



НОВЫЕ

ISSN 1683-4518

ОГНЕУПОРЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Огнеупоры в тепловых агрегатах ▲

Сырьевые материалы ▲

Производство и оборудование ▲

Теплотехника ▲

Научные исследования и разработки ▲

Качество и сертификация ▲

2

ФЕВРАЛЬ 2017



МАГНЕЗИТ
вместе создавать

6–7 АПРЕЛЯ
2017 ГОДА

МОСКВА. НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА – ЖУРНАЛЫ
«НОВЫЕ ОГНЕУПОРЫ», «СТАЛЬ»

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ОГНЕУПОРЩИКОВ И МЕТАЛЛУРГОВ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МЕТАЛЛУРГИЯ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ. ОГНЕУПОРНЫЕ И КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОГНЕУПОРОВ И КЕРАМИКИ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.



Среди постоянных участников и партнеров конференции:

Группа Магnezит, Cofermin Rohstoffe GmbH&Co, Almatix GmbH, Elkem GmbH, АО «Боровичский комбинат огнеупоров»,
ОАО «ДИНУР», Богдановичское ОАО «Огнеупоры», ООО «Кералит», ОАО «Сухоложский огнеупорный завод»,
ООО НПП «Вулкан-ТМ», ЗАО «НТЦ «Бакор», ООО «ВПО Сталь», ООО «Феррокомплекс», ООО «Дружковский огнеупорный завод»,
Imerys Metalcasting Germany GmbH, Zschimmer&Schwarz GmbH, Kerneos SA, LAEIS GmbH, Weerulin, ООО «РХИ ВОСТОК»,
VGH Viktoria Garten, Поселье Эрцконтор ГмбХ, Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG,
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ПАО «Северсталь», ЗАО «Росметаллкомплект»,
ООО «Тайгинский горно-обогатительный комбинат», АО «Уральская Сталь», ПАО «Челябинский металлургический комбинат»,
ООО «Техпром», ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», ОАО «Волжский абразивный завод», АО УК «Химический парк Тагил», ООО «Торнадо-Торкрет»

НИТУ «МИСИС», 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4

ТЕЛ.: +7 (963) 665-67-16, E-MAIL: OGNEMET@MISIS.RU, WWW.KOM.MISIS.RU

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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



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

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

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

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

Подписано в печать 14.02.17. Формат 60x84 1/8.
Бумага мелованная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,75.
Заказ

ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ

Зубашченко Р. В. Футеровка малогабаритной туннельной печи высокоглиноземистыми изделиями на основе алюмосиликатного волокна.....3

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

Давыдов С. Я., Золкин А. П., Шварёв В. С., Золкина Л. А. Определение динамических характеристик навески ковша крутонаклонного ковшового ленточного конвейера.....6

Беспальков А. А., Лукашук О. А., Кожушко Г. Г. Модернизация узлов трубчатого скребкового конвейера.....12

ТЕПЛОТЕХНИКА

Дзюзер В. Я. Обобщенный анализ тепловой работы стекловаренных печей.....15

Нижегородов А. И. Энергоэффективная электрическая печь с подвижной подовой платформой для обжига вермикулита.....19

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Беляков А. В., У Зо. Е. Мо., Попова Н. А., Мин Й. А., Каримова В. А. Упрочняющие связующие для пористой проницаемой керамики с наполнителем из электроплавленного корунда.....25

Колесников С. А., Бамборин М. Ю., Воронцов В. А., Проценко А. К., Чеблакова Е. Г. Формирование уровня теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала.....30

Пивинский Ю. Е., Дякин П. В., Колобов А. Ю. Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 9. Получение и свойства смешанных ВКВС состава: плавный бокситокорунд, кварцевое стекло, реактивный глинозем. Дилатометрические исследования материалов на их основе.....39

Зайцев С. В., Дороганов В. А., Дороганов Е. А., Евтушенко Е. И. Исследование искусственных керамических вяжущих муллитокарбидкремниевых состава и композиций на их основе.....46

Манылов М. С., Филимонов С. В., Шорникова О. Н., Малахо А. П., Авдеев В. В. Теплофизические свойства углерод-углеродных материалов на основе пенографита.....50

Кузин В. В., Фёдоров М. Ю., Волосова М. А. Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — тепловой поток.....54

КАЧЕСТВО И СЕРТИФИКАЦИЯ

Коварская Е. З., Московенко И. Б., Потапов А. И. Разработка рекомендаций по освоению неразрушающего контроля физико-механических свойств и качества изделий из углеродных материалов.....61

ИНФОРМАЦИЯ И ХРОНИКА

Новости предприятий

Беремся за новое и выигрываем (беседа с ученым).....67

Abstracts.....69

REFRACTORIES IN THE HEAT UNITS

Zubashchenko R. V. The lining of the small capacity tunnel type kiln with the high alumina-silicate fiber refractories.....3

MANUFACTURING AND EQUIPMENT

Davydov S. Ya., Zolkin A. P., Shvarev V. S., Zolkina L. A. Dynamic response definition of the bucket hinge for the high-angle bucket conveyor.....6

Bespal'kov A. A., Lukashuk O. A., Kozhushko G. G. The upgrading of the tubular scraper conveyor junction points....12

HEAT ENGINEERING

Dzyuzer V. Ya. Generalized analysis of the glass-melting furnaces thermal performance.....15

Nizhegorodov A. I. Energy efficient electric kiln with a mobile bottom platform for vermiculite firing.....19

SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT

Belyakov A. V., U Zo. E. Mo., Popova N. A., Min Y. A., Karimova V. A. Strengthening binders for the porous permeable ceramics with the electro-fused corundum aggregate.....25

Kolesnikov S. A., Bamborin M. Yu., Vorontsov V. A., Protsenko A. K., Cheblakova E. G. Thermal conductivity level improving for carbon-carbon composite materials.....30

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. The investigation of shaped and non-shaped refractories formation on base of high-alumina HCBS. Part 9. Preparation and properties of the mixed HCBS consisting of fused bauxite-corundum, quartz glass, reactive alumina. Dilatometric investigation of the materials on its base.....39

Zaitsev S. V., Doroganov V. A., Doroganov E. A., Evtushenko E. I. The investigation of the artificial ceramic mullite-silicon-carbide binders and of the composites on their base.....46

Manylov M. S., Filimonov S. V., Shornikova O. N., Malakho A. P., Avdeev V. V. Thermal-physical properties of the carbon-carbon materials on base of graphite foam...50

Kuzin V. V., Fedorov S. Yu., Volosova M. A. The nitride ceramics surface layer stress state transformation under the variation of the TiC-coating thickness. The applied load is the heat current.....54

QUALITY AND CERTIFICATION

Kovarskaya E. Z., Moskoventko I. B., Potapov A. I. Recommendations development on the mastering of the non-destructive testing for the carbonaceous productions' quality and physical and mechanical properties.....61

INFORMATION

The news from Enterprises

We break new ground and we win (the dialog with a scientist)....67

Abstracts.....69

УДК 666.762.11:66.041.55

ФУТЕРОВКА МАЛОГАБАРИТНОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫМИ ИЗДЕЛИЯМИ НА ОСНОВЕ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО ВОЛОКНА

Показаны структура и свойства разработанных высокоглиноземистых изделий на основе алюмосиликатного волокна. Представлены данные по промышленному применению изделий в рабочем слое футеровки малогабаритной туннельной печи.

Ключевые слова: туннельная печь, футеровка, теплоизоляционные изделия, волокнистые материалы, кинетика спекания, огнеупоры.

В настоящее время достаточно широко в футеровке промышленных тепловых агрегатов используются теплоизоляционные материалы. Очевидно, что применение теплоизоляционных изделий позволяет существенно снизить расход топлива и электроэнергии. Ассортимент изготавливаемых теплоизоляционных изделий делят на два типа [1]:

- изделия для защищенной изоляции;
- изделия для открытой изоляции.

Защищенная изоляция не подвергается разрушающему действию высокой рабочей температуры печи, шлаков, пыли, газов и др. В кладке печи она выполняет лишь роль теплоизолятора. Открытая изоляция является теплоизолятором, и в то же время противостоит действию всех названных агрессивных факторов.

Для создания пористой структуры в теплоизоляционных материалах применяют различные методы. Наибольшее применение нашли метод выгорающих добавок и пенокерамический [2, 3]. Известны и другие методы, в частности с применением волокнистых материалов. Такие изделия применяют в качестве теплоизоляционного материала и в качестве рабочего (незащищенного) слоя футеровки, не подвергающейся действию расплавов, агрессивных газовых сред, истиранию, механических ударов и газовых потоков со скоростью более 10 м/с [4].

В настоящее время в огнеупорной промышленности широкое распространение получили туннельные печи. Традиционные волокнистые материалы не отвечают требованиям, предъявляемым к футеровке высокотемпературных печей данной конструкции. Известно, что кри-

сталлизация, протекающая в стеклообразных волокнах при нагревании, ограничивает температурный интервал применения изделий на их основе до 1150–1300 °С. Появляющиеся при нагреве микроструктурные образования, соизмеримые с диаметром волокон, вызывают резкое снижение их прочности, волокна становятся хрупкими и дают усадку [2]. В процессе эксплуатации при повышенных температурах это приводит к разрушению теплоизоляционного слоя и, как следствие, к нежелательным тепловым потерям.

В ЗАО «ПКФ «НК» освоено производство изделий МЛЛ-1,35, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к футеровке туннельной печи. Изделия на неорганической связке изготовлены из высокоглиноземистого легковесного заполнителя, сцепленного круглыми, тонкими, извилистыми алюмосиликатными волокнами, контактирующими в отдельных точках между собой и с зернами заполнителя. Основными кристаллическими фазами изделия являются корунд, муллит и α -кристобалит.

Физико-химические свойства теплоизоляционных изделий МЛЛ-1,35:

Массовая доля, %:

Al ₂ O ₃ , не менее.....	63
Fe ₂ O ₃ , не более.....	1,0
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не более.....	1,35
Остаточные изменения размеров при нагреве до 1500 °С, %, не более.....	1,0
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее.....	9,0
Теплопроводность при средней температуре 650±25 °С, Вт/(м·К), не более.....	0,45
Максимальная температура применения, °С.....	1500

Известно, что волокна могут образовывать с неорганической связкой композиции двух видов [5]: беспористые, в которых волокна армируют неорганическую матрицу, и высокопористые, в которых волокна упрочнены неорганической связкой, незначительно снижающей пористость и тепловое сопротивление волокнистого материала.



Р. В. Зубашенко
E-mail: zroman7777@mail.ru

В освоённой технологии реализован второй вариант (рис. 1). Очевидно, что эксплуатационные свойства изделий во всем диапазоне пористости определяются величиной контактной поверхности. При спекании поверхность контакта заполнителя, волокон и неорганической связки возрастает. Исходя из этого, была изучена кинетика процесса спекания полученного композиционного материала.

Протекание спекания описывалось следующим уравнением [6]:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot (1 - \alpha)^n, \quad (1)$$

где α — параметр, характеризующий степень спекания материала Y/Y_{\max} ; Y — текущая линейная усадка образца, Y_{\max} — максимально возможная усадка образца; τ — время; k_0 — предэкспоненциальный множитель; T — температура; E — энергия активации процесса; R — универсальная газовая постоянная; n — показатель степени.

На основании данных об усадке изделий, полученных при двух скоростях нагрева, были построены зависимости величины относительной усадки от температуры $\alpha = f(T)$ для изделий кажущейся плотности от 1,3 до 1,7 г/см³. Определение составов с указанным диапазоном кажущейся плотности проводили с использованием симплекс-решетчатого метода планирования эксперимента (планы Шеффе неполного третьего порядка).

Проведя графическое дифференцирование по времени изменения величины относительной усадки α , определили изменение скорости процесса спекания $d\alpha/d\tau = f(\tau)$.

Энергию активации процесса определяли исходя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \omega_1 = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right) \cdot (1 - \alpha)^n; \\ \omega_2 = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right) \cdot (1 - \alpha)^n, \end{cases} \quad (2)$$

где ω_1 и ω_2 — скорости исследуемого процесса.

