н} + \frac{2x_n w}{\left[ \left( \frac{2x_n w}{R_{п.н} \tau} + \frac{1}{\tau} \right) R_{п.н} \right]} \right]$ | При $K_n = 0$ ,<br>$s = 0$                           |

\*  $R_{п.н}$ ,  $R_{п.в}$  — наружный и внутренний радиусы фильтровальной перегородки;  $r_{п}$  и  $R_{ос}$  — удельные сопротивления фильтровальной перегородки и осадка;  $w$  — скорость фильтрования;  $x_n$  — объемная концентрация дисперсной фазы в пылегазовом потоке перед фильтром;  $s$  — показатель сжимаемости осадка;  $\tau$  — длительность фильтрования;  $\mu$  — динамическая вязкость газа;  $N_n$  и  $l$  — число и длина одинаковых капилляров в 1 м<sup>2</sup> поверхности зернистого слоя (модель Гагена — Пуазейля);  $B = \pi/8\mu l$ ;  $m$  — коэффициент пропорциональности;  $\Delta P_{ос.дин.}$ ,  $\Delta P_{ос.ст.}$ ,  $\Delta P_{ос.ц.}$  — перепады давлений на вращающемся зернистом слое;  $n$  — частота вращения;  $\rho_{ос}$  — плотность осадка пыли.

Таблица 2. Расчетные зависимости процессов фильтрации в обобщенных переменных

| Процесс<br>фильтрации                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Расчетная<br>зависимость*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Примечание                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Отложение сжимаемого осадка<br>на цилиндрическом слое                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $Eu_{\text{ц}} = \frac{\pi_r}{\Gamma \cdot Re_m} \left\{ \frac{\pi_1}{\pi_2} + [\ln(Ho_m + 1) / Ho_m]^{1-5} \right\},$ $\text{где } Eu_{\text{ц}} = \Delta P_{\text{обш.ц}} / \rho \omega^2; \quad Ho_m = 2w\chi_n \tau / R_{\text{п.н}}; \quad Re_m = \frac{wd_3 \rho}{\mu};$ $\Gamma = h_n / d_3; \quad \pi_1 = r_{\text{п}} h_n^2; \quad \pi_2 = [r_0' (1-s) \mu^s w^{1+s} h^{1-s} \chi_n \tau]^{1-s}$                                             | $K = K_n \exp(-m\tau)$ $0 < s < 1$ |
| Отложение сжимаемого осадка<br>на плоском зернистом слое                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $Eu_{\text{пл}} = (\pi_2 / Re_m \cdot \Gamma) \cdot (\pi_1 / \pi_2 + 1)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                    |
| Постепенное закупоривание<br>пор зернистого слоя                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $(1 / Eu)^{1/2} = (1 / Eu_{\text{н}})^{1/2} - C \cdot Re_m^{1/2} (Ho + \pi_1),$ $\text{где } Eu = \Delta P / \rho w^2; \quad C = \frac{\chi_{\text{п}}}{\pi l} (B \mu d_3 / N_{\text{п}})^{1/2};$ $B = \pi / 8 \mu l; \quad Ho = w \tau / d_3; \quad \pi_1 = w K_n [1 - \exp(-m\tau)] / d_3 m$                                                                                                                                                        | $s = 0$                            |
| Отложение несжимаемого<br>осадка на зернистом вращаю-<br>щемся слое [6]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | $Eu_{\text{ос.дин}} = \pi_2' / Re_m \Gamma [\ln(2Ho_m')]^{1-s} - \frac{1}{2} C \Phi_{\text{ц}} Ho_m',$ $\text{где } \pi_2' = \left[ \frac{1}{2} r_0' (1-s) \mu^s w^s h_n^{1-s} \right]^{1-s}; \quad Ho_m' = w \chi_m' \tau / R_{\text{п.н}};$ $\Gamma' = h_{\text{п}} / d_3; \quad C' = 2R_{\text{п.н}} g \rho_{\text{ос}} / w^2 \rho_r; \quad \Phi_{\text{ц}} = R_{\text{п.н}} n^2 / 900;$ $Eu_{\text{ос.дин}} = \Delta P_{\text{дин}} / \rho_r w^2$ | $0 < s < 1$ $K_n = 0$              |
| * $Eu_{\text{ц}}$ , $Eu_{\text{пл}}$ , $Eu$ , $Eu_{\text{ос.дин}}$ — числа Эйлера на цилиндрическом слое, на плоскости, общее при закупоривании пор, начальное и на вращающемся слое соответственно; $Ho$ , $Ho_m$ , $Ho_m'$ — числа гомотоксичности для соответствующих процессов; $Re_m$ — число Рейнольдса; $\Gamma$ , $\Gamma'$ , $\pi_1$ , $\pi_1'$ , $\pi_2'$ , $B$ , $C$ , $C'$ — безразмерные константы, характеризующие различные виды процесса фильтрации газобразных гетерогенных систем с твердой дисперсной фазой. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                    |

газового потока и осадка, геометрическую форму фильтровальной перегородки, специфику эксплуатационных требований огнеупорного производства, позволили получить удобные и апробированные экспериментально расчетные модели в размерных и безразмерных параметрах, как это представлено в табл. 1 и 2.

Применение зернистых фильтров перспективно для обеспыливания газов при температурах, чрезмерно высоких для других систем тонкого пылеулавливания. Кроме того, экономически выгодно обеспыливание газов при использовании шихтовых материалов в качестве слоя. Это позволяет эффективно улавливать слипающиеся, высокоомные или абразивные пыли из влажных газов, т. е. в тех случаях, когда применение других способов обеспыливания нецелесообразно.

В РФ зернистые фильтры применяют при обеспыливании высокотемпературных газов в цементной промышленности, при получении редких и драгоценных металлов. Кроме фильтрации, гранулы могут выполнять функции теплоносителя и сорбента либо катализатора

при сочетании фильтрации с адсорбционным или каталитическим процессом.

В развитых странах зернистые фильтры благодаря непрерывному совершенствованию способов регенерации все шире используют на огнеупорных, известковых, гипсовых заводах, химических предприятиях, в электронном приборостроении, радиотехнике, атомной энергетике и т. д. Конструктивно эти аппараты просты, имеют низкие эксплуатационные расходы, надежны в работе и обеспечивают достаточно высокую степень очистки газов. Наиболее перспективны фильтры с импульсной продувкой без применения механических устройств регенерации. В зависимости от вида пылей и режима работы лучшие зернистые фильтры — 95—99,5 % при скорости фильтрации 1,5—15 м/мин и перепаде давлений 1300—3000 Па.

Для дальнейшего успешного применения зернистых фильтров необходимы обобщение опыта их эксплуатации в различных отраслях промышленности, объективная оценка их долговечности и надежности, разработка новых способов экспресс-анализа для оценки и прогнозирования эффективности зернистых слоев,

унификация отдельных узлов и деталей, серийное изготовление модулей для компоновки блоков любой производительности.

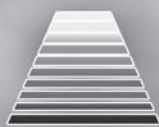
### Библиографический список

1. **Красовицкий, Ю. В.** Обеспыливание промышленных газов в фаянсовом производстве / Ю. В. Красовицкий, А. В. Малинов, В. В. Дуров. — М. : Химия, 1994. — 272 с.
2. **Красовицкий, Ю. В.** Обеспыливание газов зернистыми фильтрами / Ю. В. Красовицкий, В. В. Дуров. — М. : Химия, 1991. — 192 с.
3. **Красовицкий Ю. В.** Разделение газовых гетерогенных систем с твердой дисперсной фазой зернистыми фильтрами : дис. ... д-ра техн. наук. — М., МИХМ, 1987. — 484 с.
4. **Красовицкий, Ю. В.** Обеспыливание промышленных газов в огнеупорном производстве / Ю. В. Красовицкий, П. Б. Балтренас, В. И. Энтин [и др.]. — Вильнюс : Техника, 1996. — 364 с.
5. **Идельчик, И. Е.** Аэродинамика контактных, фильтрующих и адсорбционных аппаратов со стационарным слоем зернистых материалов / И. Е. Идельчик. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1982. — 40 с.
6. **Панов, С. Ю.** Совершенствование процессов энергосберегающей регенерации фильтровальных перегородок в системах промышленного пылеулавливания : дис. ... д-ра техн. наук. — Иваново, 2011. — 404 с.
7. **Анжеуров, Н. М.** Аэродинамика фильтров со стационарным зернистым слоем / Н. М. Анжеуров, В. Ф. Бабкин, Е. В. Архангельская, Ю. В. Красовицкий // Краткое содержание докладов аспирантов и соискателей по проблемам архитектуры и строительных наук : материалы 48—49-й науч.-техн. конф. ВГАСА. — Воронеж, 1995. — С. 38—42. ■

Получено 05.04.13

© Ю. В. Красовицкий, Н. Н. Лобачёва, 2013 г.

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



# ТЕРМООБРАБОТКА

Седьмая международная специализированная выставка

Единственная в России  
выставка термического  
оборудования и технологий

## 10 - 12 сентября 2013

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 5

## 11 сентября

Международная конференция  
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ТЕРМООБРАБОТКИ»

**Разделы выставки:**

- ▶ Промышленные печи: муфельные, вакуумные, плавильные, шахтные, камерные, электропечи
- ▶ Индукционный нагрев: ТВЧ продукция, индукционные печи
- ▶ Оборудование для химико-термической обработки: азотирования, цементации и т.д.
- ▶ Закалочное оборудование, масла и среды
- ▶ Лабораторные печи, сушильные шкафы

- ▶ Оснастка для термического оборудования
- ▶ Размерная и поверхностная обработка: формообразование, напыление
- ▶ Автоматизация термообработки, системы управления, контроль качества, теплотехнические измерения
- ▶ Энергосберегающие технологии термических производств

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ - Специальный раздел в рамках выставки**

|                 |                  |                     |                    |                  |
|-----------------|------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| ▶ Магнезиальные | ▶ Циркониевые    | ▶ Корундографитовые | ▶ Алумосиликатные  | ▶ Бескислородные |
| ▶ Корундовые    | ▶ Кремнезёмистые | ▶ Окисные           | ▶ Карбидкремниевые |                  |

**Информационная поддержка:**


























Организатор: **ООО «Выставочная компания «Мир-Экспо»** | Россия, 115533, Москва, проспект Андропова, 22

Тел./факс: 8 499 618 05 65, 8 499 618 36 83 | [info@htexporus.ru](mailto:info@htexporus.ru) | [www.htexporus.ru](http://www.htexporus.ru)