В данной системе k_0 , E и $(1 - \alpha)^n$ для обоих уравнений равны ($\alpha = \text{idem}$). Поделив первое уравнение на второе и логарифмируя полученное уравнение, определили энергию активации

$$E = \frac{R \cdot \ln(\omega_1/\omega_2)}{1/T_2 - 1/T_1}. \quad (3)$$

С этой целью по данным зависимостей $\alpha = f(T)$, $\tau = f(T)$ и $d\alpha/d\tau = f(\tau)$ в неизотермических условиях для различных значений ω были определены температуры и соответствующие им скорости

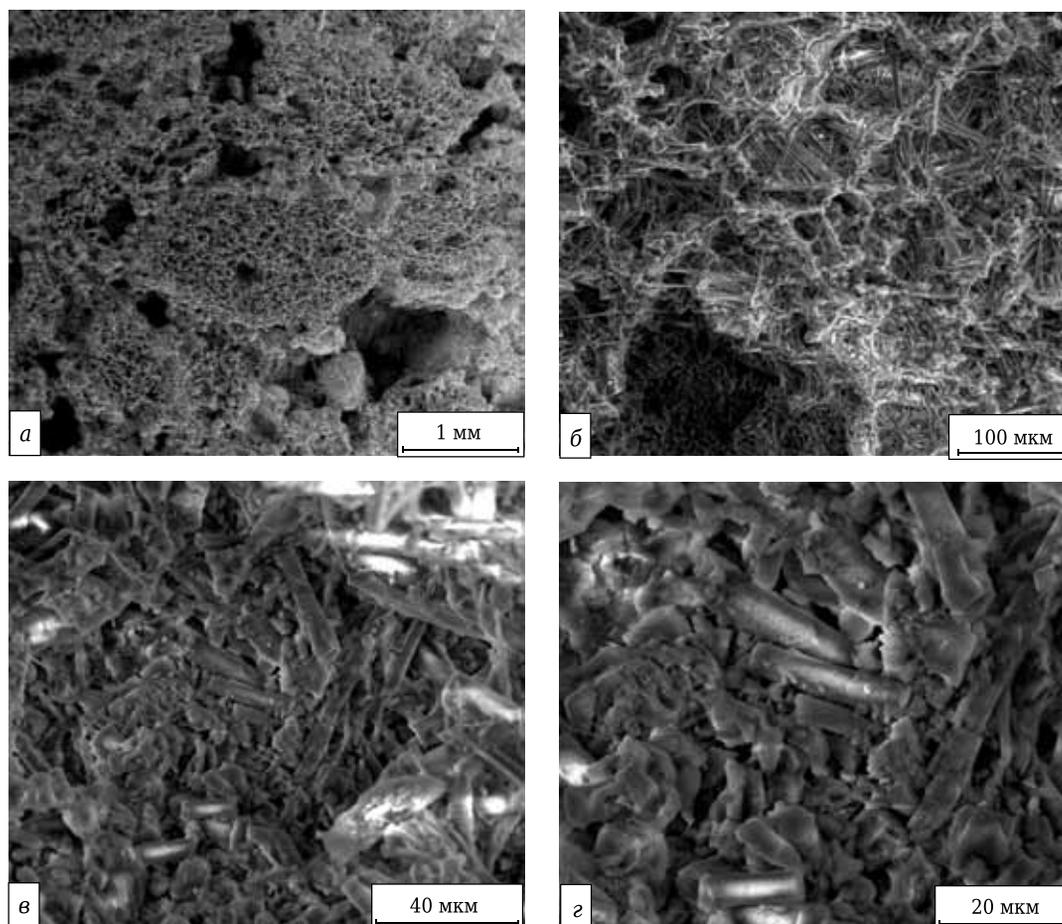


Рис. 1. Микроструктура изделий МЛЛ-1,35 при различном увеличении: а — $\times 70$; б — $\times 600$; в — $\times 2040$; г — $\times 3790$

процесса спекания, на основании которых проведено вычисление значений энергии активации.

Для нахождения предэкспоненциального множителя k_0 и показателя степени n кинетического уравнения уравнение (1) преобразовали к следующему виду:

$$\ln\left[\omega \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha). \quad (4)$$

Для двух фиксированных значений ω_1 и ω_2 , которым соответствуют T_1 и T_2 , а также α_1 и α_2 , составили логарифмическую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ln\left[\omega_1 \cdot \exp\left(\frac{E}{RT_1}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha_1); \\ \ln\left[\omega_2 \cdot \exp\left(\frac{E}{RT_2}\right)\right] = \ln k_0 + n \cdot \ln(1 - \alpha_2). \end{cases} \quad (5)$$

На основании рассчитанных данных были построены графики зависимости $\ln[\omega \cdot \exp(E/RT)]$ от $\ln(1 - \alpha)$. На аппроксимированной прямой были выбраны две точки, конкретные координаты которых подставляли в систему уравнений (5). Решив полученные системы уравнений, определили значения k_0 и n .

Решение кинетических уравнений позволило установить влияние соотношения компонентов шихты на энергию активации и температуру спекания изделий и определить область составов, в наибольшей степени удовлетворяющих необходимым требованиям.

Разработанные изделия были установлены в рабочем слое зоны обжига высокотемпературной малогабаритной туннельной печи ЗАО «ПКФ «НК», работающей при максимальной темпера-



Рис. 2. Высокотемпературная туннельная печь ЗАО «ПКФ «НК»

туре 1480 °С (рис. 2). Печь используется преимущественно для обжига теплоизоляционных алюмосиликатных изделий [7, 8]. До установки волокнистых изделий МЛЛ-1,35 рабочий слой футеровки выполняли из корундовых изделий марки КСП (ТУ1595-008-00188162-96).

Теплотехнический расчет показал, что удельный тепловой поток после замены плотных корундовых изделий на изделия МЛЛ-1,35 снизился примерно на 20 %. Туннельная печь после изменения структуры футеровки эксплуатируется с 2012 г. Замечаний при работе печи в течение всего срока эксплуатации не было. Таким образом, результаты проведенной работы позволяют рекомендовать освоение изделия для рабочего (незащищенного) слоя футеровки подобных тепловых агрегатов.

Библиографический список

1. Мамыкин, П. С. Огнеупорные изделия (свойства, технология, изготовление и служба в промышленных печах) / П. С. Мамыкин. — Свердловск. : Metallurgizdat, 1955. — 487 с.
2. Алленштейн, Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания : справочник / Й. Алленштейн и др. ; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау ; пер. с нем. — М. : Интернет Инжиниринг, 2010. — 392 с.
3. Стрелов, К. К. Технология огнеупоров / К. К. Стрелов, И. Д. Кащеев, П. С. Мамыкин. — М. : Metallurgiya, 1988. — 528 с.
4. ГОСТ 23619-79. Материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые стекловолокнистые. Технические условия.
5. Кац, С. М. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы / С. М. Кац. — М. : Metallurgiya, 1981. — 274 с.
6. Гропянов, В. М. Неизотермический метод исследований кинетики спекания материалов, контролируемой двумя механизмами / В. М. Гропянов, В. Г. Аббакумов // Порошковая металлургия. — 1976. — № 7. — С. 36-41.
7. Зубащенко, Р. В. Алюмосиликатные энерго- и ресурсосберегающие огнеупорные изделия / Р. В. Зубащенко // Новые огнеупоры. — 2011. — № 3. — С. 147-149.
8. Зубащенко, Р. В. Aluminosilicate energy- and resource-saving refractory articles / R. V. Zubashchenko // Refractories and Industrial Ceramics. — 2011. — Vol. 52, № 2. — P. 143-145.
9. Зубащенко, Р. В. Теплоизоляционные изделия ЗАО «ПКФ «НК» / Р. В. Зубащенко // Новые огнеупоры. — 2013. — № 7. — С. 19-21. ■

Получено 29.08.16
© Р. В. Зубащенко, 2017 г.

Д. т. н. С. Я. Давыдов¹ (✉), А. П. Золкин¹, В. С. Шварёв¹, Л. А. Золкина²

¹ ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»,
Екатеринбург, Россия

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
Екатеринбург, Россия

УДК 621.867.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВЕСКИ КОВША КРУТОНАКЛОННОГО КОВШОВОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Предложен новый вариант крутонаклонного ковшового ленточного конвейера без проскальзывания тяговых лент относительно обечаек барабанов. Выполнена оценка собственных колебаний ковшей в процессе их движения с учетом суммарной жесткости двух объединенных лент и зажатых между ними планок. Определена резонансная скорость лент конвейера. Получено значение коэффициента динамичности.

Ключевые слова: крутонаклонный ленточный конвейер, ковши, тяговая способность, жесткость, планка, частота колебаний, резонансная скорость, гибкие ветви лент, объединенные ленты.

Разработка высокопрочных прорезиненных лент, особенно армированных стальными тросами и стальной сеткой, позволила применять крутонаклонные ковшовые ленточные конвейеры [1–4] для транспортировки материала на значительную высоту.

Недостатком известных крутонаклонных ковшовых конвейеров, например для горячего клинкера цементного завода ОАО ГМК «Норильский никель» и горячего агломерата Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината [1, 4], является проскальзывание гладких поверхностей обечаек барабанов и поверхностей тяговых лент при значительных тяговых нагрузках. В результате происходит перекося одной ветви лент с ковшами относительно другой, который приводит к нарушению работы всего конвейера или к порыву лент. Дополнительные сопротивления движению лент и незапланированные остановки конвейера отражаются на его производительности и энергозатратах.

Ковшовый ленточный конвейер [5] (рис. 1) имеет огибающие обечайки приводных и натяжных двухкорпусных барабанов 1 и 2, тяговые и несущие ленты 3 и 4. Между тяговыми и несущими лентами 3 и 4 размещены ковши 5. Тяговые и несущие ленты 3 и 4 с размещенными между ними ковшами 5 опираются на роликкоопоры 6 и 7 грузонесущей и порожняковой ветвей конвейера соответственно.

Приводной и натяжной барабаны 1 и 2 для пропуска ковшей 5 выполнены из двух корпусов 8, установленных на общем валу 9. Роликкоопоры 6 и 7 и приводной и натяжной барабаны 1 и 2 установлены на раме 10 конвейера. Между тяговыми и несущими лентами 3 и 4 закреплены крепежными элементами 11 поперечные элементы жесткости (планки) 12 из пружинного материала. Со стороны ковшей 5 торцы 13 обечаек корпусов 8 приводного барабана 1 снабжены зацепами 14.

Зацепы 14 расположены на расстоянии L друг от друга по длине окружности обечаек корпусов 8 приводного барабана, определяемом по зависимости $L = \pi D/n$, где D — диаметр обечаек корпусов приводного барабана; n — количество зацепов, шт. При этом расстояние L зацепов друг от друга по длине окружности обечаек корпусов приводного барабана 1 должно быть равно длине L шага планок 12.

Наличие зацепов 14 с возможностью зацепления с крепежными элементами 11 планок 12 при вращении приводных барабанов 1, особенно при запуске приводов, исключает проскальзывание тяговых лент 3 относительно обечаек 8 корпусов барабана, приводящее к возможным перекосям ковшей с лентами. Отсутствие проскальзывания лент 3 не только повышает надежность работы конвейера без аварийной ситуации, но и уменьшает энергозатраты при сохранении производительности конвейера. Нагрузка от ковша передается на ленты через планки.

Схема крепления ковша на гибких ветвях объединенных лент ленточного конвейера в недеформированном состоянии лент и планок показана на рис. 2. Оси координат $OXYZ$ выбраны при недеформированном состоянии лент и пла-



С. Я. Давыдов

E-mail: davidovtrans@mail.ru

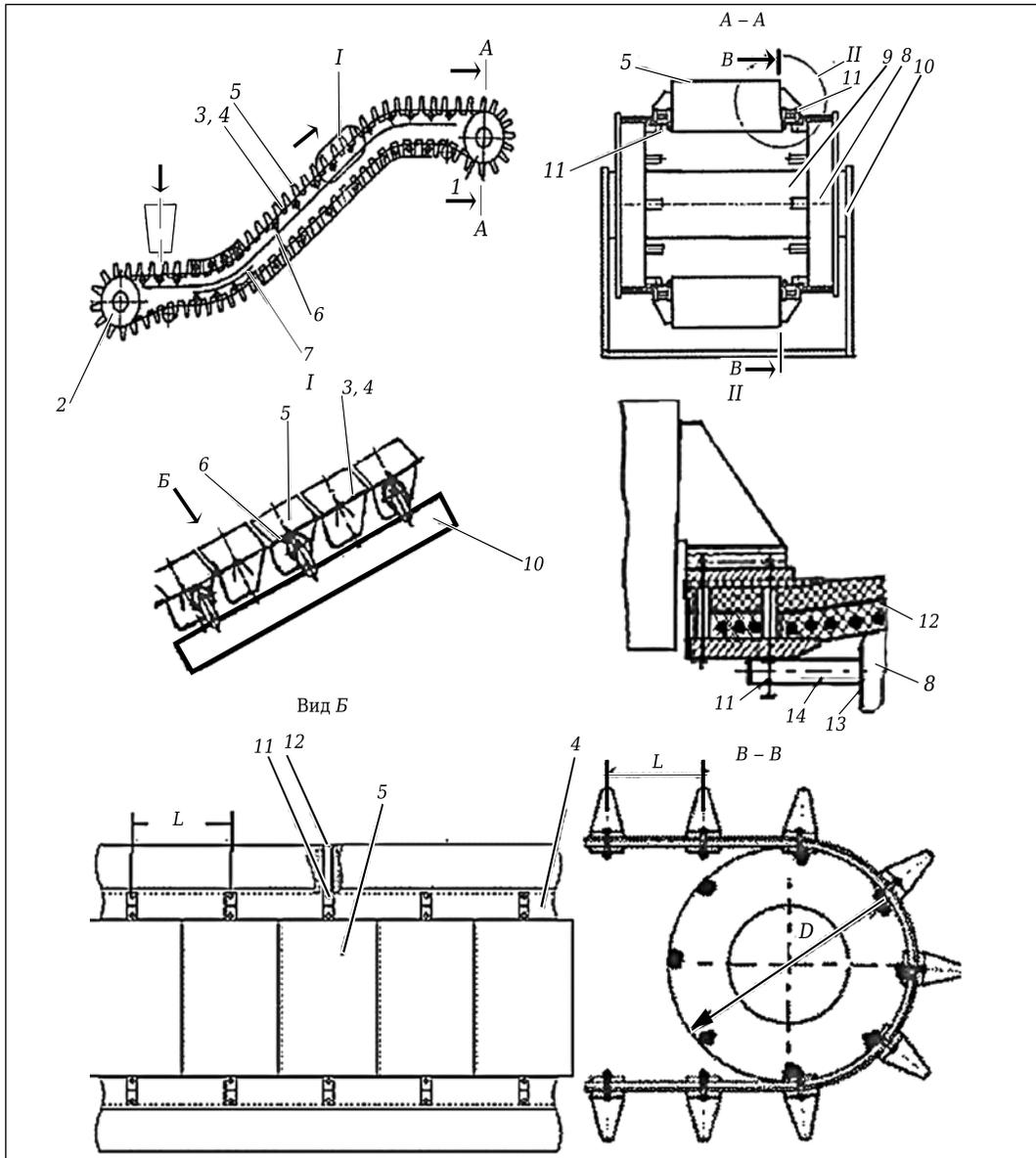


Рис. 1. Ковшовый ленточный конвейер

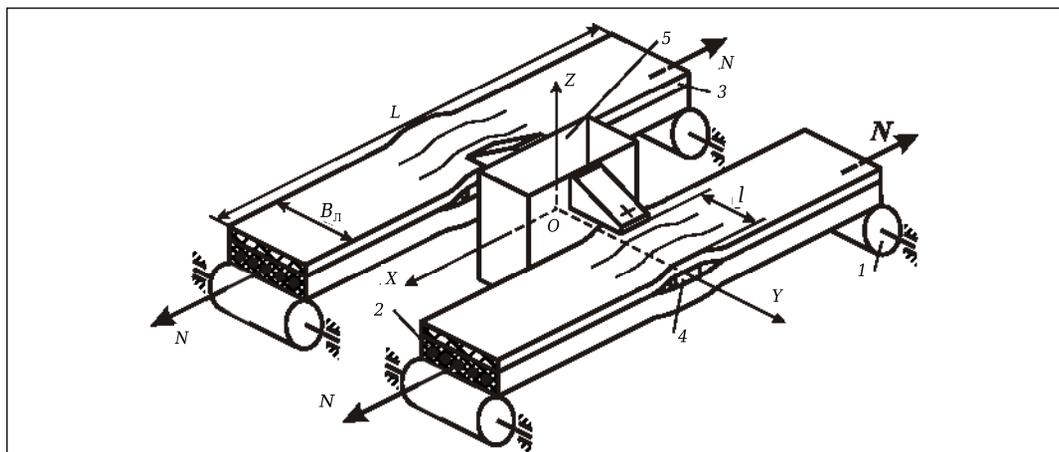


Рис. 2. Схема крепления ковша на гибких ветвях объединенных лент ленточного конвейера: 1 — ролик (роликоопора); 2 — тяговая (резинотросовая) лента; 3 — несущая (резинотканевая) лента; 4 — планка (поперечный элемент жесткости); 5 — ковш; L — шаг роликов; l — длина изгибаемого участка планки; N — растягивающее усилие в лентах; $B_{л}$ — ширина объединенных лент; $OXYZ$ — прямоугольная декартова система осей координат

нок конвейера. Координатная плоскость OXY горизонтальна. Плоскость OXZ вертикальна и является плоскостью симметрии конвейера. Координатная ось OX совпадает с направлением движения грузовой ветви конвейера. Координатная ось OY совпадает с геометрической осью недеформированной планки.

Колебания ковша на гибких навесках (ветвях ленты) рассматриваются при следующих допущениях:

- тяговая и несущая ленты считаются объединенной лентой с приведенным поперечным сечением;

- в недеформированном состоянии плоскость грузонесущей ветви объединенной ленты, составленной из механически скрепленных между собой тяговой и несущей лент, горизонтальна;

- оси опорных роликов грузовой ветви неподвижны, лежат в плоскости OXY и направлены перпендикулярно к плоскости OXZ ;

- центр массы загруженного ковша лежит в плоскости OXZ ;

- в пролете между роликами находится один ковш, он расположен посередине пролета и является точечной массой, совершающей вертикальные колебания;

- вертикальные перемещения ковша вызваны двумя независимыми друг от друга причинами:

- изгибом в плоскости OYZ планки с присоединенными участками тяговой и несущей лент (далее по тексту — боковой изгиб);

- изгибом объединенной ленты в плоскости, параллельной OXZ (далее по тексту — продольный изгиб);

- при боковом изгибе деформируемый элемент (планка) зашпелен в точке крепления к ковшу;

- при продольном изгибе объединенная лента зашпелена в вертикальных плоскостях, проведенных через оси опорных роликов.

Для выбора оптимальных эксплуатационных и конструктивных параметров ковшовой ленточного конвейера с целью уменьшения энергозатрат, повышения надежности и увеличения тяговой способности необходимо определить частоту p собственных колебаний ковша и, задавшись частотой ω возмущающей силы, найти значение коэффициента динамичности. Расчетная схема боковой ветви ленты подвески ковша представлена на рис. 3.

Жесткость C , Н/м, одной навески ковша находим по зависимости [6]:

$$C = C_{л}C_{б}/(C_{л} + C_{б}). \quad (1)$$

Частоту p , 1/с, собственных колебаний ковша находим по зависимости [6]:

$$p = \sqrt{2C/m}. \quad (2)$$

Расчетная схема для определения жесткости навески при боковом изгибе показана на рис. 4.

Жесткость планки $C_{б}$, Н/м, с присоединенными лентами определяется по зависимости [7]:

$$C_{б} = 3E_{с} \frac{j_{б}^3}{l^3}. \quad (3)$$

Здесь $E_{с}$ — модуль упругости стали; $j_{б}$ — момент инерции приведенного сечения планки с присоединенными лентами, воспринимающими боковой изгиб.

Поперечное сечение планки с участками тяговой и несущей лент, совместно работающими при боковом изгибе (см. рис. 2), показано на рис. 5.

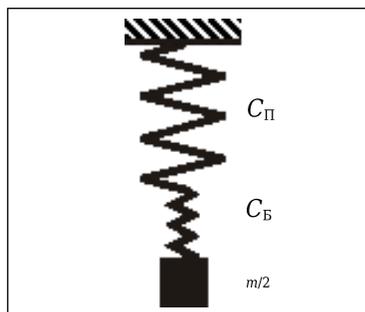


Рис. 3. К определению жесткости гибкой объединенной ленты с подвешенным ковшем: m — масса ковша, Н; $C_{л}$ — приведенная жесткость объединенных лент при продольном изгибе, Н/м; $C_{б}$ — приведенная жесткость планки с присоединенными участками лент, воспринимающими боковой изгиб, Н/м

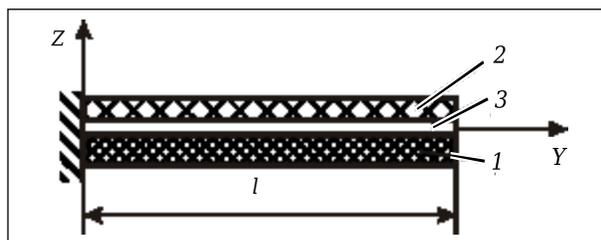


Рис. 4. К определению жесткости планки с присоединенными лентами при боковом изгибе: 1 — тяговая лента; 2 — несущая лента; 3 — планка; l — длина изогнутой части планки

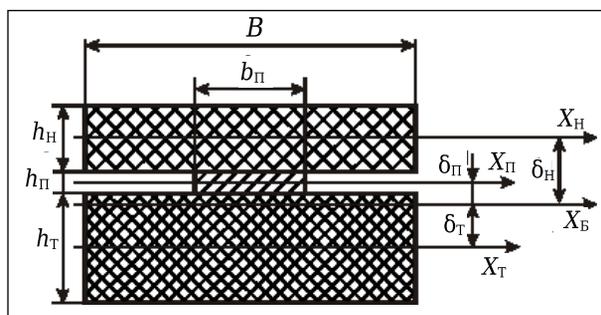


Рис. 5. Поперечное сечение планки с участками тяговой и несущей лент, совместно работающими при боковом изгибе: $X_{б}$ — главная центральная ось приведенного сечения при боковом изгибе; $X_{п}$, $X_{т}$ и $X_{н}$ — центральные оси поперечных сечений планки, тяговой и несущей лент соответственно; $b_{п}$, $\delta_{т}$, $\delta_{н}$ — расстояние от осей $X_{п}$, $X_{т}$, $X_{н}$ до оси $X_{б}$; $h_{п}$, $h_{т}$, $h_{н}$ — высота планки, тяговой и несущей лент; $b_{п}$ и B — ширина планки и лента

Расстояния от оси X_B приведенного поперечного сечения при боковом изгибе до осей X_T и X_H : $\delta_T = (h_T + h_{\Pi}) / 2 - \delta_{\Pi}$, $\delta_H = (h_H + h_T) / 2 + \delta_{\Pi}$.

Расстояние δ_{Π} от оси X_B до оси X_{Π} определяется по методике, основанной на приведении сечения, составленного из материалов с разными модулями упругости, к однородному [8].

Любая геометрическая характеристика приведенного сечения получается как для условно однородного сечения, в котором каждый элемент площади резины dS_R заменен элементом площади стали dS_C , умноженным на коэффициент приведения $k = E_R/E_C$, равный отношению модулей упругости резины E_R и стали E_C .

Геометрические характеристики приведенного сечения при боковом изгибе:

- площадь приведенного поперечного сечения

$$S_B = kBh_T + b_{\Pi}h_{\Pi} + kBh_H,$$

где $b_{\Pi}h_{\Pi}$, Bh_T и Bh_H — поперечные площади планки, участков тяговой и несущей лент, работающих совместно с планкой при боковом изгибе;

- статический момент M_{Π} относительно оси X_{Π} приведенного сечения:

$$M_{\Pi} = -\frac{kBh_T(h_T + h_{\Pi})}{2} + \frac{kBh_H(h_{\Pi} + h_H)}{2};$$

- расстояние δ_{Π} между осью X_B приведенного сечения и осью X_{Π} :

$$\delta_{\Pi} = M_{\Pi}/S_B;$$

- момент инерции j_B относительно оси X_B приведенного сечения:

$$j_B = k\left(\frac{Bh_T^3}{12} + Bh_T\delta_T^2\right) + \frac{b_{\Pi}h_{\Pi}^3}{12} + b_{\Pi}h_{\Pi}\delta_{\Pi}^2 + k\left(\frac{Bh_H^3}{12} + Bh_H\delta_H^2\right). \quad (4)$$

При вычислении момента инерции применена теорема Гюйгенса [9] о моментах инерции относительно параллельных осей:

$$j_B = \sum k_j(J_j + S_j\delta_j^2).$$

Здесь индекс j пробегает значения $j = T, \Pi, H$. Коэффициенты приведения k_j равны $k_T = k_H = k$, $k_{\Pi} = 1$. Все составные части приведенного сечения при боковом изгибе являются прямоугольниками. Поэтому площадь и момент инерции относительно собственной главной центральной оси для j -го прямоугольника определяются по формулам: $S_j = B_j h_j$ — площадь; $J_j = B_j h_j^3 / 12$ — момент инерции j -го прямоугольника. Расстояния δ_j найдены выше. Момент инерции j_B принимает минимальное значение при $b_{\Pi} = B$.

Поперечное сечение объединенных лент при продольном изгибе показано на рис. 6.

Геометрические характеристики приведенного сечения при продольном изгибе:

- площадь приведенного сечения

$$S_{\Pi} = k(B_{\Pi}h_{\Pi} - n_T \pi d^2 / 4) + n_T \pi d^2 / 4 + kB_{\Pi}h_{\Pi},$$

где n_T — количество тросов в тяговой ленте; d — диаметр троса;

- статический момент приведенного сечения относительно оси Y_T

$$M_T = \frac{kB_{\Pi}h_{\Pi}(h_T + h_H)}{2};$$

- расстояние Δ_T

$$\Delta_T = M_T/S_{\Pi};$$

- момент инерции приведенного сечения при изгибе лент

$$j_{\Pi} = k(B_{\Pi}h_{\Pi}^3/12 + B_{\Pi}h_{\Pi}\Delta_T^2) + (1 - k)n_T(\pi d^4/64 + \pi d^2 \Delta_T^2/4) + k\left(\frac{B_{\Pi}h_H^3}{12} + B_{\Pi}h_H\Delta_H^2\right). \quad (5)$$

Расчетная схема для определения вертикального перемещения ковша, вызванного боковым и продольным изгибами, показана на рис. 7.

Жесткость одной растянутой консоли (см. рис. 7, в) [7]:

$$C_K = \alpha^3 E_C J_{\Pi} / \left(\frac{\alpha L}{2} \operatorname{Ch} \left(\frac{\alpha L}{2} \right) - \operatorname{Sh} \left(\frac{\alpha L}{2} \right) \right), \quad (6)$$

где $\alpha = \sqrt{N/(E_C j_{\Pi})}$ — параметр напряженно-деформированного состояния стержня при

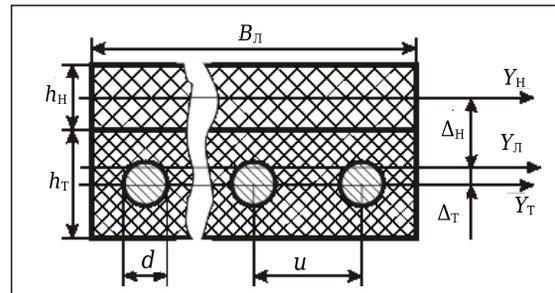


Рис. 6. Поперечное сечение объединенных лент при продольном изгибе: B_L — ширина объединенных лент; d — диаметр троса; u — шаг тросов; Y_{Π} — главная центральная ось приведенного поперечного сечения при продольном изгибе; Y_T — центральная ось сечений тросов и резины без тросов в тяговой ленте; Y_H — центральная ось сечения несущей ленты; Δ_T и Δ_H — расстояния от оси Y_{Π} до осей Y_T и Y_L

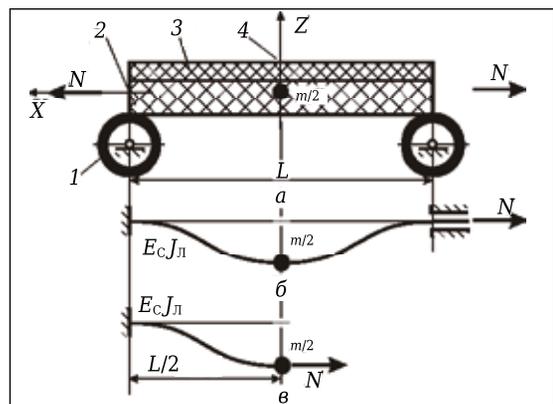


Рис. 7. К выбору расчетной схемы для определения жесткости при продольном изгибе ветви объединенных лент: a — лента в недеформированном состоянии; b — расчетная схема для определения жесткости ветви ленты; v — схема к определению жесткости при изгибе растянутой консоли; 1 — ролик; 2 и 3 — тяговая и несущая ленты; 4 — ковш; $E_C J_L$ — изгибная жесткость приведенного сечения при продольном изгибе лент

совместном действии растяжения и изгиба; $\text{Ch}\left(\frac{\alpha L}{2}\right)$, $\text{Sh}\left(\frac{\alpha L}{2}\right)$ — гиперболические косинус и синус соответственно.