**Статистика**
**ПРОИЗВОДСТВО ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В РОССИИ В 2012 г. И ДЕКАБРЕ 2012 г.**

| Продукция                                                                                      | 2012 г. | В % к 2011 г. | Декабрь 2012 г. | В % к           |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|
|                                                                                                |         |               |                 | декабрю 2011 г. | ноябрю 2012 г. |
| Чугун, млн т                                                                                   | 50,5    | 105,2         | 4,1             | 2011 г.         | ноябрю         |
| Ферросилиций, тыс. т                                                                           | 1043    | 101,2         | 86,7            | 2012 г.         | 102,6          |
| Феррохром низкоуглеродистый, тыс. т                                                            | 217     | 95,2          | 19,6            |                 | 117,2          |
| Сталь, млн т                                                                                   | 70,4    | 103,3         | 5,6             | 95,4            | 100,8          |
| Трубы стальные, тыс. т                                                                         | 9657    | 96,7          | 862             | 119,5           | 108,8          |
| Из общего количества стальных труб, тыс. т:                                                    |         |               |                 |                 |                |
| бурильные для бурения нефтяных или газовых скважин из черных металлов (кроме литейного чугуна) | 37,8    | 107,6         | 2,5             | 122,8           | 110,6          |
| обсадные                                                                                       | 828     | 113,2         | 68,9            | 94,3            | 101,1          |
| насосно-компрессорные                                                                          | 443     | 111,6         | 39,9            | 124,9           | 103,0          |
| Проволока из железа или нелегированной стали, тыс. т                                           | 1342    | 110,9         | 97,2            | 104,9           | 89,1           |
| Проволока из нержавеющей стали и прочих легированных сталей, тыс. т                            | 310     | 99,1          | 23,4            | 90,3            | 93,6           |
| Алюминий первичный, тыс. т                                                                     |         | 98,3          |                 | 93,7            | 102,0          |
| Сплавы на основе первичного алюминия, тыс. т                                                   |         | 113,9         |                 | 116,9           | 107,3          |
| Оксид алюминия (глинозем), кроме искусственного корунда, тыс. т                                |         | 98,0          |                 | 97,8            | 102,2          |

По данным Федеральной службы государственной статистики РФ

**ПРОИЗВОДСТВО ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ПРОЧИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ В РОССИИ В 2012 г. И В ДЕКАБРЕ 2012 г.**

| Продукция                                                                                                                                                 | 2012 г. | В % к 2011 г. | Декабрь 2012 г. | В % к           |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|
|                                                                                                                                                           |         |               |                 | декабрю 2011 г. | ноябрю 2012 г. |
| Кирпичи, блоки, плитки и прочие огнеупорные изделия из кремнеземистой каменной муки или диатомитовых земель, тыс. т                                       | 55,6    | 78,1          | 4,9             | 102,1           | 122,5          |
| Кирпичи, блоки, плитки и прочие огнеупорные изделия, кроме изделий из кремнеземистой каменной муки или диатомитовых земель, тыс. т                        | 1271    | 95,6          | 94,4            | 89,3            | 94,2           |
| Неформованные огнеупоры, в том числе цементы, строительные растворы, огнеупорные бетоны и аналогичные составы, не включенные в другие группировки, тыс. т | 1154    | 80,6          | 94,1            | 79,9            | 106,6          |
| Огнеупорные безобжиговые изделия и прочие, не включенные в другие группировки, тыс. т                                                                     | 247     | 116,0         | 19,6            | 101,6           | 110,1          |
| Расслоенный вермикулит; вспученные глины; вспененный шлак (шлаковая пемза) и аналогичные минеральные вспученные материалы, тыс. м <sup>3</sup>            | 4458    | 114,3         | 263             | 83,1            | 78,3           |

По данным Федеральной службы государственной статистики РФ

## МИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА В ДЕКАБРЕ 2012 г., В 2011 И 2012 гг.

| Страна, регион                     | Декабрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Ноябрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Декабрь<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>декабрь<br>2012 г./<br>декабрь<br>2011 г., % | 12 мес<br>2012 г.,<br>тыс. т | 12 мес<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>12 мес<br>2012 г./<br>12 мес<br>2011 г., % |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Австрия                            | 459                           | 479                          | 363                           | 26,4                                                      | 5751                         | 5815                         | —1,1                                                    |
| Бельгия                            | 382                           | 359                          | 331                           | 15,4                                                      | 4073                         | 4725                         | —13,8                                                   |
| Чехия                              | 330                           | 286                          | 348                           | —5,2                                                      | 3936                         | 4137                         | —4,9                                                    |
| Финляндия и Швеция                 | 408                           | 412                          | 460                           | —11,3                                                     | 5267                         | 5840                         | —9,8                                                    |
| Франция                            | 682                           | 747                          | 744                           | —8,3                                                      | 9532                         | 9698                         | —1,7                                                    |
| Германия                           | 1825                          | 2200                         | 1820                          | 0,3                                                       | 26753                        | 27795                        | —3,7                                                    |
| Венгрия                            | 90                            | 95                           | 111                           | —18,9                                                     | 1229                         | 1315                         | —6,5                                                    |
| Италия                             | 577                           | 713                          | 873                           | —33,9                                                     | 9417                         | 9824                         | —4,1                                                    |
| Нидерланды                         | 500                           | 480                          | 516                           | —3,1                                                      | 5909                         | 5943                         | —0,6                                                    |
| Польша                             | 283                           | 247                          | 355                           | —20,3                                                     | 3952                         | 3975                         | —0,6                                                    |
| Румыния                            | 135                           | 140                          | 140                           | —3,6                                                      | 1580                         | 1555                         | 1,6                                                     |
| Словакия                           | 251                           | 238                          | 230                           | 9,1                                                       | 3520                         | 3346                         | 5,2                                                     |
| Испания                            | 184                           | 165                          | 197                           | —6,6                                                      | 3080                         | 3540                         | —13,0                                                   |
| Великобритания                     | 684                           | 655                          | 495                           | 38,2                                                      | 7252                         | 6625                         | 9,5                                                     |
| <b>ЕС (27 стран), всего</b>        | <b>6790</b>                   | <b>7216</b>                  | <b>6984</b>                   | <b>—2,8</b>                                               | <b>91251</b>                 | <b>94134</b>                 | <b>—3,1</b>                                             |
| Босния и Герцеговина               | 70                            | 61                           | 66                            | 6,1                                                       | 750                          | 685                          | 9,5                                                     |
| Сербия                             | 0                             | 0                            | 66                            | —100,0                                                    | 312                          | 1226                         | —74,6                                                   |
| Турция                             | 794                           | 776                          | 722                           | 10,0                                                      | 8613                         | 8173                         | 5,4                                                     |
| <b>Прочие страны Европы, всего</b> | <b>864</b>                    | <b>837</b>                   | <b>854</b>                    | <b>1,2</b>                                                | <b>9674</b>                  | <b>10083</b>                 | <b>—4,1</b>                                             |
| Казахстан                          | 200                           | 260                          | 220                           | —9,1                                                      | 2806                         | 3190                         | —12,0                                                   |
| Россия                             | 4150                          | 4120                         | 4171                          | —0,5                                                      | 50489                        | 47992                        | 5,2                                                     |
| Украина                            | 2330                          | 2435                         | 2374                          | —1,9                                                      | 28488                        | 28867                        | —1,3                                                    |
| <b>СНГ, всего</b>                  | <b>6673</b>                   | <b>6783</b>                  | <b>6749</b>                   | <b>—1,1</b>                                               | <b>81815</b>                 | <b>80177</b>                 | <b>2,0</b>                                              |
| Канада                             | 640                           | 630                          | 690                           | —7,2                                                      | 7650                         | 7520                         | 1,7                                                     |
| Мексика                            | 580                           | 400                          | 420                           | 38,1                                                      | 4761                         | 4725                         | 0,8                                                     |
| США                                | 2600                          | 2260                         | 2850                          | —8,8                                                      | 32113                        | 30233                        | 6,2                                                     |
| <b>Северная Америка, всего</b>     | <b>3820</b>                   | <b>3290</b>                  | <b>3960</b>                   | <b>—3,5</b>                                               | <b>44523</b>                 | <b>42478</b>                 | <b>4,8</b>                                              |
| Аргентина                          | 111                           | 116                          | 230                           | —51,7                                                     | 2076                         | 2795                         | —25,7                                                   |
| Бразилия                           | 2304                          | 2180                         | 2717                          | —15,2                                                     | 27045                        | 33243                        | —18,6                                                   |
| Чили                               | 78                            | 100                          | 95                            | —17,9                                                     | 1065                         | 1130                         | —5,8                                                    |
| Колумбия                           | 33                            | 15                           | 25                            | 32,0                                                      | 345                          | 295                          | 16,9                                                    |
| Парагвай                           | 8                             | 7                            | 4                             | 100,0                                                     | 68                           | 45                           | 51,1                                                    |
| <b>Страны Южной Америки, всего</b> | <b>2534</b>                   | <b>2418</b>                  | <b>3071</b>                   | <b>—17,5</b>                                              | <b>30599</b>                 | <b>37508</b>                 | <b>—18,4</b>                                            |
| ЮАР                                | 440                           | 420                          | 420                           | 4,8                                                       | 4853                         | 4765                         | 1,8                                                     |
| Иран                               | 127                           | 133                          | 225                           | —43,6                                                     | 2143                         | 2520                         | —15,0                                                   |
| Китай                              | 50893                         | 51409                        | 48009                         | 6,0                                                       | 654269                       | 629693                       | 3,9                                                     |
| Индия                              | 3530                          | 3420                         | 3370                          | 4,7                                                       | 42258                        | 38900                        | 8,6                                                     |
| Япония                             | 6698                          | 6564                         | 6417                          | 4,4                                                       | 81405                        | 81028                        | 0,5                                                     |
| Южная Корея                        | 3505                          | 3321                         | 3558                          | —1,5                                                      | 41718                        | 42218                        | —1,2                                                    |
| Тайвань                            | 1020                          | 920                          | 1065                          | —4,2                                                      | 11784                        | 12940                        | —8,9                                                    |
| <b>Страны Азии, всего</b>          | <b>65646</b>                  | <b>65634</b>                 | <b>62420</b>                  | <b>5,2</b>                                                | <b>831434</b>                | <b>804780</b>                | <b>3,3</b>                                              |
| Австралия                          | 295                           | 278                          | 325                           | —9,2                                                      | 3710                         | 5265                         | —29,5                                                   |
| Новая Зеландия                     | 62                            | 47                           | 64                            | —3,1                                                      | 670                          | 659                          | 1,7                                                     |
| <b>Австралия и Океания, всего</b>  | <b>358</b>                    | <b>324</b>                   | <b>388</b>                    | <b>—7,7</b>                                               | <b>4380</b>                  | <b>5925</b>                  | <b>—26,1</b>                                            |
| <b>МИР, всего*</b>                 | <b>87251</b>                  | <b>87055</b>                 | <b>85102</b>                  | <b>2,5</b>                                                | <b>1100674</b>               | <b>1082729</b>               | <b>1,7</b>                                              |

\* Итог приведен по 38 странам, на которые приходится около 99 % мирового производства чугуна.

По материалам WSA

## МИРОВАЯ ВЫПЛАВКА СТАЛИ В ДЕКАБРЕ 2012 г., В 2011 И 2012 гг.

| Страна, регион                     | Декабрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Ноябрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Декабрь<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>декабрь<br>2012 г./<br>декабрь<br>2011 г., % | 12 мес<br>2012 г.,<br>тыс. т | 12 мес<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>12 мес<br>2012 г./<br>12 мес<br>2011 г., % |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Австрия                            | 575                           | 616                          | 457                           | 26,0                                                      | 7421                         | 7474                         | —0,7                                                    |
| Бельгия                            | 630                           | 560                          | 481                           | 30,9                                                      | 7385                         | 8026                         | —8,0                                                    |
| Болгария                           | 40                            | 55                           | 64                            | —37,4                                                     | 632                          | 835                          | —24,3                                                   |
| Чехия                              | 396                           | 350                          | 459                           | —13,6                                                     | 5072                         | 5583                         | —9,2                                                    |
| Финляндия                          | 290                           | 293                          | 322                           | —9,7                                                      | 3759                         | 3989                         | —5,8                                                    |
| Франция                            | 972                           | 1272                         | 1111                          | —12,5                                                     | 15607                        | 15784                        | —1,1                                                    |
| Германия                           | 3064                          | 3446                         | 3022                          | 1,4                                                       | 42661                        | 44284                        | —3,7                                                    |
| Греция                             | 75                            | 100                          | 101                           | —25,7                                                     | 1255                         | 1934                         | —35,1                                                   |
| Венгрия                            | 108                           | 117                          | 141                           | —23,3                                                     | 1543                         | 1746                         | —11,6                                                   |
| Италия                             | 1699                          | 2238                         | 2030                          | —16,3                                                     | 27227                        | 28735                        | —5,2                                                    |
| Люксембург                         | 170                           | 200                          | 123                           | 37,8                                                      | 2230                         | 2521                         | —11,6                                                   |
| Нидерланды                         | 580                           | 560                          | 588                           | —1,3                                                      | 6870                         | 6937                         | —1,0                                                    |
| Польша                             | 549                           | 570                          | 748                           | —26,6                                                     | 8366                         | 8779                         | —4,7                                                    |
| Румыния                            | 320                           | 310                          | 311                           | 2,9                                                       | 3780                         | 3835                         | —1,4                                                    |
| Словакия                           | 302                           | 309                          | 279                           | 8,2                                                       | 4403                         | 4236                         | 3,9                                                     |
| Словения                           | 25                            | 55                           | 34                            | —25,2                                                     | 632                          | 648                          | —2,4                                                    |
| Испания                            | 806                           | 1049                         | 818                           | —1,5                                                      | 13628                        | 15504                        | —12,1                                                   |
| Швеция                             | 314                           | 344                          | 374                           | —16,2                                                     | 4326                         | 4867                         | —11,1                                                   |
| Великобритания                     | 824                           | 818                          | 667                           | 23,6                                                      | 9756                         | 9478                         | 2,9                                                     |
| Прочие страны ЕС (27 стран)        | 235                           | 248                          | 165                           | 42,3                                                      | 2815                         | 2439                         | 15,4                                                    |
| <b>ЕС (27 стран), всего</b>        | <b>11975</b>                  | <b>13510</b>                 | <b>12294</b>                  | <b>—2,6</b>                                               | <b>169367</b>                | <b>177634</b>                | <b>—4,7</b>                                             |
| Босния и Герцеговина               | 65                            | 57                           | 61                            | 6,1                                                       | 700                          | 649                          | 8,0                                                     |
| Хорватия                           | 10                            | 0                            | 0                             | —                                                         | 30                           | 96                           | —68,6                                                   |
| Македония                          | 30                            | 10                           | 30                            | 0,7                                                       | 217                          | 386                          | —43,8                                                   |
| Норвегия                           | 41                            | 70                           | 45                            | —9,8                                                      | 685                          | 600                          | 14,2                                                    |
| Сербия                             |                               | 0                            | 72                            | —100,0                                                    | 346                          | 1324                         | —73,9                                                   |
| Турция                             | 2845                          | 2984                         | 3112                          | —8,6                                                      | 35885                        | 34107                        | 5,2                                                     |
| <b>Прочие страны Европы, всего</b> | <b>2991</b>                   | <b>3121</b>                  | <b>3320</b>                   | <b>—9,9</b>                                               | <b>37862</b>                 | <b>37161</b>                 | <b>1,9</b>                                              |
| Белоруссия                         | 240                           | 235                          | 216                           | 11,0                                                      | 2745                         | 2614                         | 5,0                                                     |
| Казахстан                          | 280                           | 365                          | 328                           | —14,7                                                     | 3850                         | 4699                         | —18,1                                                   |
| Молдова                            | 30                            | 30                           | 30                            | 0,0                                                       | 330                          | 313                          | 5,5                                                     |
| Россия                             | 5608                          | 5532                         | 5880                          | —4,6                                                      | 70383                        | 68118                        | 3,3                                                     |
| Украина                            | 2532                          | 2691                         | 2804                          | —9,7                                                      | 32911                        | 35332                        | —6,9                                                    |
| Узбекистан                         | 55                            | 70                           | 54                            | 2,6                                                       | 735                          | 733                          | 0,3                                                     |
| <b>СНГ, всего</b>                  | <b>8925</b>                   | <b>8919</b>                  | <b>9427</b>                   | <b>—5,3</b>                                               | <b>111179</b>                | <b>112543</b>                | <b>—1,2</b>                                             |
| Канада                             | 1200                          | 1120                         | 1044                          | 14,9                                                      | 13730                        | 12967                        | 5,9                                                     |
| Куба                               | 30                            | 25                           | 18                            | 66,7                                                      | 317                          | 282                          | 12,4                                                    |
| Сальвадор                          | 10                            | 9                            | 9                             | 11,1                                                      | 103                          | 97                           | 6,2                                                     |
| Гватемала                          | 33                            | 30                           | 48                            | —31,3                                                     | 334                          | 445                          | —24,9                                                   |
| Мексика                            | 1700                          | 1500                         | 1544                          | 10,1                                                      | 18180                        | 18101                        | 0,4                                                     |
| Тринидад и Тобаго                  | 40                            | 43                           | 45                            | —10,6                                                     | 610                          | 603                          | 1,1                                                     |

Окончание таблицы

| Страна, регион                               | Декабрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Ноябрь<br>2012 г.,<br>тыс. т | Декабрь<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>декабрь<br>2012 г./<br>декабрь<br>2011 г., % | 12 мес<br>2012 г.,<br>тыс. т | 12 мес<br>2011 г.,<br>тыс. т | Изменение<br>12 мес<br>2012 г./<br>12 мес<br>2011 г., % |
|----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| США                                          | 7074                          | 6696                         | 7484                          | —5,5                                                      | 88598                        | 86398                        | 2,5                                                     |
| <b>Северная Америка, всего</b>               | <b>10087</b>                  | <b>9423</b>                  | <b>10192</b>                  | <b>—1,0</b>                                               | <b>121872</b>                | <b>118893</b>                | <b>2,5</b>                                              |
| Аргентина                                    | 334                           | 395                          | 456                           | —26,7                                                     | 4995                         | 5611                         | —11,0                                                   |
| Бразилия                                     | 2604                          | 2844                         | 2675                          | —2,6                                                      | 34682                        | 35221                        | —1,5                                                    |
| Чили                                         | 134                           | 150                          | 101                           | 32,7                                                      | 1684                         | 1615                         | 4,3                                                     |
| Колумбия                                     | 115                           | 90                           | 108                           | 6,5                                                       | 1323                         | 1287                         | 2,8                                                     |
| Эквадор                                      | 57                            | 50                           | 49                            | 16,3                                                      | 536                          | 522                          | 2,7                                                     |
| Парагвай                                     | 5                             | 4                            | 3                             | 66,7                                                      | 44                           | 30                           | 46,7                                                    |
| Перу                                         | 88                            | 85                           | 93                            | —5,4                                                      | 973                          | 926                          | 5,1                                                     |
| Уругвай                                      | 15                            | 10                           | 8                             | 87,5                                                      | 138                          | 81                           | 70,4                                                    |
| Венесуэла                                    | 251                           | 220                          | 229                           | 9,6                                                       | 2554                         | 3073                         | —16,9                                                   |
| <b>Южная Америка, всего</b>                  | <b>3603</b>                   | <b>3848</b>                  | <b>3721</b>                   | <b>—3,2</b>                                               | <b>46929</b>                 | <b>48366</b>                 | <b>—3,0</b>                                             |
| Алжир                                        | 15                            | 25                           | 51                            | —70,8                                                     | 510                          | 551                          | —7,5                                                    |
| Египет                                       | 587                           | 548                          | 566                           | 3,7                                                       | 6627                         | 6485                         | 2,2                                                     |
| Иран                                         | 1189                          | 1222                         | 1169                          | 1,6                                                       | 14463                        | 13197                        | 9,6                                                     |
| Марокко                                      | 45                            | 50                           | 60                            | —25,1                                                     | 530                          | 654                          | —18,9                                                   |
| Саудовская Аравия                            | 451                           | 437                          | 463                           | —2,7                                                      | 5203                         | 5275                         | —1,4                                                    |
| ЮАР                                          | 570                           | 560                          | 568                           | 0,4                                                       | 7120                         | 7546                         | —5,7                                                    |
| <b>Африка/страны Среднего Востока, всего</b> | <b>2857</b>                   | <b>2842</b>                  | <b>2878</b>                   | <b>—0,7</b>                                               | <b>34453</b>                 | <b>33709</b>                 | <b>2,2</b>                                              |
| Китай                                        | 57656                         | 57471                        | 53548                         | 7,7                                                       | 716542                       | 694812                       | 3,1                                                     |
| Индия                                        | 6600                          | 6400                         | 6296                          | 4,8                                                       | 76720                        | 73590                        | 4,3                                                     |
| Япония                                       | 8569                          | 8498                         | 8403                          | 2,0                                                       | 107235                       | 107601                       | —0,3                                                    |
| Южная Корея                                  | 5811                          | 5626                         | 6013                          | —3,4                                                      | 69321                        | 68519                        | 1,2                                                     |
| Тайвань                                      | 1770                          | 1550                         | 1892                          | —6,4                                                      | 20660                        | 20178                        | 2,4                                                     |
| <b>Страны Азии, всего</b>                    | <b>80406</b>                  | <b>79545</b>                 | <b>76152</b>                  | <b>5,6</b>                                                | <b>990477</b>                | <b>964701</b>                | <b>2,7</b>                                              |
| Австралия                                    | 368                           | 405                          | 345                           | 6,6                                                       | 4893                         | 6404                         | —23,6                                                   |
| Новая Зеландия                               | 83                            | 68                           | 79                            | 4,2                                                       | 912                          | 844                          | 8,1                                                     |
| <b>Океания, всего</b>                        | <b>450</b>                    | <b>473</b>                   | <b>424</b>                    | <b>6,2</b>                                                | <b>5805</b>                  | <b>7248</b>                  | <b>—19,9</b>                                            |
| <b>МИР, всего*</b>                           | <b>121293</b>                 | <b>121681</b>                | <b>118408</b>                 | <b>2,4</b>                                                | <b>1517945</b>               | <b>1500254</b>               | <b>1,2</b>                                              |

\* Итог приведен по 62 странам, входящим в Международный институт чугуна и стали, на которые приходится около 98 % мирового производства стали.