Жесткость навески ковша при продольном изгибе $C_{\text{л}} = 2C_{\text{к}}$. (7)

Подставляя уравнения (3) и (5) в (1), получаем жесткость навески ковша

$$C = (6C_{\text{к}}E_{\text{с}}j_{\text{б}}/l^3)/(2C_{\text{к}} + 3E_{\text{с}}j_{\text{б}}/l^3). \quad (8)$$

По найденной жесткости навески вычисляем, согласно зависимости (2), частоту p , с^{-1} , собственных колебаний ковша

$$p = \sqrt{\frac{2\left(6C_{\text{к}}E_{\text{с}}\frac{j_{\text{б}}}{l^3}\right)}{\left(2C_{\text{к}} + 3E_{\text{с}}\frac{j_{\text{б}}}{l^3}\right)_m}}. \quad (9)$$

При движении объединенных лент ордината сечения, в котором навешен ковш, изменяется по закону $Z = f(t)$. Максимальное значение (равное нулю) ордината Z (см. рис. 7) принимает на опорных роликах, минимальное — в середине пролета. Колебания ковша, вызванные движением точки навески к ленте (кинематическим возмущением), сводятся к колебаниям под действием возмущающей силы $F(t) = Cf(t)$. (10)

Вертикальное перемещение ковша $\alpha_{\text{с}}$, находящегося посередине пролета между роликами, под действием силы тяжести (статический прогиб) определяется по зависимости

$$\alpha_{\text{с}} = \frac{G_{\text{к}}}{2C},$$

где $G_{\text{к}}$ — вес ковша, Н; C — жесткость навески, Н/м.

Полагаем, что колебания, которые совершает ковш при работе конвейера, гармонические. Траекторию (рис. 8) движения центра масс ковша зададим функцией

$$z = \frac{\alpha_{\text{д}}\left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right]}{2}, \quad (11)$$

где x — текущая координата центра масс ковша.

Движение ковша вдоль продольной оси конвейера OZ считаем равномерным. Закон изменения координаты x во времени линейен $x = vt$, где v — средняя скорость, м/с; t — время, с. Подставляя это выражение в уравнение (11), получаем закон, по которому ковш совершает вертикальные колебания:

$$z = \frac{\alpha_{\text{с}}(1 - \cos 2\pi vt / L)}{2}. \quad (12)$$

Координата z в уравнении (12) отсчитывается от статического прогиба объединенной ленты. Частота ω вынужденных колебаний ковша, вызванных движением объединенной ленты конвейера, вычисляется по зависимости

$$\omega = 2\pi v/L.$$

Коэффициент динамичности определяется по зависимости [6, 7]

$$k_{\text{дин}} = |1 - \omega^2/\rho^2|^{-1}. \quad (13)$$

Приравнявая ω и ρ , находим резонансную скорость ковша

$$v_{\text{рез}} = \rho L/(2\pi). \quad (14)$$

По найденному коэффициенту динамичности определяем амплитуду колебаний ковша

$$\alpha_{\text{д}} = k_{\text{дин}}\alpha_{\text{с}}. \quad (15)$$

Коэффициент динамичности не должен превосходить значение 1/15 [7]:

$$k_{\text{дин}} \leq 1/15. \quad (16)$$

Для того чтобы коэффициент динамичности не превышал значения 1/15, необходимо, чтобы частота вынужденных колебаний более чем в 4 раза превосходила собственную частоту. Это условие выполняется при следующем отношении возмущающей и резонансной частот:

$$\omega/\rho \geq 4. \quad (17)$$

Динамические расчеты ковшового ленточного конвейера проводим в такой последовательности:

- задаемся количеством и грузоподъемностью ковшей, исходя из требований технического задания;

- назначаем скорость конвейера;

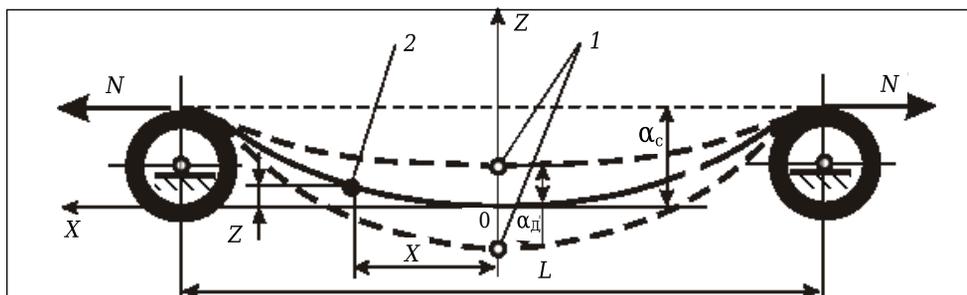


Рис. 8. К определению резонансной скорости ковша: 1 — предельные отклонения ковша; 2 — текущее положение ковша; $\alpha_{\text{с}}$ — статический прогиб ковша; Oxz — местная система координат, оси которой параллельны координатным осям OXZ ; 0 — начало координат, совпадающее с положением статического прогиба; x , z — текущие координаты центра масс ковша при движении конвейера; $\alpha_{\text{д}}$ — амплитуда колебаний ковша, отсчитываемая от положения статического прогиба

- находим наибольшее расстояние между роликками грузовой ветви;
- определяем требуемое усилие в тяговой ленте, подбираем тип тяговой ленты (ее размеры, количество и диаметр стальных тросов);
- выбираем тип несущей ленты;
- прорабатываем способ навески ковша, т. е. устанавливаем размеры поперечного сечения планки, длину консольной (изгибаемой) части;

- находим частоту собственных колебаний ковша и частоту возмущающей силы;
- при невыполнимости условия (17) изменяем величины L , $h_{п}$, $b_{п}$, l и повторяем расчеты.

Таким образом, представленная методика позволяет оценить на этапе проектирования частоту собственных колебаний ковша, выбрать рабочую скорость конвейера, назначить из условия прочности основные размеры крепления ковшей.

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. **Пат. 1722993 СССР.** Ковшовый конвейер / Давыдов С. Я., Демидов А. Е., Белкин Г. И. и др. — № 4769289 ; заявл. 13.12.89 ; опубл. 30.03.92.
3. **Пат. 2165881 РФ.** Ковшовый ленточный конвейер для горячих материалов / Давыдов С. Я. — № 99114933 ; заявл. 07.07.99 ; опубл. 27.04.01.
4. **Давыдов, С. Я.** Ковшовый ленточный конвейер для горячих материалов / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. А. Филистеев // Новые огнеупоры. — 2004. — № 10. — С. 79–82.
5. **Пат. 142527 РФ.** Ковшовый ленточный конвейер / Давыдов С. Я., Шварев В. С. — № 2014101311 ; заявл. 16.01.14 ; опубл. 27.06.14.

6. Вибрации в технике : справочник. Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. — М. : Машиностроение, 1978. — 352 с.
7. **Пановко, Я. Г.** Основы прикладной теории упругих колебаний / Я. Г. Пановко. — М. : Машиностроение, 1967. — 316 с.
8. **Александров, А. В.** Сопrotивление материалов : учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. — М. : Высшая школа, 2000. — 560 с.
9. **Тарг, С. М.** Краткий курс теоретической механики : учебник для втузов / С. М. Тарг. — М. : Высшая школа, 1995. — 415 с. ■

Получено 17.06.16
© С. Я. Давыдов, А. П. Золкин,
В. С. Шварёв, Л. А. Золкина, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



MAGFORUM 2017

Magnesium Minerals & Markets Conference

11–13 июня 2017 г. Radisson Blu Hotel, г. Краков, Польша

Темы:

- Полный спектр магnezитового сырья
- Тенденции и анализ рынка
- Проекты в стадии разработки
- Новейшие технические инновации
- Решения по логистике
- Дальнейшие процессы развития

www.imformed.com



А. А. Беспальков, к. т. н. О. А. Лукашук (✉), д. т. н. Г. Г. Кожушко

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

УДК 621.867

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЗЛОВ ТРУБЧАТОГО СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА

Представлены пути решения проблем, возникающих при эксплуатации трубчатых скребковых конвейеров, предназначенных для транспортирования сыпучих и мелкокусковых абразивных материалов. К наиболее часто возникающим проблемам отнесены следующие: заклинивание тяговой цепи в грузе-ной поворотной секции, износ патрубков и скребков, попадание транспортируемого сырья в натяжное устройство при реверсе конвейера, повышенный уровень шума при работе конвейера.

Ключевые слова: трубчатый скребковый конвейер, транспортирование сыпучих материалов, модернизация, антифрикционные материалы.

В качестве примера рассмотрен конвейер «Технокон-219» (рис. 1), установленный на участке спекания в цехе по производству глинозема на Богословском алюминиевом заводе (г. Краснотурьинск). Конвейер транспортирует спек (Al_2O_3) из дробилки в приемный накопительный бункер. В процессе эксплуатации возник ряд проблем, увеличивающих время простоя, ремонта и чистки конвейера от 3 до 8 ч в неделю, а также износ некоторых узлов.

Цель проведенной работы — поиск путей решения вышеуказанных проблем и составление ряда рекомендаций по их устранению.

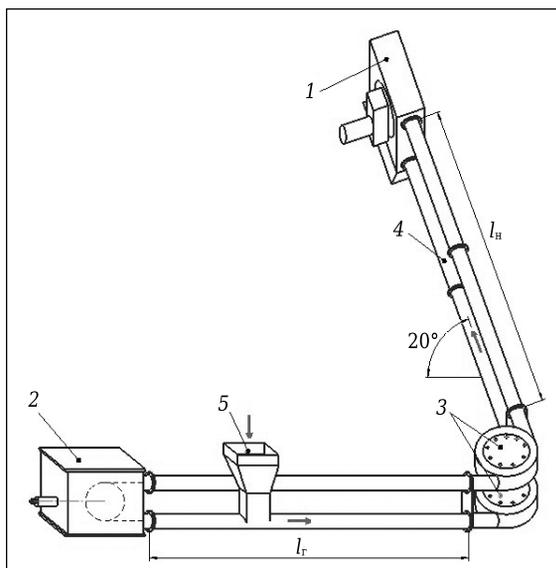


Рис. 1. Общий вид конвейера: 1 — натяжное устройство; 2 — приемный бункер; 3 — поворотная станция 1; 4 — поворотная станция 2; 5 — разгрузочный бункер; l_r , l_n — длина горизонтального и наклонного участков

✉
О. А. Лукашук
E-mail: oldim96@mail.ru

Мощность привода конвейера определяется на основании тягового расчета, предполагающего суммирование сопротивлений движению транспортируемого материала на отдельных участках трассы.

Сопротивление сдвигу сыпучего кускового груза складывается из трения твердых частиц груза между собой по поверхностям скольжения и сопротивления связности, которая определяется силами сцепления частиц. Условие предельного равновесия связной среды описывается уравнением Кулона – Навье [1]:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где τ — предельное касательное напряжение в заданной точке насыпного груза, H/m^2 ; c — начальное сопротивление сдвигу, характеризующее силу сцепления частиц между собой, H/m^2 ; σ — нормальное напряжение сжатия, H/m^2 ; φ — угол внутреннего трения, град.

Нормальное напряжение σ определяется по формуле давления столба груза:

$$\sigma = \rho g h_{\max}, \quad (2)$$

где ρ — насыпная плотность груза, $кг/м^3$; g — ускорение свободного падения, $м/с^2$; h_{\max} — высота слоя груза, отсчитываемая от нижней точки трубы, м.

Силу сопротивления сдвигу $F_{с.с}$ сыпучего груза при волочении его внутри трубы на горизонтальном и наклонном грузе-ных участках рассчитывают по формуле

$$F_{с.с} = \tau (A_r + A_n) = \tau \gamma R (l_r + l_n), \quad (3)$$

где A_r и A_n — площади внутренней поверхности трубы горизонтального и наклонного грузе-ных участков, на которые воздействует транспортируемый груз, $м^2$; γ — угол сегмента боковой поверхности трубы, контактирующей с материалом, рад (рис. 2); R — внутренний радиус трубы, м; l_r , l_n — длина грузе-ных горизонтального и наклонного участков трубы соответственно, м.

Сопротивление движению груза внутри трубы $W_{гр}$ определяют следующим образом:

$$W_{гр} = q_{гр}g[f_{гр}(l_{г} + l_{н}\cos\beta) + l_{н}\sin\beta], \quad (4)$$

где $q_{гр}$ — погонная масса груза, кг/м, $q_{гр} = \rho\gamma R^2/2$; $f_{гр}$ — коэффициент трения скольжения груза о стенки трубы ($f_{гр}$ спека по стали 0,4); β — угол наклона участка трубы, град.

Сопротивление движению тягового органа W_0 , определяемое силами трения скребков о стенки трубы, находят из выражения

$$W_0 = 2q_0gf_0(l_{г} + l_{н}\cos\beta), \quad (5)$$

где q_0 — погонная нагрузка от массы тяговой цепи и скребков, кг/м; f_0 — коэффициент трения скольжения скребков о поверхность трубы (для пары чугун – сталь $f_0 = 0,23$).

При определении сил сопротивления движению насыпного груза, возникающих в загрузочном устройстве конвейера, использованы результаты исследований работы [2].