По материалам WSA



**ISIEM2013 — 2-й Международный симпозиум по неорганическим материалам**



UNIVERSITÉ DE  
**RENNES 1**

**ISIEM2013**  
2nd International Symposium on  
Inorganic and Environmental Materials  
27 - 31 October, Rennes - FRANCE

**27—31 октября 2013 г.**  
Университет Ренна, Франция





## ЦЕНЫ НА НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ОГНЕУПОРНОГО СЫРЬЯ, НА УСЛОВИЯХ CIF ОСНОВНЫЕ ПОРТЫ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ, долл./т (если не указано иное)

| Вид огнеупорного сырья                                                                                                      | Октябрь 2012 г. | Ноябрь 2012 г. | Декабрь 2012 г. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| <i>Глинозем и боксит</i>                                                                                                    |                 |                |                 |
| Глинозем спеченный, 98,5—99,5 % $Al_2O_3$ , насыпью, fob США                                                                | 675—725         | 675—725        | 675—725         |
| Глинозем спеченный со средним содержанием щелочей, насыпью, fob                                                             | 800—850         | 750—850        | 750—850         |
| Глинозем плавленный 95 % $Al_2O_3$ :                                                                                        |                 |                |                 |
| коричневый, 8—220 меш, китайского производства, fob Китай                                                                   | 800—840         | 800—840        | 800—840         |
| белый, мешками по 25 кг, европейского производства, cif Европа, евро/т                                                      | 850—890         | 850—890        | 850—890         |
| Боксит китайский огнеупорный, кусковой 0—25 мм, $Al_2O_3$ , % / $Fe_2O_3$ , % / плотность, г/см <sup>3</sup> , fob Xingang: |                 |                |                 |
| Шаньси (Shanxi), кольцевые печи, 87 / 2,0 / 3,2                                                                             | 395—430         | 395—430        | 405—440         |
| Гуйчжоу (Guizhou), fob Zhanjiang / Fangchend: кольцевые печи, 87 / 2,0 / 3,2                                                | 470—525         | 470—525        | 470—525         |
| Боксит из Гайаны, огнеупорная марка, fob, Линден                                                                            | 460—510         | 460—510        | 460—510         |
| <i>Хромовая руда</i>                                                                                                        |                 |                |                 |
| Трансваальская (ЮАР), огнеупорная марка, 46 % $Cr_2O_3$ , насыпью, fob                                                      | 425—500         | 425—500        | 425—500         |
| <i>Графит кристаллический</i>                                                                                               |                 |                |                 |
| Cif европейские порты:                                                                                                      |                 |                |                 |
| крупночешуйчатый:                                                                                                           |                 |                |                 |
| 94—97 % C, +80 меш                                                                                                          | 1300—1800       | 1400—1800      | 1400—1800       |
| 90 % C, +80 меш                                                                                                             | 1400—2000       | 1200—1600      | 1200—1600       |
| среднечешуйчатый:                                                                                                           |                 |                |                 |
| 90 % C, +100—80 меш                                                                                                         | 1150—1450       | 950—1200       | 950—1200        |
| 94—97 % C, +100—80 меш                                                                                                      | 1100—1700       | 1050—1400      | 1050—1400       |
| 85—87 % C, +100—80 меш                                                                                                      | 1000—1300       | 900—1150       | 900—1150        |
| мелкочешуйчатый:                                                                                                            |                 |                |                 |
| 90 % C, —100 меш                                                                                                            | 900—1100        | 850—1050       | 850—1050        |
| 94—97 % C, —100 меш                                                                                                         | 1150—1450       | 900—1200       | 900—1200        |
| <i>Магнезиальное сырье</i>                                                                                                  |                 |                |                 |
| Греческий сырой магнезит, < 3,5 % $SiO_2$ , fob порты Восточного Средиземноморья, евро/т                                    | 65—75           | 65—75          | 65—75           |
| Намертво обожженный периклаз китайского производства, кусковой, 90 % MgO                                                    | 350—400         | 350—400        | 350—400         |
| То же, 92 % MgO                                                                                                             | 430—470         | 430—470        | 430—470         |
| То же, 94—95 % MgO                                                                                                          | 410—480         | 410—480        | 410—480         |
| То же, 97,5 % MgO                                                                                                           | 560—600         | 560—600        | 560—600         |
| Кальцинированный магнезит кусковой, 90—92 % MgO, fob Китай                                                                  | 320—360         | 320—360        | 320—360         |
| <i>Карбид кремния</i>                                                                                                       |                 |                |                 |
| 8—220 меш, cif Великобритания:                                                                                              |                 |                |                 |
| черный, около 99 % SiC, сорт I, евро/т                                                                                      | 1900—2100       | 1900—2100      | 1900—2100       |
| то же, сорт II, евро/т                                                                                                      | 1500—1650       | 1500—1650      | 1500—1650       |
| огнеупорного сорта, min 98 % SiC, евро/т                                                                                    | 1500—1800       | 1500—1800      | 1500—1800       |
| то же, min 95 % SiC, евро/т                                                                                                 | 1350—1450       | 1350—1450      | 1350—1450       |
| <i>Минералы sillimanитовой группы</i>                                                                                       |                 |                |                 |
| Андалузит, fob Трансвааль, 57—58 % $Al_2O_3$ , насыпью, партиями по 2000 т, евро/т                                          | 235—280         | 235—280        | 235—280         |
| Кианит обожженный, ex-works с предприятий США, 54—60 % $Al_2O_3$ , партиями по 22 т                                         | 373—439         | 373—439        | 373—439         |
| <i>Циркон</i>                                                                                                               |                 |                |                 |
| Насыпью, fob:                                                                                                               |                 |                |                 |
| Австралия (стандарт)                                                                                                        | 2400—2600       | 2000—2150      | 2000—2150       |
| США (стандарт)                                                                                                              | 2550—2750       | 2550—2750      | 2550—2750       |
| ЮАР (керамический сорт)                                                                                                     | 2300—2650       | 2300—2650      | 2300—2650       |

По данным «Industrial Minerals»

**ОБЗОР ПАТЕНТОВ РФ  
НА ИЗОБРЕТЕНИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ****СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ  
АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

Баринов С. М., Дёмин В. А., Иванов А. В.,  
Иванов Д. А., Омаров А. Ю., Хайри А. Х.,  
Шляпин А. Д., Шляпин С. Д.

Патент RU 2453517  
МПК C04B35/111, C04B35/626, C01F7/42

Изобретение относится к технологии высокотемпературных керамических материалов конструкционного назначения с повышенными термомеханическими характеристиками (футеровка тепловых агрегатов, термостойкий огнеприпас, элементы ударопрочной защиты). Технический результат изобретения — увеличение термостойкости керамики и ее прочности при ударном воздействии, а также снижение температуры ее спекания.

1. Способ получения конструкционной алюмооксидной керамики включает обработку алюминиевого сплава водосодержащим реагентом, выделение из маточного раствора образовавшегося осадка, его промывку, сушку, термообработку, приготовление из полученного продукта шихты, формование и спекание отформованных заготовок. Способ отличается тем, что сплав алюминия с кремнием, содержащимся в количестве 10—14 мас. %, обрабатывают водным раствором едкого натра с концентрацией 5—27 % при теплоотводе из реакционного объема хладагентом с температурой 15—25 °С, из маточного раствора выделяют осадок гидроксида алюминия с включениями метасиликата натрия, промывку осадка ведут до pH среды 8—9.

2. Способ по п. 1 отличается тем, что водным раствором едкого натра обрабатывают сплав алюминия с кремнием, взятый в виде кусков, стружки, опилок, гранул.

3. Способ по п. 1 отличается тем, что сушку осадка проводят на воздухе при 80—200 °С.

4. Способ по п. 1 отличается тем, что осадок термообрабатывают на воздухе при 1280—1350 °С в течение 1—3 ч.

5. Способ по п. 1 отличается тем, что для приготовления шихты в измельченный продукт, полученный после термообработки осадка, добавляют 7—10 %-ный раствор поливинилового спирта в количестве 5—7 % в пересчете на сухой остаток вещества.

6. Способ по п. 1 отличается тем, что формование заготовок проводят путем прессования под давлением 150—200 МПа.

7. Способ по п. 1 отличается тем, что спекание проводят на воздухе при 1450—1500 °С в течение 1—2 ч.

«Бюллетень»\*. — 2012. — №. 17. — С. 191, 192.

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОЛОЧКИ  
АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ  
ИЗ РЕАКЦИОННО-СВЯЗАННОГО  
НИТРИДА КРЕМНИЯ**

Курская И. Н., Рудыкина В. Н., Келина И. Ю.,  
Шаталин А. С., Шеянов В. Ю., Шамшетдинов К. Б.,  
Ганичев А. И.

Патент RU 2453520  
МПК C04B35/591, C04B41/84

Изобретение относится к области авиационной и ракетной техники, преимущественно к способу изготовления оболочки головных антенных обтекателей ракет. Технический результат изобретения — получение качественных крупногабаритных оболочек антенных обтекателей из нитрида кремния с комплексом свойств, требуемых для радиопрозрачных материалов и изделий: высокой прочностью, близкой к нулю пористостью, стабильных в широком температурном интервале диэлектрических характеристик, в том числе низких диэлектрических потерь.

1. Способ получения оболочки антенного обтекателя из реакционно-связанного нитрида кремния включает смешение кремнийсодержащего компонента с ускорителем азотирования в количестве 0,1—3,0 мас. %, в качестве которого используют оксид железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в виде азотнокислого железа, или никель, или оксид никеля, измельчение, формование заготовки из полученной смеси методом горячего литья под давлением, азотирование заготовки при 1000—1500 °С, пропитку ее этилсиликатом и последующую термообработку в две стадии при 750 и 1300 °С соответственно. Способ отличается тем, что измельчение смеси проводят до среднего размера частиц 1,5—3,0 мкм, формование заготовки осуществляют в предварительно прогретую термостатированную литейную форму.

\* В дальнейшем приводится сокращенное название «Бюллетень».

му с двумя независимыми контурами нагрева и охлаждения пуансона и матрицы. При этом в процессе литья температура матрицы достигает 30—35 °С, пуансона 50—55 °С, а для выемки заготовки из формы пуансон охлаждают до 30—35 °С. Азотирование проводят в засыпке из нитрида кремния, располагающейся только по наружной поверхности заготовки, с размером зерен 5—10 мм, а после термообработки пропитанной заготовки проводят дополнительную пропитку ее наружной и внутренней поверхностей кремнийорганическим соединением, тетракс-(метилфенилсилоксано-гидроокси)-титаном, или метилфенилспиросилоксаном, или алкилгидридсилоксаном с последующей термообработкой.

2. Способ по п. 1 отличается тем, что термообработку после дополнительной пропитки заготовки проводят при 225—250 °С.

«Бюллетень». — 2012. — №. 17. — С. 193.

#### РАСТВОРИМЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДКРЕМНИЕВОЙ ШИХТЫ С ОКСИДНЫМ АКТИВАТОРОМ СПЕКАНИЯ И СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИКИ НА ЕЕ ОСНОВЕ

Вихман С. В., Кожевников О. А., Орданьян С. С.,  
Чупов В. Д.

Патент RU 2455262  
МПК C04B35/565

Изобретение относится к области производства композиционного материала на основе карбида кремния и сложного оксидного связующего, способного работать в агрессивных средах, а также в условиях ударно-динамических нагрузок, а именно в качестве материала для пар трения и бронезащитных изделий. Технический результат изобретения — повышение прочности, плотности и твердости изделий при их низкой пористости.

1. Растворный способ получения карбидкремниевой шихты с оксидным активатором спекания включает нанесение на поверхность частиц карбида кремния  $\alpha$ -SiC активатора спекания состава, содержащего 3,7 мас. % MgO, 24,7 мас. %  $Y_2O_3$  и 71,6 мас. %  $Al_2O_3$ . Способ отличается тем, что нанесение осуществляют на частицы  $\alpha$ -SiC, диспергированные в водных растворах нитратов магния, иттрия и алюминия, путем осаждения ионов  $Mg^{2+}$  на 1/3 часть  $\alpha$ -SiC, взятого в виде суспензии в водном растворе гидроксида натрия NaOH, а смеси ио-

нов  $Y^{3+}$  и  $Al^{3+}$  — на 2/3 части  $\alpha$ -SiC, взятого в виде суспензии в водном растворе гидроксида аммония  $NH_4OH$ . При этом осаждение ионов осуществляют в форме гидроксидов с последующей термодеструкцией их до оксидных форм при 400—700 °С и смешиванием получают шихту, включающую 0,24—0,55 мас. % MgO, 2,50—3,71 мас. %  $Y_2O_3$ , 7,20—10,76 мас. %  $Al_2O_3$ ; остальное —  $\alpha$ -SiC.

2. Способ получения керамики с равномерной распределенной оксидной связкой на основе карбидкремниевой шихты, полученной по п. 1, включает добавление связующего, формование заготовки, ее сушку и спекание в среде инертного газа. Способ отличается тем, что заготовку прессуют под давлением 70—1000 МПа, спекают в течение 40—120 мин при 1840—1880 °С, а в качестве инертного газа используют аргон.

«Бюллетень». — 2012. — №. 19. — С. 192.

#### ШИХТА ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦИРКОНИЯ И АЛЮМИНИЯ И НИТРИДА ЦИРКОНИЯ

Чумакова Н. Н., Кузевич О. В., Пантелеев И. Б.,  
Орданьян С. С.

Патент RU 2455261  
МПК C04B35/486, C04B35/58

Изобретение относится к керамическому материаловедению, в частности к получению керамического материала на основе тугоплавких бескислородных и оксидных соединений, характеризующегося высокой прочностью и трещиностойкостью, и может быть использовано для изготовления режущего инструмента, в нефте- и газодобывающей промышленности (клапанные устройства и уплотнительные кольца насосов), при изготовлении сопловых насадок для пескоструйных аппаратов и распылителей химических растворов. Технический результат изобретения — получение керамического материала с высокой трещиностойкостью (7—14 МПа·м<sup>1/2</sup> с) и пределом прочности при изгибе 650—750 МПа.

Шихта для керамического материала с высокой трещиностойкостью, содержащая  $ZrO_2$  и  $ZrN$ , отличается тем, что она дополнительно содержит  $Al_2O_3$  при следующем соотношении компонентов, мас. %:  $Al_2O_3$  10—40,  $ZrN$  20—65,  $ZrO_2$  — остальное.

«Бюллетень». — 2012. — №. 19. — С. 192.

Обзор подготовлен редакцией журнала  
«Новые огнеупоры»

## 100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВИКТОРА ЛЬВОВИЧА БАЛКЕВИЧА

**В**иктор Львович родился 30 июня 1913 г. в г. Екатеринодаре (ныне г. Краснодар) в семье служащего. В 1930 г. В. Л. Балкевич окончил школу № 43 Бауманского района Москвы с химическим уклоном и после ее окончания получил специальность химика-лаборанта. Трудовую деятельность начал лаборантом в химическом цехе электрозавода РЭО, затем работал на заводе силикатного кирпича в г. Красково Московской обл., на Заводе редких элементов в Москве, во Всесоюзном научно-исследовательском институте огнеупорных и кислотоупорных материалов (ВИОК). В 1935 г. он поступил в МХТИ им. Д. И. Менделеева на силикатный факультет. В феврале 1939 г. с отличием окончил кафедру технологии керамики и огнеупоров МХТИ им. Д. И. Менделеева, получив диплом инженера-технолога силикатной промышленности. Его распределили в главное управление огнеупорной промышленности Народного комиссариата черной металлургии, а осенью 1939 г. он поступил в аспирантуру кафедры технологии керамики и огнеупоров МХТИ им. Д. И. Менделеева. В феврале 1940 г. его из аспирантуры призвали в Рабоче-крестьянскую Красную армию.

Великую Отечественную войну он встретил курсантом Курсов младших лейтенантов при 1-м полке связи. В августе 1941 г. он их закончил, получил звание младшего лейтенанта и, как имеющий высшее химическое образование, был назначен начальником химической службы полка в 328-ю стрелковую дивизию, затем начальником отдельного хранилища противохимической защиты, затем зам. начальника, а потом начальником армейского инженерного склада. Войну он закончил в Восточной Пруссии, участвуя в штурме Кёнигсберга. Награжден орденами и медалями. В армии в 1943 г. вступил в кандидаты ВКП(б), а в 1944 г. был принят в члены партии.

После демобилизации в августе 1946 г. В. Л. Балкевич вернулся в аспирантуру МХТИ им. Д. И. Менделеева, где под руководством



д. т. н., проф. Д. Н. Полубояринова подготовил и защитил в 1949 г. диссертацию на тему «Высокоогнеупорные материалы на основе рекристаллизованного глинозема». По распределению был направлен во Всесоюзный научно-исследовательский институт строительной керамики на должность руководителя лаборатории кислотоупорных и огнеупорных материалов.

В 1954 г. В. Л. Балкевич вернулся на должность доцента кафедры керамики МХТИ им. Д. И. Менделеева и затем до самой смерти вся его дальнейшая жизнь была связана с родной кафедрой. В 1972 г. Виктор Львович защитил докторскую диссертацию на тему «Спекание, технология и свойства высокоогнеупорных материалов зернистого строения из чистых оксидов и их соединений» и стал профессором кафедры.

Он был одним из первых, кто начал разрабатывать технологию керамики из чистых оксидов без введения легкоплавких компонентов, больших успехов добился в технологии огнеупорных изделий из крупнозернистых масс, которые послужили основой при получении многочисленных изделий для нужд металлургии, особенно непрерывной разливки стали, и других отраслей техники, в технологии высокотемпературных нагревателей на основе карбида кремния, хромита лантана, диоксида циркония. При его активном участии в СССР было

налажено промышленное производство нагревателей из хромита лантана.

В. Л. Балкевич опубликовал около 180 научных статей, подготовил 8 кандидатов наук, участвовал в создании учебной и справочной литературы. Он — соавтор основного учебника и практикума по технологии керамики, курс которой он читал студентам в течение многих лет, был в числе авторов таких известных монографий, как «Технология высокоглиноземистых материалов», «Технология оксидной керамики», «Справочник по строительной керамике». Особо следует отметить его широко известное учебное пособие «Техническая керамика», которое благодаря своей краткости при насыщенности полезной информацией и простоте изложения до сих пор пользуется заслуженной популярностью у всех, кто работает в области технической керамики.

Как фронтовик, член партии и имевший большой армейский и гражданский опыт руководящей работы, он пользовался большим уважением на кафедре, на факультете и в Менделеевском институте. Его избирали партгором кафедры, секретарем партбюро факультета, председателем месткома института, был председателем секции строительной керамики МПСМ СССР, заместителем председателя секции керамики центрального правления ВХО им. Д. И. Менделеева, членом диссертационного совета при МХТИ, членом редколлегий журнала «Стекло и керамика» и международного журнала «Ceramic International».

В. Л. Балкевич отличался исключительно внимательным и доброжелательным отношением к студентам и коллегам. Его организованность и обязательность во всех делах всегда служили примером и образцом для всех окружающих. ■

**Коллектив кафедры  
химической  
технологии керамики  
и огнеупоров  
РХТУ им. Д. И. Менделеева**

## 55th INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON REFRACTORIES 2012



УДК 666.76.061.3(430)

## 55-й МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОЛЛОКВИУМ ПО ОГНЕУПОРАМ В ААХЕНЕ — ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ

1. 55th International Colloquium on Refractories in Aachen // Refractories Worldforum. — 2013. — Vol. 5, № 1. — P. 57—66. Англ.

2. 55th International Colloquium on Refractories 2012 — Refractories for Metallurgy, September 19th and 20th, 2012. — EUROGRESS, Aachen, Germany. — 240 p.

«Огнеупоры для металлургии» — под таким названием прошел 55-й Международный коллоквиум по огнеупорам 19—20 сентября 2012 г. в Аахене, Германия. Три пленарных и 49 технических заседаний, 530 участников из 38 стран мира, 25 выставочных стендов и презентация премии Густава Айриха (Gustav Eirich) трем молодым ученым — основные составляющие прошедшего мероприятия.

Особое внимание было направлено на возможность представить технологические разработки и их применение в огнеупорных технологиях. Технические семинары в Аахене были посвящены следующим темам: производство чугуна, неформованные материалы, производство стали, испытания, разливка стали и литейное производство. Специальный семинар по сырьевым материалам был проведен в рамках партнерства с журналом «Industrial Minerals» с последующей панельной дискуссией (групповым обсуждением) под руководством Mike O'Driscoll (журнал «Industrial Minerals», Великобритания).

Впервые восемь компаний («Almatis», «Eirich», «Chem. Fabrik Budenheim», «Nabaltec», «Purmetall», «REFKO», «Velco» (все из Германии) и RHI, Австрия) участвовали в новой промышленной сессии, чтобы обсудить свою стратегию на рынке.

### ОТКРЫТИЕ КОЛЛОКВИУМА

Проф. д-р Peter Quirnbach, директор-распорядитель Регистрационного форума европейских коммерческих компаний (ECRF — European Commerce Register's Forum), во вступительной речи выдвинул на первый план важность эффективного использования ресурсов и энергии. Европейская федерация производителей огнеупоров (PRE — Federation Europeenne des Fabricants de Produits Refractaires) пытается

внести свое понимание эффективности в европейский стратегический план, который будет регулировать взаимодействие с Европейской комиссией (European Commission — EC) и Европейским парламентом. PRE совместно с некоторыми другими ассоциациями (связанными с производством стали, химикатов, цемента, стекла, минералов и т. д.) является партнером в программе Евросоюза «Устойчивая обрабатывающая промышленность посредством эффективного использования ресурсов и энергии» (SPIRE — Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency) для обеспечения будущей конкурентоспособности.

Тема второй части выступления докладчика — наращивание знаний в области огнеупоров и укрепление научного сообщества в рамках 45 компаний — членов VDFFI (Ассоциации огнеупорной промышленности Германии). Сеть диалоговой связи современной промышленной ассоциации, проведение научным сообществом исследований на современном уровне, консультационные услуги и испытания, а также согласованная концепция по всем темам, касающимся профессионального обучения, включая специальное обучение по огнеупорной тематике (коммерческое и академическое), а также курсы повышения квалификации — это прочный фундамент для достижения цели. При новом расположении Европейского огнеупорного центра ECREF (European Centre for Refractories) в Хёр-Гренцхаузене (Höhr-Grenzhausen), Германия, все эти виды деятельности будут развиваться и дальше совместно с производителями и потребителями огнеупорной продукции.