Лабораторные исследования на прозрачной модели трубчатого скребкового конвейера показали, что в нижней части тела волочения до высоты, равной радиусу скребка, груз движется как единое целое. Кроме того, в зазоре между скребком и боковой стенкой загрузочной воронки происходит сегрегация частиц груза, при которой мелкие частицы опускаются вниз, а наверху оказываются частицы наибольшего размера.

При шаге скребков, не превышающем двух диаметров трубы конвейера, на верхних кромках скребков происходит прорезание штабеля груза, находящегося в загрузочной воронке.

Суммарную силу $W_{зв}$ сопротивления в загрузочном устройстве для тела волочения между двумя скребками рассчитывают по формуле

$$W_{зв} = \frac{1}{2}f_0\rho gD_c^2l_c \left[\frac{\pi H_0}{D_c} \left(2 - \frac{\Delta f}{f_0} \right) - \frac{\Delta f}{f_0} \right], \quad (6)$$

где D_c — диаметр скребка, м; l_c — шаг установки скребков, м; H_0 — высота штабеля груза в загрузочном устройстве, м; $\Delta f = f_0 - f_{гр}$; $f_{гр}$ — коэффициент трения скольжения груза о стенки трубы.

Сопротивления движению $W_{зв}$, Н, цепного тягового органа на приводных, натяжных и поворотных звездочках определяют как

$$W_{зв} = 2,1 \cdot S_{нб} \left(\mu_{ц} \frac{\delta_{ц}}{D_0} + \mu_{в} \frac{d_{в}}{D_0} \sin \frac{\alpha}{2} \right), \quad (7)$$

где $S_{нб}$ — натяжение цепи в точке набегания на звездочку, Н; $\mu_{ц}$, $\mu_{в}$ — коэффициенты трения соответственно между звеньями в цепи и в подшипниках вала звездочки; $\delta_{ц}$ — диаметр прутка цепи, м; $d_{в}$ — диаметр цапфы вала звездочки, м; D_0 — диаметр начальной окружности звездочки, м; α — угол поворота трассы конвейера.

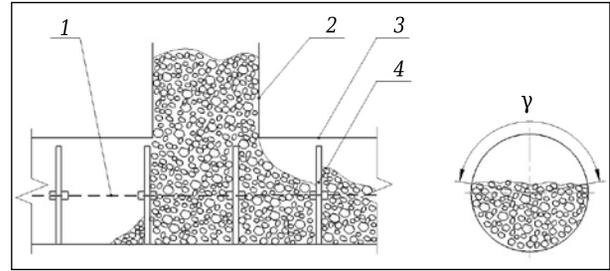


Рис. 2. Загрузочное устройство: 1 — тяговая цепь; 2 — торцевая стенка загрузочной воронки; 3 — труба конвейера; 4 — скребок

Суммарное сопротивление движению цепного тягового органа по всей трассе

$$W_{\Sigma} = F_{с.с} + W_{гр} + W_0 + W_{зв} + W_{зв}, \quad (8)$$

необходимая мощность электродвигателя P , кВт, приводной станции конвейера

$$P = \frac{W_{\Sigma} \cdot V}{\eta},$$

где V — скорость движения тягового органа, м/с; η — КПД привода.

После подстановки численных значений всех параметров и принятых коэффициентов получено $W_{\Sigma} = 16,9$ кН; $P = 4,37$ кВт.

Основным направлением модернизации трубчатых скребковых конвейеров является сокращение энергетических потерь за счет покрытия внутренних поверхностей патрубков износостойким составом «Loctite Nordbak 7255», при этом коэффициент трения скольжения груза о стенки трубы снизится с 0,4 до 0,27.

Кроме того, предложена составная конструкция скребков (рис. 3) с применением шайб из модифицированного фторопласта Ф-4К15УВ5, обладающего наилучшими прочностными, износостойкими и антифрикционными свойствами (значение коэффициента трения f_0 скребков по поверхности трубы снижается с 0,27 до 0,15).

Для предотвращения заклинивания цепи в звездочке грузовой поворотной станции, а так-

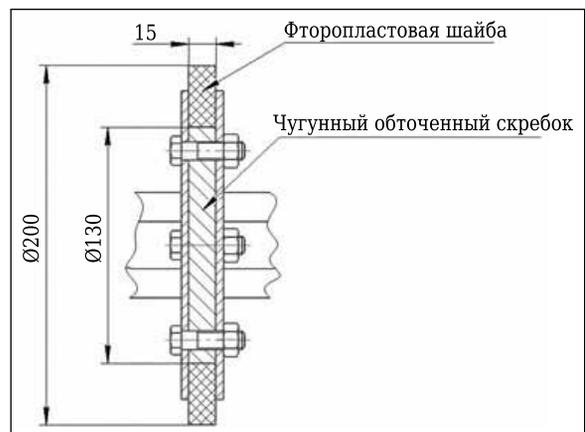


Рис. 3. Установка фторопластовых скребков

же для защиты подшипникового узла звездочки от абразивного износа предложена замена звездочки в поворотной станции на поворотный обод. Для устранения попадания транспортируемого груза в натяжное устройство при реверсе конвейера предусмотрено разгрузочное окно перед натяжной станцией на нижней грузовой ветви.

В результате указанных мероприятий мощность привода конвейера уменьшится на 10 %, увеличится ресурс патрубков и скребков, сократится время на внеплановые ремонты, уменьшатся затраты электроэнергии.

Библиографический список

1. **Зенков, Р. Л.** Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. — М. : Машиностроение, 1964. — 252 с.
2. **Дмитриев, В. Г.** Тяговый расчет скребковых грубчатых конвейеров. Ч. 2 / В. Г. Дмитриев, Р. Р. Радимов // Горный инф.-аналит. бюллетень. Отдельные статьи (спец. выпуск). — 2012. — № 3. — 16 с. ■

Получено 10.10.16

© А. А. Беспальков, О. А. Лукашук,
Г. Г. Кожушко, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Международная специализированная выставка ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ (NI-TECH)

14–16 марта 2017 г.

Экспофорум, Санкт-Петербург



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА

Международная выставка-конгресс «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (NI-TECH) — одно из первых мероприятий России в области продвижения высоких технологий, инноваций и инвестиционных проектов в научно-технической сфере. Выставка-конгресс способствует эффективному взаимодействию научных организаций и потенциальных инвесторов. Традиционно основными экспонентами являются государственные научные центры, научно-исследовательские институты, вузы, промышленные предприятия, технопарки и региональные экспозиции, которые демонстрируют свои инновационные достижения.

Тематические разделы выставки

- Специализированный раздел: НАНОТЕХНОЛОГИИ
Наноматериалы и нанотехнологии
Оборудование, технологии, оснастка для производства наноматериалов
Применение нанотехнологий и наноматериалов
- ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
- ИННОВАЦИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Машиностроение
Металлургия
Литейное производство
Автомобилестроение
Энергетика и энергосбережение
Химия и новые материалы
- ИНВЕСТИЦИИ

По вопросам участия в выставке обращаться:

Ирина Степанывева

Тел./факс: +7 (812) 320-80-94

E-mail: port@restec.ru

УДК 666.1.031

ОБОБЩЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Предложен новый подход к анализу тепловой работы стекловаренных печей. Получено обобщенное уравнение теплового баланса печи в границах дымовая труба – каналы стекломассы. Сформулированы граничные условия по температуре для сред, теплосодержание которых определяет затратные статьи теплового баланса. Показано влияние удельного расхода теплоты на варку 1 кг стекла на процентное содержание расходных статей обобщенного теплового баланса. Выполнен расчет теплового баланса варочной части печи тарного стекла производительностью 320 т/сут при удельном расходе теплоты 1000 ккал/кг.

Ключевые слова: стекловаренная печь, тепловой баланс, энергоэффективность, температура, футеровка.

В техническом задании на проектирование стекловаренной печи задаются ее производительность и удельный расход теплоты на варку 1 кг стекла. Эти параметры определяют тепловую нагрузку печи. В свою очередь, распределение генерируемой энергии между составными частями печи (рабочее пространство, варочный бассейн, регенератор, каналы для дыма и стекломассы) определяется с использованием балансового метода анализа тепловой работы печей.

В общем случае энергоэффективность печи определяется соотношением полезных и непроеизводительных затрат теплоты. Для регенеративной печи тарного стекла теоретически обусловленные затраты теплоты на стекловарение составляют 2,3–2,5 МДж/кг. Они включают расход энергии на стеклообразование (0,90–1,0 МДж/кг) и теплосодержание расплава на выходе из варочного бассейна (1,4–1,5 МДж/кг) [1]. Общие затраты энергии на варку стекла в значительной степени зависят от эффективности регенерации теплоты продуктов сгорания топлива (дыма) и потерь теплоты в окружающую среду. Последние слагаются из теплосодержания дыма перед трубой и тепловых потерь через футеровку варочной части печи, регенератора, а также каналов для дыма и стекломассы.

Таким образом, полный анализ тепловой работы печи не может быть выполнен в рамках традиционного теплового баланса, составляемого в границах рабочего пространства и варочного бассейна (варочной части) [2, 3] или в границах регенератора – варочная часть печи [4]. На наш взгляд, стекловаренную печь следует рассматривать как систему, состоящую из трех частей (рис. 1), энергетически взаимосвязан-

ных единым источником тепловой энергии — теплотой, выделяемой при сжигании топлива.

В варочной части печи (см. рис. 1, контур I) протекают процессы теплогенерации и стекловарения. Одним из результатов этих процессов является сток теплоты в регенератор и выработочный канал стекломассы. Энергоэффективность процесса регенерации теплоты дыма задается температурой подогрева воздуха на горение. Величина последней зависит как от теплосодержания дыма на выходе из рабочего пространства и перед трубой, так и от потерь теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов. Расширение границ контура II (см. рис. 1) до дымовой трубы позволяет более обоснованно задать итоговые потери теплоты с дымом в окружающую среду. Эти потери определяются минимальной температурой дыма перед трубой, например 300 °С. При соответствующем остаточном теплосодержании дыма не предусматривается использование второй ступени теплоутилизации. В то же время оно достаточно для дымоудаления без применения дутьевых устройств. Контур III (см.

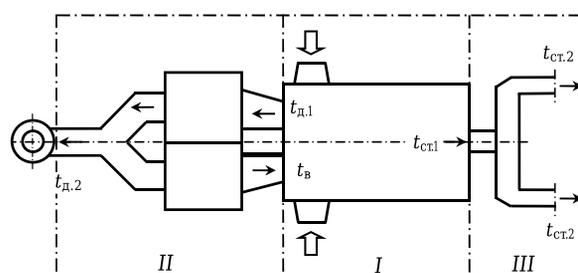


Рис. 1. Схема к расчету теплового баланса стекловаренной печи с подковообразным пламенем: I — варочная часть печи (рабочее пространство и варочный бассейн); II — регенератор и дымовые каналы; III — выработочный канал и каналы питателей стекломассы; температура: $t_{в}$ — воздуха; $t_{д,1}$, $t_{д,2}$ — дыма на выходе из печи и перед трубой соответственно; $t_{ст,1}$, $t_{ст,2}$ — на выходе из печи и из канала питателя соответственно



В. Я. Дзюзер

E-mail: vdzuzer@yandex.ru

рис. 1) объединяет выработочный канал и каналы питателей стеклоформирующих машин. При этом потери теплоты с расплавом на выработке задаются технологически обусловленной температурой, определяемой химическим составом стекла. Для тарного стекла — это температура капли, соответствующая вязкости расплава 10^2 Па·с [2].

Таким образом, обобщенный анализ тепловой работы печи должен выполняться в пределах контуров I – III (см. рис. 1). В этом случае обеспечивается объективное задание граничных условий, определяющих две важнейшие расходные статьи теплового баланса. Кроме того, анализ тепловых процессов в пределах контура II (см. рис. 1) позволяет рассчитать температуру подогрева воздуха. Тем самым исключить ошибку, свойственную тепловому балансу варочной части печи, в котором температура подогрева воздуха задается условиями расчета [2, 4].

При составлении уравнения теплового баланса варочной части печи (см. рис. 1, контур I), ввиду относительной малости величин исключается из рассмотрения физическая теплота газа, шихты и стеклообя:

$$Q_{т.н} + Q_{в} = Q_{теор} + Q_{д.1} + Q_{ст.1} + Q_{х.н} + Q_{ф.п}, \quad (1)$$

где $Q_{т.н}$ — тепловая нагрузка печи, кВт, $Q_{т.н} = BQ_{н}^p$; $Q_{в}$ — теплосодержание подогретого воздуха, кВт, $Q_{в} = BL_{\alpha}c_{в}t_{в}$; $Q_{теор}$ — теоретические затраты теплоты на стекловарение, кВт, $Q_{теор} = q_{ст}P_{п}$; $Q_{д.1}$ — теплосодержание дыма на выходе из рабочего пространства, кВт, $Q_{д.1} = BV_{\alpha}c_{д.1}t_{д.1}$; $Q_{ст.1}$ — теплосодержание стекломассы на выходе из варочного бассейна, кВт, $Q_{ст.1} = P_{п}c_{ст.1}t_{ст.1}$; $Q_{х.н}$ — химический недожог газа, кВт, $Q_{х.н} = 0,02Q_{т.н}$; $Q_{ф.п}$ — потери теплоты через футеровку варочной части печи, кВт; B — расход газа, м³/с; $Q_{н}^p$ — низшая рабочая теплотворная способность газа, кДж/м³; $q_{ст}$ — теоретические затраты теплоты на варку 1 кг стекла, кДж/кг; $P_{п}$ — производительность печи, кг/с; L_{α} , V_{α} — расход воздуха и дыма на 1 м³ газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$ соответственно, м³/м³; $c_{в}$, $t_{в}$ — средняя теплоемкость и температура воздуха соответственно, кДж/(м³·К) и °С; $c_{д.1}$, $c_{ст.1}$ — средняя теплоемкость дыма и стекломассы на выходе из печи соответственно, кДж/(м³·К) и кДж/(кг·К); $t_{д.1}$, $t_{ст.1}$ — температура дыма и стекломассы на выходе из печи соответственно, °С.