Далее докладчик приветствовал участников коллоквиума от имени организаторов встречи: Thomas Seger (VDFFI); д-ра Robin Schmidt-Whitley (PRE); проф. д-ра Rainer Telle (Рейнско-Вестфальский технический университет

Аахена — RWTH Aachen); проф. д-ра Christos G. Aneziris (Технический университет Горной академии Фрайберга — TU Freiberg); д-ра Reinhard Fahndrich (Институт стали — Stahlinstitut VDEh); Pascal Steinküller [Федеральный союз германской литейной промышленности (BDG — Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie)] и Gangolf Stegh [Германское общество огнеупоров и строительства дымовых труб (DGFS — Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.)].

Две пленарные лекции были представлены д-ром Volker Steinbach (Геоцентр Ганновера — Geozentrum Hannover, Германия) на тему «Существующее положение с сырьевыми материалами в Германии и миссия DERA<sup>\*1</sup>» («The Actual Situation of Raw Materials in Germany and the Mission of the DERA») и д-ром Ralf Bruckhaus (компания «Dillinger Hüttenwerke», Германия, на тему «Тенденции развития металлургии» («Trends in Metallurgy»).

#### ПРЕМИЯ ГУСТАВА АЙРИХА (GUSTAV EIRICH AWARD) 2012

Премия Густава Айриха была представлена на открытии коллоквиума в четвертый раз. Д-р Christoph Heynen, технический директор компании «Maschinenfabrik Gustav Eirich», Германия, наградила трех молодых исследователей нового поколения в области огнеупоров. Победителями 2012 г. названы следующие участники:

**1 премия:** Patrick Gehre, Технический университет Горной академии Фрайберга; Институт керамики, стекла и конструкционных материалов (Institute of Ceramics, Glass and Construction Materials TU Bergakademie Freiberg, Германия) за работу «Возможные составы огнеупорных бетонов без оксида хрома для использования в газогенераторах с жидким шлакоудалением» («Possible Design of Chrome-oxide-free Refractory Castables for Use in Slagging Gasifiers»).

**2 премия:** Tiago M. Souza, Федеральный университет Сан-Карлос (Federal University of Sao Carlos), Бразилия, за работу «Новые технологии, преодолевающие гидратацию периклаза в бесцементных глиноземистых бетонах» («Novel Technological Route to Overcome the Challenging Magnesia Hydration of Cement-free Alumina Castables»).

**3 премия:** Bai Cui, Центр современной конструкционной керамики на факультете материаловедения Королевского колледжа Лондона (Centre for Advanced Structural Ceramics

<sup>\*1</sup> DERA — German Mineral Resources Agency — Агентство Германии по минеральным ресурсам.

Department of Materials Imperial College London) за работу «Высокотемпературное окисление MAX-фазы керамики» («High-temperature Oxidation Behaviour of MAX Phase Ceramics»).

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАСЕДАНИЯ (СЕССИИ, СЕКЦИИ)

##### Доклады секции «Чугун»

• Компанией «Ternium Siderar», Аргентина, и Аргентинским институтом металлургии (Instituto Argentino de Siderurgia), Аргентина, представлен совместный проект «Механизмы износа глиноземистых бетонов, используемых для горячего ремонта леток доменных печей» («Wear Mechanisms of Aluminous Castable Used in Hot Repairs of a Blast Furnace Tabhole Area»). В летках доменных печей фирмы «Ternium Siderar» применяют два типа неформованных огнеупоров. Низкоцементный  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —SiC—C-бетон используют в качестве защитной литой футеровки и заменяют каждые 6 мес. Как материал для горячих ремонтов он используется в виде торкрет-смесей. Хотя показатели торкрет-огнеупоров не так высоки, как у других неформованных огнеупоров, их укладка проходит быстро и их применение приводит к снижению простоев. Цель данной работы состояла в анализе механизма износа двух видов высокоглиноземистых торкрет-смесей при проведении двух методик испытания на коррозию (тигельное испытание и метод погружения). Химическая коррозия обеих смесей оказалась одинаковой, но один образец имел лучшие механические характеристики, а другой показал лучшие результаты при испытании погружением.

• Pei-Ling Chang из компании «Sunward Refractories», Тайвань, представил исследование на тему «Влияние добавок на свойства  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —SiC—C-материалов для желобов доменных печей» («Effect of Additives on the Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —SiC—C Blast Furnace Runner Materials»). Различные добавки вводили в состав  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —SiC—C для главных желобов (бетонов) и шлаковых желобов (набивных смесей) доменных печей для улучшения удобоукладываемости, физических свойств и повышения срока службы. Проанализированы высокотемпературные физические свойства и результаты испытаний на шлакоустойчивость вращением образцов; микроструктуру исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии SEM. Результаты показали, что механическая прочность повысилась, а откры-

тая пористость снизилась на 7,5 % при введении соответствующего количества добавок. Коррозионная стойкость была существенно улучшена, и может быть достигнута более высокая стойкость футеровки главных желобов.

• *Patrick Tassot* из компании «Calderys», Франция, выступил с докладом **«Высокая эксплуатационная готовность и ремонт кислородных конвертеров»** (*«High Availability and Repair Solutions for the BOF»*). Он пришел к выводу, что ключ к оптимизации эксплуатационных характеристик футеровки конвертеров BOF находится в руках металлургов, которые, в частности, оптимизируют состав шлака, минимизируют число передувов и ритмичность (последовательность) выплавки стали. Ключевыми вопросами для оптимизации производства автор доклада считает профилактическое обслуживание торкретированием для уменьшения износа кирпичной кладки или локальный ремонт «бойной» зоны с минимизацией длительности простоя конвертера на ремонт. Применение инновационного саморастекающегося бетона основного состава позволяет эксплуатировать «бойную» зону в течение 60 плавов при потреблении нескольких тонн ремонтного материала за один цикл.

• Два доклада были представлены специалистами Федерального университета, г. Сан-Карлос (*Universidade Federal de Sao Carlos — UFSCAR*), Бразилия: *R. Freire* — **«Кирпичная футеровка ковшей торпедо — прогнозирование срока службы методом конечных элементов FEM»** (*«Torpedo Ladles Bricks — Lining Life Prediction by FEM»*) и *A. Maiti* — **«Термомеханические характеристики огнеупорных изделий для ковшей торпедо»** (*«Thermomechanical Behaviour of Torpedo Ladles Bricks»*).

### Доклады секции «Неформованные огнеупоры»

• *Bjorn Myhre* из компании «Elkem Silicon Materials», Норвегия, выступил с сообщением на тему **«Бетоны на связке из геля микрокремнезема с различными видами цемента — характеристики схватывания и механические свойства»** (*«Microsilica-gel Bonded Castables — Setting Characteristics and Mechanical Properties with Different Cements»*). Бесцементные бетоны на связке из геля микрокремнезема показывают весьма привлекательные свойства, такие как хорошая текучесть при очень низкой добавке воды и способность выдерживать экстремальный нагрев после сушки. Хотя прочность сырца большинства низкоцементных бетонов невысо-

ка, она достаточна для обработки (укладки). После сушки при 110 °С прочность бетона существенно возрастает. После заливки саморастекающихся бетонов на основе белого плавящего корунда с добавкой воды всего 3,5 % с использованием в качестве диспергатора SioxX определяли предел прочности при изгибе (MOR) бетонных образцов на холоду и при температуре до 1500 °С. Срок схватывания бетона может быть также ускорен путем применения SioxX-Quick, что облегчает контроль процесса схватывания. Далее было показано, что имеется существенное различие между испытанными цементами: 84 % СА-цемент обеспечивает лучшую высокотемпературную прочность, в то время как 70 % СА-цемент дает более быстрое схватывание.

• *Jonas Schnieder* из Рейнско-Вестфальского технического университета Аахена (*RWTH Aachen*), Германия, выступил с докладом **«Влияние добавок на термомеханические свойства бетонов с золь-гелевой связкой»** (*«Influence of Additives on the Thermomechanical Properties of Sol-gel Bonded Castables»*). Связки без алюминаткальциевого (высокоглиноземистого) цемента (САС) находились в последние годы в фокусе разработок в области огнеупоров. Наряду с коллоидным кремнеземом интересные результаты в качестве альтернативной связующей системы показали глиноземистые золи. Были изучены глиноземистый золь и влияние различных добавок. Вначале сравнивали бетоны на цементной и золь-гелевой связках, чтобы понять механизмы связывания золя. Затем изучали добавки BaSO<sub>4</sub> и SiO<sub>2</sub> и их влияние на термомеханические свойства. Пришли к выводу, что можно получить тиксотропный золь в качестве связки с оптимальной текучестью.

• *Arup Kumar Samanta* из компании «TRL Krosaki Refractories», Индия, сделал сообщение на тему **«Влияние микрокремнезема и высокоглиноземистого цемента на термомеханические свойства низкоцементных бетонов»** (*«Effect of Microsilica and Calcium Aluminate Cement on Thermomechanical Properties of Low Cement Castables»*). Хотя цемент является важным компонентом низкоцементных и ультранизкоцементных бетонов, он отрицательно влияет на различные термомеханические свойства, в частности на термостойкость, высокотемпературную прочность при изгибе (HMOR) и температуру деформации под нагрузкой (RUL). В присутствии микрокремнезема, цемента и ряда добавок формируются несколько эвтектик в зависимости от качества и количества цемента и микрокрем-

незема, имеющих в системе. Было установлено, что HMOR бетонов зависит от температуры обжига, выдержки и присутствия андалузита. Повышенная термостойкость характерна для образцов, имеющих более высокое содержание цемента, вследствие наличия микропор и образования фазы  $CA_6$  при обжиге.

• *Hong Peng* из компании «Elkem Silicon Materials», Норвегия, представил доклад **«Улучшение текучести огнеупорных бетонов в результате оптимизации гранулометрического состава» («Improved Flow of Refractory Castables by Optimised Particle Size Distribution»)**. Были разработаны саморастекающиеся огнеупорные бетоны с оптимизированным гранулометрическим составом (*particle size distribution — PSD*). Для регулирования текучести и продолжительности схватывания бетонов, содержащих микрокремнезем, были использованы SioxX- и SioxX-Quick-системы. В данной работе в качестве образцов выбраны низкоцементный бетон (*low-cement castable — LCC*) на основе боксита, ультранизкоцементный бетон (*ultra-low cement castable — ULCC*) и бесцементный бетон (*non-cement castable — NCC*). Во всех трех тестируемых системах достигли 100 %-ной саморастекаемости при добавке 5,5 % воды. После предварительного обжига при разных температурах были измерены механические свойства, такие как прочность при сжатии на холоду (*cold crushing strength — CCS*), прочность при изгибе на холоду (*cold modulus of rupture — CMOR*) и высокотемпературная прочность при изгибе (*hot modulus of rupture — HMOR*). Оптимизированный PSD приводит не только к лучшим текучести и характеристикам укладки, но и к улучшенным механическим свойствам опытных систем.

• *Izabela Majchrowicz* из отделения огнеупоров Института керамики и строительных материалов, г. Гливице (*Inst. of Ceramics and Building Materials, Refractory Materials Division, Gliwice*), Польша, выступила с докладом **«Влияние вязкости матрицы на седиментацию саморастекающихся бетонов» («Influence of Matrix Viscosity on Sedimentation of Self-flow Castables»)**. Изучены взаимосвязь между эффективной вязкостью суспензии матрицы и величиной свободной растекаемости (*free flow value*), а также явление седиментации в бетонах. Исследования проведены на саморастекающихся бетонах на основе шамота и белого плавленного корунда. В этих двух типах бетонов состав матрицы был одинаков. Вязкость саморастекающейся бетонной матрицы является важным фактором, влияющим на величину сво-

бодной растекаемости. Однако следует принимать во внимание тот факт, что слишком низкая вязкость суспензии матрицы может привести к нежелательной седиментации заполнителей. В связи с этим в процессе разработки саморастекающихся бетонов рекомендовано принимать во внимание вязкость бетонной матрицы.

• *Smita Satpathy* из компании «TRL Krosaki Refractories», Индия, выступил с сообщением **«Влияние щелочных полифосфатов на старение (твердение)  $Al_2O_3$ —SiC—C-бетонов» («Effect of Alkaline-Polyphosphates on Aging Behaviour of  $Al_2O_3$ —SiC—C Base Castables»)**. Полифосфаты двух различных видов были выбраны для изучения старения  $Al_2O_3$ —SiC—C-бетонов, в которых содержание диспергирующих агентов колебалось в пределах от 0,05 до 0,20 %.

• *Jean-Michel Auvray* из компании «Kerneos», Франция, представил доклад на тему **«Новое понимание механизмов коррозии плотных огнеупорных бетонов, содержащих новую связку системы  $CaO$ — $MgO$ — $Al_2O_3$ » («New Insights into Corrosion Mechanisms of Dense Refractory Castables Containing a Novel Calcium-magnesia-alumina Binder»)**. В результате специфического расположения гексаалюмината кальция  $CA_6$ , который прочно сцепляется со шпинельными частицами, матрица физически и химически устойчива к воздействию шлака, что приводит к некоторой последовательности реакций, отличающейся от той, которая наблюдается у традиционных алюминаткальциевых цемента (*calcium aluminate cements — CAC*).

• *Ana P. Luz* из Федерального университета г. Сан-Карлос (*Federal University of Sao Carlos*), Бразилия, выступила с докладом **«Достижения в термодинамическом моделировании коррозии  $Al_2O_3$ — $MgO$ -бетона» («Advances in Thermodynamic Simulation of  $Al_2O_3$ — $MgO$  Castable Corrosion»)**. Хотя термодинамическая оценка составов бетонов позволила правильно идентифицировать фазовые превращения, лучшей альтернативой представляется двухступенчатый анализ взаимодействия в жидкой фазе с матричными компонентами и позже с частицами заполнителя, чтобы спрогнозировать различные показатели коррозии двух разработанных  $Al_2O_3$ — $MgO$ -бетонов (содержащих в качестве связующего гидратируемый глинозем или высокоглиноземистый цемент).

• *Sutkowski Michal* из компании «Arcelor-Mittal Refractories», Польша, представил доклад **«Современные кислотоупорные бетоны» («Modern Acid Resistant Castables»)**. Технические ограничения по использованию

цемента вызвали развитие альтернативного связующего и способствовали появлению нового поколения бетонов на связке из золя кремниевой кислоты. В процессе гелеобразования новая связка позволяет получать высокую механическую прочность без сложной термообработки.

• *Michael Springer* из компании «FBB Engineering», Германия, от имени коллег из компаний «Voest-Alpine», Австрия, и «Almatis», Германия, выступил с докладом **«Снижение тепловых потерь через систему подовых труб толкательной нагревательной печи на заводе в Линце компании «Voest-Alpine Grobblech» («Reduction of Heat Losses on the Skid Pipe System of a Pusher Type Furnace at the Linz Plant of «Voest-Alpine Grobblech»»)**. Сотрудничество между потребителем, поставщиком огнеупоров и поставщиком сырья позволило разработать и ввести в эксплуатацию новую инновационную концепцию огнеупорной футеровки, которая уменьшает потребление энергии в печах прокатного стана и способствует сокращению эмиссии CO<sub>2</sub>. Компания «Voestalpine Grobblech GmbH» была пионером в реализации инновационных решений на практике.

• *Jose de Anchieta Rodrigues* из Федерального университета г. Сан-Карлос (*Federal University of Sao Carlos*), Бразилия, представил доклад **«Влияние размера образца на устойчивость к термоудару для огнеупорных бетонов, содержащих эвтектические заполнители» («Effect of Sample Size on the Resistance to Thermal Shock for Eutectic Aggregates Containing Refractory Castables»)**. При проведении испытания на закалывание оценивали образцы двух размеров, чтобы выяснить, как влияет изменение объема образцов на термостойкость (устойчивость огнеупора к термоударам).

### Доклады секции «Сталь»

• *Thomas Deinet* из Группы исследований огнеупоров (*Forschungsgemeinschaft Feuerfest*), Германия, выступил с докладом на тему **«Энергоэффективный и мягкий предварительный нагрев литейных ковшей с использованием пористой горелки с керамической радиантной трубкой» («Energy-efficient and Gentle Pre-heating of Foundry Ladles Using a Pore Burner with Ceramic Radiant Tube»)**. Предварительный нагрев литейных ковшей часто проводится с использованием газовой горелки с открытым копьевидным пламенем (*lance-shaped flame*). Нагрев футеровки в случае подогрева неоднороден, поэтому в футеровке

могут возникнуть термические и механические напряжения, приводящие к снижению срока службы. Технология пористых горелок с радиантной трубкой успешно внедрена как альтернативное решение нагрева и используется для сушки и нагрева футеровки металлургических агрегатов. В данном исследовании керамическая радиантная трубка была сконструирована и протестирована на стенде предварительного нагрева ковшей в литейном производстве цветных металлов. Керамическая радиантная трубка очень хорошо противостояла термическим и механическим напряжениям и доказала свое значение как альтернативный радиантный (излучающий) материал с отличными химическими и термомеханическими свойствами.

• *V. Stein* из Института керамики, стекла и конструкционных материалов, входящего в состав Технического университета Горной академии Фрайберга (*Institute of Ceramic, Glass and Construction Materials, TU Bergakademie Freiberg*), Германия, представил работу на тему **«Влияние оксидов металлов IV группы на свойства высокоосновных огнеупоров на углеродистой связке» («The Influence of Subgroup IV Metal-oxides on the Properties of Carbon-bonded High-basic refractories»)**. Высокоосновные огнеупоры, подобные доломитовым, с содержанием углерода не более 5 мас. % широко используются в качестве футеровки в установках для внепечной обработки стали. Использование обогащенного CaO-материала обусловлено его высокой термодинамической стабильностью при очень низком парциальном давлении кислорода и способностью связывания серы из чугуна. Исследовано влияние субмикронных порошков оксидов металлов IV группы TiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> на свойства огнеупоров доломитоуглеродистого состава. С одной стороны, оксиды способны улучшать механические свойства системы путем формирования перовскитов (CaTiO<sub>3</sub> и CaZrO<sub>3</sub>). С другой стороны, оксиды способны влиять на полимеризацию, а также карбонизацию связующей синтетической смолы. Добавки ZrO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> приводят к существенному повышению содержания углерода после коксования. Суммарное воздействие этих эффектов предполагает возможность уменьшения общего содержания углерода без ухудшения свойств огнеупорных изделий. Этот аспект представляет большой интерес с точки зрения снижения вредных выделений и получения экологичных огнеупоров.

• *Nuri Sarioglu* из компании «KüMA — Magnesite Industries», Турция, выступил с докладом **«Характеристики растворения MgO—С-изделий в сталеплавильных шлаках элек-**

тродуговых печей со ступенчато изменяющейся степенью насыщения MgO» (*«The Dissolution Behavior of MgO—C Bricks in Electric Arc Furnace Steel Slags with Graded Magnesia Saturation»*). Характеристики растворения MgO—C-изделий, установленных в шлаковом поясе электродуговых печей, были изучены с рассмотрением различных степеней насыщения MgO. Химический состав исходного шлака, полученного из электродуговой печи местного металлургического завода, %: CaO 36,28, SiO<sub>2</sub> 16,26, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9,82, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общ 26,43, MnO 6,73, MgO 3,33; в небольших количествах присутствовали Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и S. В процессе проведения исследований синтетический шлак был модифицирован по содержанию MgO путем введения ступенчато изменяющихся добавок MgO вплоть до насыщения, которое было достигнуто при 1600 °C согласно изотермической диаграмме растворимости.

• Silvia Camelli из Аргентинского института металлургии (*Instituto Argentino de Siderurgia*), Аргентина, выступила с докладом «Периклазоалюмографитовые изделия для зоны металла сталеразливочных ковшей» (*«Magnesia-alumina-graphite Bricks for Steel Ladle Metal Line»*). Новая технология огнеупорных изделий для зоны металла сталеразливочных ковшей была внедрена компаниями «Ternium Siderar» и «Magnesita Refractarios S. A.». Разработка периклазоалюмографитовых изделий связана с проблемами наличия глиноземистых сырьевых материалов и возросшим спросом на чистые стали. Эти изделия содержат спеченный MgO как главный наполнитель, а в матрице имеется баланс между антиоксидантами, зернами корунда и тонкими частицами MgO. Изделия обладают хорошими показателями: улучшенной открытой пористостью, повышенной термической стабильностью и коррозионной стойкостью. Исследования опытных образцов после коррозионных испытаний провели с помощью оптической и электронной микроскопии (SEM), а также дисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Выявленная химическая коррозия в периклазоалюмографитовых огнеупорах под воздействием ковшевого шлака — это проникновение шлака в матрицу и вокруг зерен MgO, разрыхление зерен MgO и образование шпинельного барьера. Этот непрямой коррозионный процесс замедляет износ огнеупорного материала.

• Stephan Clasen из Группы исследований огнеупоров (*Forschungsgemeinschaft Feuerfest*), Германия, сделал доклад «Инфильтрация жидкой стали в продувочные пробки ков-

шей» (*«Infiltration of Molten Steel into Ladle Purging Plugs»*). Внепечная обработка стали обеспечивает регулирование химического состава и улучшение чистоты и однородности расплавленной стали. Критический этап этого процесса — продувка металла газом. Продувка выравнивает химический состав и температуру расплавленной стали и повышает чистоту расплава путем активации всплывания включений. Кроме того, в процессе продувки газом реализуются быстрое растворение и смешивание легирующих добавок. Обработка путем продувки газом может быть эффективна только с хорошо работающими продувочными пробками. Практика показала, что сталь проникает в газовые каналы продувочных пробок, затвердевает и блокирует газовые каналы, что влияет на газовую продувку. На процесс инфильтрации стали влияют следующие факторы: температура стали, ее состав, ферростатическое давление, керамический материал продувочных пробок, диаметр и геометрия газового канала. В производственной практике эти факторы нельзя рассматривать отдельно друг от друга. В связи с этим были инициированы исследования в контролируемых лабораторных условиях, чтобы изучить роль каждого из упомянутых выше факторов.