Тепловой баланс регенератора и дымовых каналов (см. рис. 1, контур II) формализуется уравнением

$$Q_{д.1} = Q_{в} + Q_{д.2} + Q_{ф.р}, \quad (2)$$

где $Q_{д.2}$ — теплосодержание дыма на входе в трубу, кВт, $Q_{д.2} = (1 + m_{в})BV_{\alpha}c_{д.2}t_{д.2}$; $Q_{ф.р}$ — потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов, кВт; $m_{в}$ — коэффициент подсоса воздуха через футеровку регенератора и дымовых каналов; $c_{д.2}$, $t_{д.2}$ — средняя теплоемкость и температура дыма перед трубой соответственно, кДж/(м³·К) и °С.

Для $Q_{ф.р}$ можно записать

$$Q_{ф.р} = (1 - \eta)Q_{д.1}, \quad (3)$$

где η — коэффициент, учитывающий потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов. Для современной структуры футеровки регенератора $\eta = 0,97$ и $m_{в} = 0,1$ [5]. С учетом потерь теплоты через футеровку дымовых каналов и подсоса воздуха через шибберные устройства принимаем $\eta = 0,96$ и $m_{в} = 0,15$.

Подставив соотношение (3) в уравнение (2), получаем выражение

$$Q_{д.1} = (Q_{в} + Q_{д.2})/\eta, \quad (4)$$

из которого находим затраты теплоты на нагрев воздуха

$$Q_{в} = \eta Q_{д.1} - Q_{д.2}. \quad (5)$$

Для каналов стекломассы (см. рис. 1, контур III) уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_{ст.1} = Q_{ст.2} + Q_{ф.к}, \quad (6)$$

где $Q_{ст.2}$ — теплосодержание стекломассы на выходе из каналов питателя, кВт, $Q_{ст.2} = P_{п}c_{ст.2}t_{ст.2}$; $Q_{ф.к}$ — потери теплоты через футеровку каналов стекломассы, кВт; $c_{ст.2}$, $t_{ст.2}$ — средняя теплоемкость и температура стекломассы на выходе из канала питателя соответственно, кДж/(кг·К) и °С.

Известно, что каналы для стекломассы имеют автономные системы отопления. Поскольку дополнительные источники теплоты предназначены для термической гомогенизации расплава, они не учитываются при анализе использования тепловой энергии, генерируемой в рабочем пространстве печи. При этом теплота, генерируемая в каналах, входит в структуру потерь через их футеровку.

Подставим соотношения (5) и (6) в уравнение (1). После преобразований получим общее уравнение теплового баланса печи в пределах контуров I – III (см. рис. 1):

$$Q_{т.н} = Q_{теор} + Q_{д.2} + Q_{ст.2} + Q_{х.н} + Q_{ф.Σ}, \quad (7)$$

где $Q_{ф.Σ}$ — суммарные потери теплоты через футеровку печи, кВт, $Q_{ф.Σ} = Q_{ф.п} + Q_{ф.р} + Q_{ф.к}$.

В уравнении (7) сумма $(Q_{теор} + Q_{ст.2})$ — технологически обусловленные затраты теплоты на стекловарение, сумма $(Q_{д.2} + Q_{х.н} + Q_{ф.Σ})$ — непродуцируемые потери теплоты.

Уравнение (7) может быть использовано как по прямому назначению — определению тепловой нагрузки печи, так и для расчета расходных статей теплового баланса при заданном проекте печи удельном расходе теплоты на варку 1 кг стекла:

$$q_{уд} = BQ_{н}^p/P_{п}, \quad (8)$$

где $q_{уд}$ — удельный расход теплоты на стекловарение, кДж/кг.

Использование уравнений (7) и (8) позволяет выполнить комплексный анализ тепловой рабо-

ты стекловаренной печи. В прикладном плане наибольший интерес представляют:

- расчет тепловыделений от печи, поскольку параметр $Q_{\phi,\Sigma}$ является важнейшим при проектировании системы общеобменной вентиляции производственного корпуса;

- оценка влияния параметра $q_{уд}$ на соотношение полезных и непроизводительных затрат теплоты, а также потери тепла с дымом.

Выполним анализ тепловой работы стекловаренной печи с подковообразным пламенем производительностью $P_{п} = 320$ т/сут (3,7 кг/с) и с удельным съемом стекла $P_{уд} = 3$ т/(м²·сут). Тепловая экономичность печи задана $q_{уд} = 4,187 \div 6,280$ МДж/кг (1000–1500 ккал/кг). Меньшее значение $q_{уд}$ соответствует мировому уровню энергоэффективности в производстве тарного стекла, большее значение — средней тепловой эффективности отечественных стекловаренных печей. Из формулы (8) определяется расход газа $B = 0,459 \div 0,688$ м³/с. Для химического состава стекла, сырьевых материалов и рецепта шихты на 100 кг стекла, приведенных в работе [1], $q_{ст} = 928,6$ кДж/кг и $t_{ст,2} = 1204$ °С. Природный газ характеризуется параметрами: $Q_{н}^p = 33778,0$ кДж/м³, $L_{а} = 10,66$ м³/м³ и $V_{а} = 11,59$ м³/м³. Состав дыма на выходе из печи, об. %: CO₂ 8,87, H₂O 17,31, N₂ 72,08, O₂ 1,74. С учетом разбавления воздухом на пути движения дыма от печи до трубы его состав преобразуется к виду, об. %: CO₂ 7,71, H₂O 15,05, N₂ 72,98, O₂ 4,26. Этому составу дыма при $t_{д,2} = 300$ °С соответствует средняя теплоемкость $c_{д,2} = 1,3902$ кДж/(м³·К).

Результаты расчета расходных статей обобщенного теплового баланса печи по уравнению (7) приведены в табл. 1. В энергоэффективной стекловаренной печи ($q_{уд} = 1000$ ккал/кг) 56,49 % тепловой нагрузки приходится на технологически обусловленные затраты теплоты. В то же время 43,51 % тепловой энергии, генерируемой в рабочем пространстве печи, расходуется на непроизводительные цели. При этом 25,05 % тепловой нагрузки печи затрачивается на компенсацию потерь теплоты через футеровку. Поскольку отношение $(Q_{теор} + Q_{ст,1})/Q_{т.н}$ является термическим коэффициентом полезного действия печи $\eta_{кпд}$, то заданной величине $q_{уд}$ соответствует $\eta_{кпд} = 56,49$ %.

Для среднего уровня энергоэффективности печей ($q_{уд} = 1500$ ккал/кг) в структуре затрат теплоты доминируют непроизводительные статьи расхода, доля которых составляет 62,31 %. Как следствие, коэффициент полезного действия печи уменьшается до 37,69 %, а суммарные потери тепла через футеровку возрастают до 43,85 %.

Анализ данных рис. 2 показывает, что максимальная величина удельных затрат теплоты на стекловарение не должна превышать 1130,6 ккал/кг. В этом случае наблюдается равенство суммы полезных и непроизводительных статей теплового баланса и $\eta_{кпд} = 50,0$ %. При этом суммарные потери тепла через футеровку составляют 31,53 % (5523,1 кВт).

Таблица 1. Структура расходных статей обобщенного теплового баланса стекловаренной печи производительностью 320 т/сут

Статьи расхода теплоты	кВт	%	кВт	%
	$q_{уд} = 4,187$ МДж/кг (1000 ккал/кг)		$q_{уд} = 6,280$ МДж/кг (1500 ккал/кг)	
$Q_{теор}$	3435,8	22,16	3435,8	14,78
$Q_{ст,2}$	5323,5	34,33	5323,5	22,91
$Q_{д,2}$	2551,5	16,46	3824,4	16,46
$Q_{\phi,\Sigma}$	3883,2	25,05	10190,8	43,85
$Q_{х.н}$	310,1	2,00	464,8	2,00
Итого	15504,1	100	23239,3	100

Составим тепловой баланс варочной части печи при $q_{уд} = 4,187$ МДж/кг. По результатам математического моделирования принимаем $t_{д,1} = 1450$ °С и $t_{ст,1} = 1320$ °С [6]. Заданной температуре и составу дыма на выходе из рабочего пространства печи соответствует средняя теплоемкость $c_{д,1} = 1,5908$ кДж/(м³·К) и $Q_{д,1} = 12271,0$ кВт. По формуле (3) находим потери теплоты через футеровку регенератора и дымовых каналов $Q_{д,р} = 490,8$ кВт, что составляет 12,64 % от общих потерь теплоты через футеровку печи $Q_{\phi,\Sigma}$. По формуле (5) рассчитываем $Q_{в} = 9228,7$ кВт. Данное количество теплоты обеспечивает подогрев воздуха до 1307 °С.

Заданной температуре и химическому составу стекла соответствует средняя теплоемкость и теплосодержание расплава на выходе из варочного бассейна $c_{ст,1} = 1,2103$ кДж/(кг·К) и $Q_{ст,1} = 5911,1$ кВт соответственно. Из формулы (6) определяем потери теплоты через футеровку каналов стекломассы $Q_{\phi,к} = 587,6$ кВт (15,13 % от $Q_{\phi,\Sigma}$). Из соотношения для $Q_{\phi,\Sigma}$ находим $Q_{\phi,п} = 2804,8$ кВт, что составляет 72,23 % от $Q_{\phi,\Sigma}$.

Результаты расчета теплового баланса варочной части печи (табл. 2) свидетельствуют о том, что приходная часть баланса на 37,31 % формируется за счет регенерации теплоты дыма, доля которой в расходной части составляет 49,61 %. Полезные затраты теплоты равны сумме $Q_{теор} + Q_{ст,1}$. Отношение $(Q_{теор} + Q_{ст,1})/(Q_{т.н} + Q_{в}) = 37,79$ %. Одним из отличительных признаков энергоэффективной стекловаренной печи является относительно низкий уровень потерь теплоты через футеровку рабочего пространства и варочного

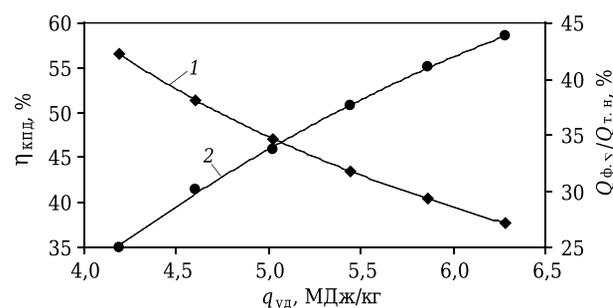


Рис. 2. Зависимость термического КПД печи (1) и относительных потерь теплоты через футеровку (2) от удельного расхода теплоты на варку 1 кг стекла

Таблица 2. Тепловой баланс варочной части стекловаренной печи производительностью 320 т/сут ($q_{уд} = 4,187$ МДж/кг)

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
$Q_{т.н}$	15504,1	62,69	$Q_{теор}$	3435,8	13,89
$Q_{в}$	9228,7	37,31	$Q_{ст.1}$	5911,1	23,90
Итого	24732,8	100	$Q_{л.1}$	12271,0	49,61
			$Q_{ф.п}$	2804,8	11,34
			$Q_{х.н}$	310,1	1,26
			Итого	24732,8	100

бассейна. В нашем примере $Q_{ф.п} = 11,34\%$ от суммы приходных статей теплового баланса. Для сравнения отметим, что при $q_{уд} = 6,280$ МДж/кг потери теплоты через кладку равны 8867,5 кВт, что составляет 23,92% от суммарного поступления тепла в печь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что предложенная методология анализа тепловой работы стекловаренных печей соответствует логической схеме процесса проектирования [7]. На первом этапе выполня-

Библиографический список

1. **Дзюзер, В. Я.** Теоретические затраты теплоты на стекловарение / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 7. — С. 3–5.
Dzyuzer, V. Ya. Theoretical heat consumption in glassmaking / V. Ya. Dzyuzer, V. S. Shvydkii, E. B. Sadykov // Glass and Ceram. — 2012. — Vol. 69, № 7/8. — P. 217–219.
2. **Дзюзер, В. Я.** Способы повышения энергоэффективности стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Стекло и керамика. — 2012. — № 1. — С. 11–14.
3. **Beerkens, R.** Analysis of elementary process steps in industrial glass melting tanks – some ideas on innovations in industrial glass melting / R. Beerkens // Ceramics – Silikaty. — 2008. — Vol. 52, № 4. — P. 206–217.
4. **Khoshmanesh, K.** Reduction of fuel consumption in an industrial glass melting furnace / K. Khoshmanesh, A. Z. Kouzani, S. Nahavandi, A. Abbasi // Conference Paper: TENCON 2007 – 2007 IEEE Region 10 Conference (DOI: 10.1109/TENCON.2007.4428958).
5. **Дзюзер, В. Я.** Энергоэффективная структура кладки высокотемпературного регенератора стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 3–6.

ется расчет расходных статей обобщенного теплового баланса печи. В результате определяются допустимые потери теплоты в окружающую среду, в том числе через футеровку. На втором этапе составляется тепловой баланс варочной части печи. Его приходные и расходные статьи являются исходными данными для расчета конструктивных параметров регенератора и структуры футеровки всех составных частей печи. Принятые при составлении теплового баланса температуры дыма и стекломассы на выходе из печи определяют требования к организации процесса горения топлива и конструкции варочного бассейна. В целом результаты расчета тепловых балансов позволяют сформировать информационную базу для моделирования сопряженных процессов тепломассообмена в реальной геометрии печи.

* * *

Статья написана по результатам исследований, проводимых в рамках реализации и за счет средств Программы повышения конкурентоспособности «5-100-2020».

Dzyuzer, V. Ya. Energy-efficient structure for the lining of the high-temperature regenerator of a glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 1–4.

6. **Дзюзер, В. Я.** Граничные условия для расчета футеровки стекловаренной печи с инновационными параметрами технической эффективности / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 9–12.

Dzyuzer, V. Ya. Boundary conditions for designing the lining of a glass-founding furnace with innovative parameters to improve technical efficiency / V. Ya. Dzyuzer, V. S. Shvydkii // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 597–600.

7. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей: монография / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М.: Теплотехник, 2009. — 340 с. ■

Получено 09.08.16
© В. Я. Дзюзер, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ceramics.org/meetings/pacrim12

The 12th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology
including GLASS & OPTICAL MATERIALS DIVISION MEETING (GOMD 2017)

May 21 – 26, 2017 | Hilton Waikoloa Village | Waikoloa, Hawaii, USA

РАСТРИМ 12 — 12-я КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИКИ И СТЕКЛА
21–26 мая 2017 г. г. Вайколоа, США (Гавай)

Д. т. н. А. И. Нижегородов (✉)

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)», г. Иркутск, Россия

УДК 666.7;66.041.3-65:691.365

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЕЧЬ С ПОДВИЖНОЙ ПОДОВОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛЯ ОБЖИГА ВЕРМИКУЛИТА

Рассмотрена новая концепция энерготехнологических агрегатов — электрических печей с подвижной подовой платформой, предназначенных для обжига вермикулитовых концентратов и термоактивации других минералов. Приведены доказательства положений новой концепции, обеспечивающей их высокую энергоэффективность. Дан прогноз на снижение удельной энергоемкости обжига вермикулита до 40 мДж/м³.

Ключевые слова: электрическая печь с подвижной подовой платформой, концентрация вермикулита, производительность, удельная энергоемкость обжига.

С появлением технологии электрического обжига вермикулита (2003 г.) актуальна потребность в снижении энергоемкости этого процесса. Модульно-спусковые печи подвергались усовершенствованию, по мере наработки опыта их эксплуатации появлялись новые технические решения. Прогноз по печам с рекуперацией тепловой энергии и последовательно-параллельным сопряжением электрифицированных и так называемых «нулевых» модулей (ППС-печи), приведенный в работе [1], показал возможность достижения удельной энергоемкости обжига вермикулита 173–175 мДж/м³.

Однако этого недостаточно. Электроэнергия обходится дороже, чем энергия сжигаемого углеводородного топлива, которая используется в традиционных огневых печах. Поэтому кроме Иркутской области и Красноярского края, где превалирует гидроэлектроэнергетика, обеспечивающая дешевую электроэнергию, применение таких печей все-таки экономически невыгодно. Экологическая безопасность технологии электрического обжига при этом не является весомым аргументом для предпринимателей. Вот и появилась новая концепция высокоэффективных энерготехнологических агрегатов — электрических печей с подвижной подовой платформой, способная привести к снижению удельной энергоемкости обжига до 40–45 мДж/м³.

Цель данной работы состоит в представлении и доказательстве положений новой концепции, обеспечивающей высокую энергоэффективность электрических печей с подвижной

подовой платформой, и рассмотрении других преимуществ. В работе [1] были намечены, а здесь окончательно сформулированы эти положения и преимущества:

1 — устранение фактора модульности, исключая возможность дальнейшего и существенного повышения энергоэффективности печи;

2 — высокая концентрация вспучиваемого вермикулита, находящегося на поверхности подовой платформы в тепловом поле при условии однослойности потока;

3 — постоянство средней скорости движения вермикулита в тепловом поле при возможности ее регулирования;

4 — возможность настройки продолжительности обжига;

5 — исключение контакта вермикулита с электрическими нагревателями;

6 — равномерность распределения температур по ширине подовой платформы.

На рис. 1–3 показано устройство печи с подвижной подовой платформой. Рабочая поверхность 1 из жаростойкой стали размещена на каркасе 2, выполненном из пустотелых балок. Пустоты каркаса, собранного с помощью винтов, заполнены теплоизоляционным материалом 3, сам каркас закреплен на подвижной подовой платформе 4. Печь имеет электрические нагреватели 5, термодомашку с защитным щитком 6, эксцентриковый привод, содержащий эксцентрик 7, корпус с цилиндром 8, пустотелый плунжер 9 и вставленную в него пружину 10. Цилиндрические 11 и конические 12 пружины установлены с обеих сторон платформы, снабженной осями 13 и роликами 14, размещенными в направляющих 15 рамы. Платформа также выполнена из балок, сваренных со швеллерами 16.

Термодомашка установлена на раме с помощью шарнира 17 и поперечных балок 18 над



А. И. Нижегородов
E-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

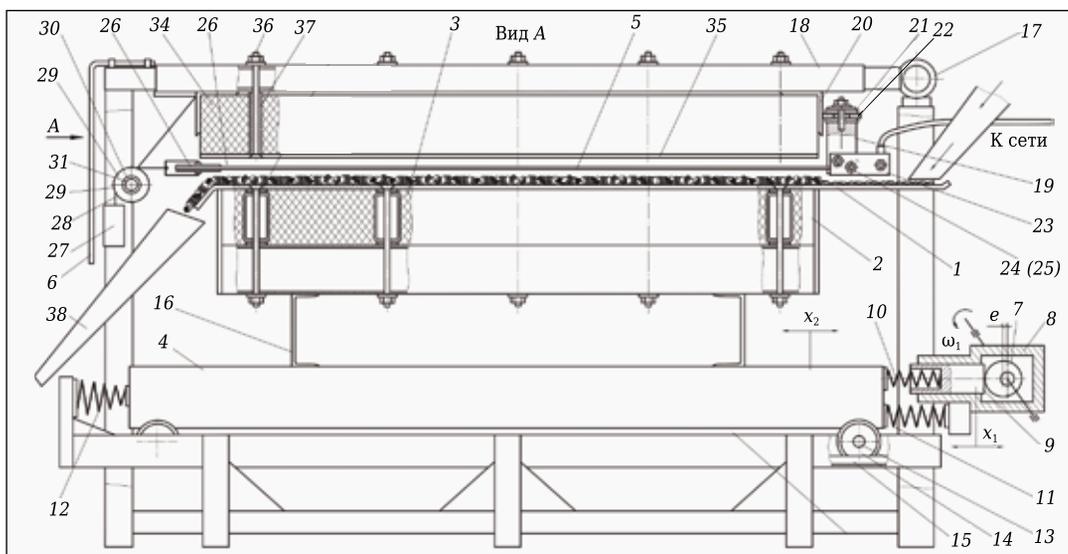


Рис. 1. Устройство печи с подвижной подовой платформой

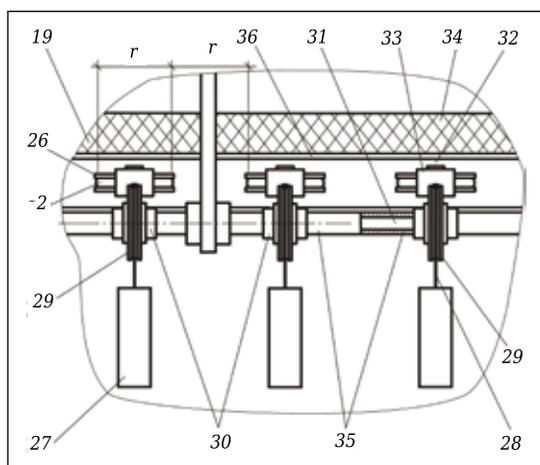


Рис. 2. Вид А (фрагмент с вырезом в защитном щитке)

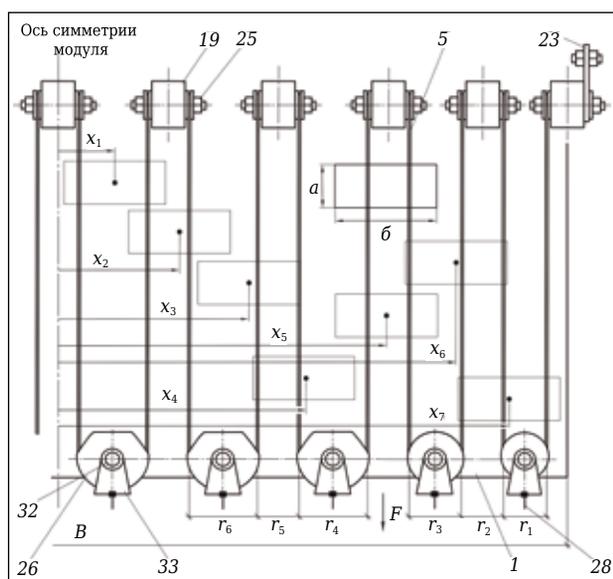


Рис. 3. Схема закрепления, распределения и натяжения электрических нагревателей на крышке печи

рабочей поверхностью с возможностью открывания при повороте на угол 180° для доступа к нагревателям. Крепежные головки 19 жестко прикреплены к уголку 20 термкрышки через диэлектрические прокладки 21 и 22 и имеют зажимные пластины 23, с помощью которых резьбовыми соединениями 24 и 25 нагреватели 5 закреплены на одной стороне термкрышки. С другой стороны размещены блоки 26 из жаростойкой стали, которые служат для удержания электрических нагревателей в натянутом состоянии силой F (см. рис. 3). Натяжение обеспечивается грузами 27, подвешенными на стальных канатиках 28, пропущенных через блоки 29, имеющие диэлектрические втулки 30 (см. рис. 2), посаженные на горизонтальную ось 31, закрепленную на термкрышке. Блоки 29 благодаря втулкам 30 установлены с неодинаковым по ширине шагом r . Нагреватели выполнены из проволочного нихрома, чем достигается (по сравнению с полосовым) уменьшение пространства обжига между рабочей поверхностью и отражательной пластиной. Блоки 26 установлены в горизонтальной плоскости и посажены на оси 32, выполненные из диэлектрического материала, которые через траверсы 33 соединены со стальными канатиками 28 (см. рис. 2).

Термкрышка, как и каркас, заполнена термоизоляционным материалом 34 и содержит пластину 35 из полированной жаростойкой стали, обладающей высокой отражательной способностью. Пластина закреплена на термкрышке винтами 36, с помощью которых и благодаря втулкам 37 обеспечивается параллельность пластины 32 термкрышке и рабочей поверхности 1. Чтобы под действием высокой температуры не происходило коробление рабочей поверхности и отражательной пластины, они должны быть выполнены составными.

Такое устройство печи отвечает первому положению новой концепции об устранении фактора модульности.

При работе печи электрические нагреватели, подключенные к сети, прогревают пространство обжига, образованное рабочей поверхностью 1 и отражательной пластиной 35. Быстрому прогреву, поддержанию высокой температуры и минимизации потерь тепловой энергии способствует высокая отражательная способность отражательной пластины и рабочей поверхности 1, низкая теплопроводность термоизоляционных материала и прокладок, установленных между балками каркаса. Нагреватели 5, закрепленные на крепежных головках 19, нагреваются до 700–800 °С и вытягиваются. Блоки 26, через которые протянуты нагреватели, через термостойкие оси 32, траверсы 33 и стальные канатики 28, пропущенные через блоки 29 с диэлектрическими втулками 30, посаженными на горизонтальной оси 31, сопряжены с вертикально висящими грузами 27. Последние, создавая натяжение силой F , исключают провисание электрических нагревателей 5.

Регулируемый по частоте привод эксцентрика 7 (на рис. 1–3 не показан) создает возвратно-поступательное движение x_1 плунжера 9 в цилиндре корпуса 8, сжимающего-разжимающего пружину 10 с частотой возбуждения f_1 , Гц, и создает горизонтальные колебания x_2 подовой платформы 4 с рабочей поверхностью 1 и находящимся на нем вспучиваемым вермикулитом. Концентрат подается барабанным дозатором (на рис. 1–3 не показан) на правую часть поверхности 1 так, что, вспучиваясь, зерна вермикулита располагаются в непосредственной близости друг к другу.

Согласованная работа дозатора и вибропривода гарантирует высокую концентрацию вермикулита на поверхности подовой платформы, обеспечивая второе положение концепции.

Платформа совершает однонаправленные колебания, перекачиваясь на роликах 14 в направляющих 15. Суммарная жесткость цилиндрических 10, 11 и конических 12 пружин и масса подовой платформы с каркасом (масса вермикулита не учитывается) определяют собственную частоту колебаний f_2 , Гц, системы пружины – платформа.

При вращении эксцентрика с частотой f_1 , равной частоте собственных колебаний f_2 , система пружины – платформа вводится в резонанс, устанавливаются несимметричные колебания, обусловленные нелинейной характеристикой упругости конических пружин 12. Любая колебательная система, имеющая нелинейные пружины с одной стороны, обладает, так называемой мягкой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), резонансный пик которой загнут влево [2, 3]. Данная система пружины –

платформа также имеет мягкую АЧХ. Вход в резонансный режим происходит в момент, когда f_1 становится равной собственной частоте f_2 . При этом платформа начинает совершать колебания с возросшей в 5–10 раз амплитудой.

График колебаний платформы показан на рис. 4. Очевидно, что это несимметричные колебания, при которых, как известно, возникает односторонний транспортный эффект. Они характеризуются тем, что максимальное абсолютное ускорение, направленное вправо, не равно максимальному абсолютному ускорению, направленному влево. Если максимум ускорения влево $\ddot{x}_{\max L}$ больше (как в данном случае), чем максимум ускорения вправо $\ddot{x}_{\max П}$, и при этом будет выполняться условие [2, 3]

$$\ddot{x}_{\max П} > \mu G / m > \ddot{x}_{\max L},$$

то частица и весь поток вермикулитовых зерен будут двигаться влево без отрыва от рабочей поверхности 1, при этом движение будет иметь однонаправленный пульсирующий характер с некоторой средней скоростью (μ — коэффициент трения вермикулита по металлической поверхности; G — вес вермикулитовой частицы, Н; m — масса вермикулитовой частицы, кг).