• Katharina Schwarz из Университета прикладных наук в г. Кобленце (*University of Applied Science Koblenz*), Германия, представила доклад «Исследование проникновения жидкой стали в продувочные пробки» (*«Investigation of the Tendency of Liquid Steel to infiltrate Purging Plugs»*). Инфильтрация жидкой стали в газовые каналы продувочных пробок все еще является нерешенным вопросом во внепечной обработке стали. Это, как правило, вызывает закупоривание щелей. Впоследствии продувка снижается или в худшем случае полностью прекращается. Дедуктивное исследование в области совершенствования продувочных пробок сдерживается отсутствием подходящих методов испытаний, которые способны моделировать производственные условия на металлургическом предприятии в лабораторных масштабах. Экспериментальная установка должна обеспечивать возможность провести анализ проникновения металла в щели продувочной пробки. Были запланированы и опробованы две различные экспериментальные установки с обычными огнеупорными смесями. ■

(Продолжение следует)

Получено 04.12.13

© И. Г. Очагова

(ОАО «Черметинформация»), 2013 г.

## ABSTRACTS

UDC 666.76:[669.18.046.5:621.746.32

### **The development of steel teeming ladle's lining (service experience review)**

S'emshchikov N. S., Kondrukevich A. A., Bel'maz K. N., Minaev Ya. A. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 3—8.

The steel teeming ladle's lining designs best known at the present technology level are regarded in the article. The advantages and limitations of the designs are accounted. The examples of local hot patching of steel teeming ladles are presented. Ill. 7. Ref. 2.

**Key words:** steel teeming ladle, lining, refractories, reinforced, heat insulating and working layers of the lining.

UDC 669.162.216.22:666.762.1

### **From the planning to the materialization of plans into the action: "Riverside Refractories & Equipment Inc." Company carries the tests of the tapping ease using both of drilling and the abrasive grinding disk**

Alexander M., Garten V. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 9—13.

The investigating results carried out by the "Riverside" Company which made a specialty out of taphole mixtures, with regard to the tapping by two methods: one is the drilling and another is the notch breaking by the abrasive grinding disk are given in the article. The development-well success ration dependence on four given testing's parameters was studied: the taphole mixture's development-well success ration in hot state under the load; the drill's degree of penetration into the taphole mixture; the abrasion loss; and the bulk loss of the taphole mixture. Besides, the relationship between alumina content in the taphole mixtures and the development-well success ration was examined. In conclusion the results of the abrasive wear tests were briefly represented and the summary was made on the proposed tapping methods. Ill. 7. Tab. 1.

**Key words:** taphole mixtures, drill tapping, tapping with abrasive grinding disk, development-well success ration.

UDC 666.762.1:666.974.2].001.8

### **Chromium hexaluminate-calcium aggregate and the concretes on its base**

Zamyatin S. R., Gel'fenbein V. E., Zhuravlev Yu. L., Babakova O. L. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 15—18.

The constant-volume high-alumina bonit aggregate on base of the burnt slag formed in course of metal chrome producing is developed in the article. The content of calcium hexaluminate  $\text{CaO} \cdot 6(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$  increases at various temperatures from 55—60 till 70 % (the burning at 1450 °C) and till 90 % (the burning at 1650 °C). The low-cement concretes are developed on base of chrome bonit aggregate. Ill. 2. Ref. 8. Tab. 4.

**Key words:** chromium bonit, refractory aggregate, phase composition, thermo-mechanical characteristics, low-cement concrete.

UDC 666.762.1.043.2.001.8

### **Heat-insulating production of LLC "Commercial industrial enterprise "NK"**

Zubashchenko R. V. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 19—21.

The information on the heat-insulating materials developed in LLC "Commercial industrial enterprise "NK" are given in the article. The general physical and chemical properties of the energy conserving and resource-saving production are presented. Ill. 2. Ref. 8. Tab. 1.

**Key words:** energy saving, heat-insulating production, heat conductivity, lining, high temperature heat-insulating materials.

UDC 622.367.6:621.928.6

### **The characteristics of asbestos-containing rock, and the selecting of rational parameters for the separating machines**

Afanas'ev A. I., Lyaptsev S. A., Potapov V. Ya. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 22—25.

The results of theoretical and experimental investigations for the asbestos-contained rock are given in the article. On base of these results the mathematical simulation approach is devised for both the modeling of the partitioning process and calculation of separation machines' design parameters. Ill. 2. Ref. 8.

**Key words:** drum-rack friction separator, asbestos rock, friction and elastic characteristics, mathematical simulation.

UDC 666.762.2.017:620.197.7

### **The quartz ceramics bulk-saturated with organic-silicon binder having spirocyclic structure**

Suzdal'tsev E. I., Gorelova E. V. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 27—29.

The method of high-heat-resistant pore-free quartz ceramics is presented in the article, the method consisting in the bulk saturation of ceramics with the methyl-phenyl-spirosiloxane solution in acetone (MPSS-8) which presents the organic-silicon binder with spirocyclic structure. The general properties of the obtained material as well as the results of its trying and testing in the radio-technical devices are given. Ref. 2. Tab. 1.

**Key words:** bulk-saturated quartz ceramics, organic-silicon binder, polymerization, radio-technical products.

UDC 666.32.11-492.2.004.12

### **Physical and mechanical properties of ceramic materials obtained by the chemical dispersion of aluminum alloy AK12**

Shlyapin A. D., Omarov A. Yu., Tarasovskii V. P., Trifonov Yu. G., Airich A. I. // New Refractories. — 2013. — No 7. — P. 30—33.

In course of chemical dispersion of aluminum alloy AK12 the aluminum hydroxide precipitates which contains a lot of Na ions. These ions influence the structure and phase composition of ceramics samples as due to the sintering the second phase nepheline forms which spreads uniformly over the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  grain boundaries. The effect of initial  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder's flushing level on the physical and mechanical properties of ceramics manufactured of these powders such as the ultimate strength in bending, impact strength, density, porosity and resistance to cracking is investigated in the article. Ill. 1. Ref. 6. Tab. 3.

**Key words:** chemical dispersion, aluminum alloy AK12, aluminum oxide powder, ceramic material.

UDC 546.655.3/4-31: 666.763.58(510)

**Effect of CeO<sub>2</sub> on the crystalline structure of forsterite synthesized from low-grade magnesite**

Luo Xudong, Qu Dianli, Xie Zhipeng, Zhao Wenyan // *New Refractories*. — 2013. — No 7. — P. 34—38.

The influence of CeO<sub>2</sub> on the crystalline structure of forsterite synthesized from low-grade magnesite and natural silica is discussed in this paper. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize the crystalline structure and microstructure of each specimen. X'Pert plus software was used to determine the lattice parameters of each specimen. Bulk density, apparent porosity, water absorption and cold crushing strength of the test samples were tested according to standards issued by the Ministry. The results show that forsterite can be synthesized from low-grade magnesite and natural silica through solid reaction. appropriate CeO<sub>2</sub> addition is helpful to formation of forsterite. The defect caused by CeO<sub>2</sub> in the active magnesite accelerate the diffusion rate of ions. In combination of XRD, SEM and property analysis results, the optimal addition of CeO<sub>2</sub> is determined to be 0.8—1.2 %, the forsterite exhibits relatively more homogeneous grain-sized microstructure, the bulk density is 2.15—1.18 g/cm<sup>3</sup>, the apparent porosity is 29.5—30.1 %, the water absorption is 13.5—14.0 % and the cold crushing strength 13.4—14.2 MPa. Ill. 2. Ref. 16. Tab. 2.

**Key words:** low-grade magnesite, natural silica, forsterite, addition CeO<sub>2</sub>.

UDC 666.762.8:621.762.22

**The hard alloy VK8 forming on base of mechanochemically synthesized tungsten carbide**

Reva V. P., Onishchenko D. V., Petrov V. V., Kim V. A., Evstigneev A. I. // *New Refractories*. — 2013. — No 7. — P. 39—43.

The possibility is regarded in the article to apply the mechanochemically synthesized tungsten carbide powder for hard alloy VK8 manufacturing. The results of comparison tests are given for the physical, mechanical and performance characteristics of the hard alloy produced due to different processing conditions. Ill. 2. Ref. 7. Tab. 2.

**Key words:** mechanochemical synthesis, tungsten carbide, hard alloy VK8, sintering conditions, cutting blades.

UDC 666.76.043.2:66.046.4

**Combustion processes when burning of the heat-insulating ceramic material on base of oil shale wastes**

Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S. // *New Refractories*. — 2013. — No 7. — P. 44—49.

The combustion behavior of the heat-insulating materials made out of the production wastes without using any conventional natural materials is investigated in the article. It is shown that when ceramic heat-insulating materials are heat-treated at 400—600 °C the main part of volatile substances are removed from the products; when it is heat treated at 1050—1100 °C the iron reduction accelerates considerably; and at 1100 °C the organic compounds practically are absent in the product. Ill. 1. Ref. 20. Tab. 3.

**Key words:** heat-insulating material, oil shale wastes, ash-slag mixture, inter slate clay, combustion, pyro-carbons, iron oxide, hydrocarbons.

UDC 666.762.1+666.762.5]:666.1.031.2/6

**Electro-fused aluminum-zirconium-silica (AZS) refractories for high-production glass-melting furnaces**

Dzyuzer V. Ya. // *New Refractories*. — 2013. — No 7. — P. 50—52.

The technical efficiency indexes for modern glass-melting furnaces are presented in the article. The structures are given for the refractory and heat-insulating materials which are used in the modern glass-melting furnace's bricklaying. The requirements to the quality are laid down for the electro-fused baddeleyite-corundum refractory applied in the high-production glass melting furnaces. The reasonable AZS-refractory structure is offered for the hot zone brickwork of the glass-melting furnace with a productivity rate of 280 tons per day. Ill. 1. Ref. 4. Tab. 3.

**Key words:** glass-melting furnaces, baddeleyite-corundum refractories, glass removal rate.

UDC 621.928.9:666.76.001.8

**Granular dust filters calculation for the analysis of environmental problems in refractory production**

Krasovitskii Yu. V., Lobacheva N. N. // *New Refractories*. — 2013. — No 7. — P. 53—56.

The general kinetic regularities are regarded in the article for the dust and gas flows through the granular filtering diaphragms. The calculated dependence both for generalized and dimensional variables are offered for the most important type of characteristic defining that is for the pressure differential at the filtering diaphragms. Such approach allows to value the energy requirements for various operational conditions, and in particular in case of refractories production. Ref. 7. Tab. 2.

**Key words:** granular dust filters, granular layers, environmental problems of refractory production, mathematical models for filtering simulation.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**MS&T'13<sup>®</sup>**

**Materials Science & Technology  
2013 Conference & Exhibition  
October 27-31, 2013 | Montreal, Quebec Canada**