В резонансе изменять амплитуду колебаний платформы можно за счет расстройки частоты эксцентрика f_1 и собственной частоты f_2 . При этом амплитуда колебаний системы может изменяться от максимума до амплитуды дорезонансного режима. Таким образом происходит управление виброперемещением x_2 , амплитудой виброскорости ωA и амплитудой виброускорения $\omega^2 A$ колебательной системы (где $\omega = 2\pi f$), обеспечивается изменение средней скорости движения вермикулита по рабочей поверхности 1 подовой платформы и управление временем обжига.

Несимметричные колебания подвижной подовой платформы, вызывающие транспортный эффект, обеспечивают третье и четвертое положения о постоянстве средней скорости вер-

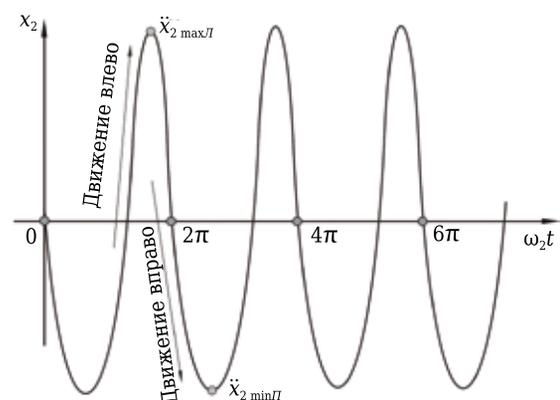


Рис. 4. График виброперемещений колебательной системы пружины – платформа

микулита, ее регулировании и возможность настройки продолжительности обжига.

Подбирая продолжительность обжига и температуру электрических нагревателей, можно настроить работу печи на требуемый режим в зависимости от фракционного состава вермикулитового концентрата и его вида.

Вспучивающиеся вермикулитовые зерна находятся под непосредственным тепловым излучением, идущим от электрических нагревателей 5, рабочей поверхности 1 и отражательной пластины 35, поглощают эту энергию, вспучиваются и в готовом виде выходят из печи по лотку 38. Вместе с тем поток вермикулита находится под электрическими нагревателями, а не между ними в продольных камерах, как в электрических модульно-спусковых печах [4].

Эта особенность печи реализует пятое положение новой концепции — устраняет непосредственный контакт вермикулита с электрическими нагревателями, исключая образование нагара на них, что часто имеет место в электрических модульно-спусковых печах и приводит к отказу в работе [5].

В статье [1] показано, что увеличение концентрации зерен вермикулита на рабочей поверхности в пространстве обжига от 10208 до 11261 шт./м² (10,3 %) приводит к снижению удельной энергоемкости процесса на 6,2 %. Теперь сравним расчетные концентрации на модулях трехмодульной опытно-промышленной печи, рассмотренной в работе [1], и на подвижном поде новой электрической печи.

Трехмодульная печь при средней продолжительности обжига $t = 2,84$ с и производительности $P_V = 1,75$ м³/ч имела размеры модуля — ширина $B = 0,96$ м, длина $L = 0,89$ м (0,96 × 0,89). В пересчете на вспученный материал суммарный объем зерен, одновременно находящихся на трех модулях печи, равен:

$$V_2 = P_V \cdot t \cdot (1 - 0,365) / 3600, \quad (1)$$

где 0,365 — коэффициент пористости массива вспученного вермикулита [6]; $P_V / 3600$ — перевод размерности производительности м³/ч в м³/с.

Суммарный объем составляет $876600 \cdot 10^{-9}$ м³, а объем одного зерна V_z , вспученного из частицы со средним условным диаметром $D = 4$ мм, равен $33,5 \cdot 10^{-9}$ м³.

Количество одновременно находящихся в печи зерен $m = 876600 / 33,5 = 26167$.

Количество зерен на одном модуле $m_1 = 26167 / 3 = 8722$.

При рядной структуре расположения зерен на поверхности (это модель регулярной структуры вермикулитового потока, принятая в работе [1]) среднее расстояние между осями зерен (шаг) $\delta = 0,0107$ м, а зазор между ними 0,0067 м. Концентрация вермикулита на одном модуле равна $\kappa_{3м} = 8722 / (0,96 \times 0,89) = 10208$ шт./м².

В новой печи движение вермикулитового потока организовано так, что соблюдается равенство $\delta = D$, при котором зерна прилегают друг к другу и занимают всю поверхность подвижной подовой платформы. Пусть ее размеры равны размерам модуля 0,96 × 0,89 м. Тогда количество зерен по ширине B и длине L платформы будет равно:

$$n_1 = B / D = 960 / 4 = 240,$$

$$n_2 = L / D = 890 / 4 = 222.$$

Общее количество зерен на подовой платформе будет равно 53280 шт., а концентрация вермикулита, определяемая отношением $\kappa_n = 53280 / (0,96 \times 0,89) = 62359$ шт./м², увеличится в 6 раз.

Пусть время движения вермикулита по платформе будет не менее 3 с при эквивалентных температурных условиях (на поверхности нихрома ~ 750 °С). Следовательно, вибропривод подовой платформы должен обеспечивать среднюю скорость движения вспучивающихся зерен $v_{cp} = 0,3$ м/с. Это значительная скорость для виброперевозки сыпучих материалов по горизонтальным поверхностям, но она может быть достигнута не только оптимальным выбором параметров колебательной системы пружины — платформа, но и наклоном платформы в сторону движения вермикулита [3].

Исходя из формулы (1) производительность печи P_V , м³/ч, будет равна:

$$P_V = \frac{V_z \cdot 3600}{t \cdot (1 - 0,365)} = \frac{53280 \cdot 33,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3600}{3 \cdot 0,635} = 3,36.$$

Если в опытно-промышленной трехмодульной печи размеры модуля равны размерам подовой платформы, то потребление электроэнергии новой печью должно уменьшиться втрое, так как вместо трех комплектов нагревателей в ней будет только один. Вместе с тем при примерно равных температурных условиях (~ 750 °С) и несколько большей продолжительности обжига (3 с против 2,84 с) производительность возрастает от 1,75 до 3,36 м³/ч.

Удельная энергоемкость обжига вермикулитовых концентратов в опытно-промышленной печи в среднем по разным размерным группам концентратов $e_{3м} = 250,1$ мДж/м³ [1]. Тогда этот показатель у новой печи с подвижной подовой платформой должен быть равен:

$$e_n = \frac{e_{3м} P_V}{3 \cdot P_{Vн}} = \frac{250,1 \cdot 1,75}{3 \cdot 3,36} = 43,4 \text{ мДж/м}^3.$$

При этом можно ожидать, что удельная энергоемкость новой печи относительно наиболее совершенной электрической ППС-печи с «нулевыми» модулями, работающими на рекуперированной тепловой энергии [1], уменьшится в 4 раза ($175 / 43,4 = 4,03$), абсолютное потребление электроэнергии будет составлять 36–38 кВт.

На рис. 5 показано изменение удельной энергоёмкости и производительности при переходе от электрических модульно-спусковых печей к новым печам с подвижной подовой платформой.

Графики на рис. 5 наглядно показывают преимущества печей новой концепции и переход в новому качеству энерготехнологических агрегатов для обжига вермикулита. Эти результаты обусловлены реализацией двух основных положений новой концепции — устранением модульности и значительным повышением концентрации вермикулита на подовой платформе при сохранении однослойности потока сыпучей среды.

При удельной энергоёмкости обжига 40–45 мДж/м³ электроэнергия уже не будет обходиться дороже, чем энергия сжигаемого углеводородного топлива, которая используется в традиционных огневых печах с энергоёмкостью 260–300 мДж/м³ [7] (уменьшение в 6,0–6,5 раза), и эксплуатировать такие печи можно будет в любых регионах страны.

Еще одним (шестым) положением новой концепции является обеспечение равномерности распределения температур по ширине подовой платформы.

Измерение температур нагревателей и огнеупорной поверхности внутри продольных камер в модульно-спусковых печах показало [6], что в пристеночных зонах модулей температуры ниже, чем в центре. Это обстоятельство приводит к тому, что вермикулит на выходе из печи по краям остается частично недовспученным: отклонение насыпных плотностей вермикулита, выходящего в центре и по краям, составляет 3–5 %.

Для устранения этого недостатка ширину продольных камер в пристеночных зонах приходилось делать меньше, чем в центре, но при этом необходимо было, чтобы самые узкие камеры удовлетворяли условию

$$r_{\min} \approx (9 \pm 15) D, \quad (2)$$

где D — средний условный диаметр частиц исходного вермикулитового концентрата, определяющий его размерную группу [6]. Условие (2) исключает образование заторов вермикулита в продольных камерах, но в модульно-спусковых печах для соблюдения этого условия необходимо увеличивать шаг установки электрических нагревателей, что существенно снижает температуру основания между ними. Расположение электронагревателей над вермикулитовым потоком (см. рис. 1) в новой печи позволяет не беспокоиться о соблюдении условия (2).

Рассмотрим схему закрепления, распределения и натяжения нагревателей на крышке печи (см. рис. 3, показана половина крышки). Крепежные головки 19 имеют одинаковую ширину, определяющую шаг r_5 . Шаг $r_4 = r_6$ между головками больше, чем r_5 , но это обусловлено

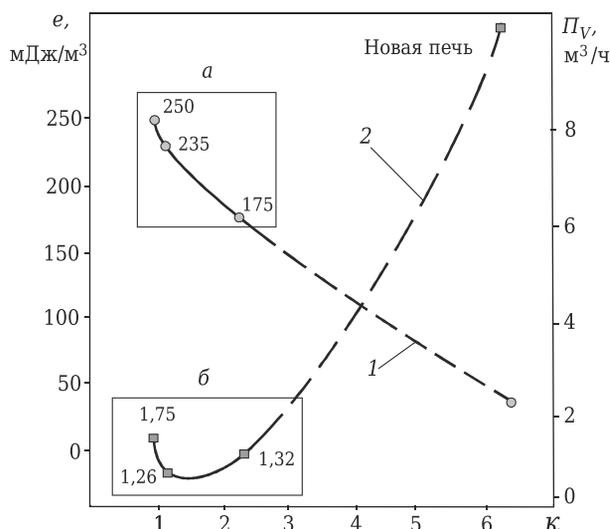


Рис. 5. Изменение удельной энергоёмкости (1) и производительности (2) при переходе от электрических модульно-спусковых печей (ЭМСП) к печам новой концепции: а — область значений энергоёмкости; б — область значений производительности ЭМСП. Пунктиром обозначена область виртуальных печных агрегатов, занимающих промежуточное конструктивное состояние

удобством доступа к резьбовым соединениям 25. При использовании головок с профрезерованными пазами, позволяющими при разборке не вытягивать шпильки вдоль своих осей, а вынимать их вместе с шайбами и гайками в собранном виде [8], конструкцию креплений можно сделать так, что шаг нагревателей в центральной части будет равным $r_4 = r_5 = r_6$.

В пристеночных зонах шаг переменный: $r_3 > r_2 > r_1$. Этим достигается большая мощность тепловых потоков, падающих на вспучивающийся вермикулит, находящийся на подвижной подовой платформе.

Возьмем условную (виртуальную) рамку размерами $a \times b$. Пусть эти размеры таковы, что при любом положении рамки в центральной части (координаты центра рамки x_1, \dots, x_5) она охватывает только два электрических нагревателя. При переносе рамки в пристеночную зону она будет охватывать уже три нагревателя (x_6 и x_7). Если потребляемая мощность печи составляет 37000 Вт, то при двадцати нагревателях на каждый из них придется 1858 Вт. Пусть размер a рамки равен 0,1 м при длине нагревателя 0,89 м. Тогда, с учетом допущения, что вся электрическая энергия преобразуется в тепловую, можно рассчитать мощность теплового потока, падающего на вермикулит внутри одной рамки в зависимости от ее положения:

– $x = x_1, \dots, x_5$: мощность в центральной зоне равна $N_{ц.з} = 2 \cdot 1858 \cdot 0,1 / 0,89 = 417,5$ Вт;

– $x = x_6 = x_7$: мощность в пристеночной зоне равна $N_{п.з} = 3 \cdot 1858 \cdot 0,1 / 0,89 = 626,3$ Вт.

Распределение мощности теплового потока, падающего с поверхностей электрических нагре-

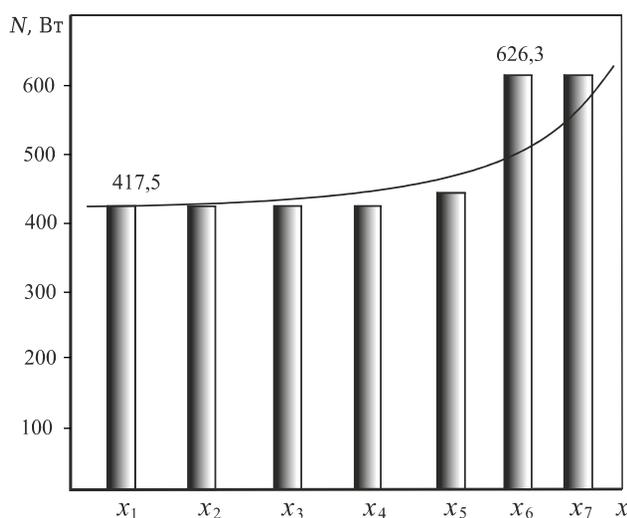


Рис. 6. Распределение мощности тепловых потоков нагревателей по рабочей поверхности в пределах площади рамки ($a \times b$)

вателей на рабочую поверхность подовой платформы на площади, равной $a \times b$, показано на рис. 6 в виде гистограммы. Очевидно, что тепловая энергия не может распределяться дискретно, так как в соответствии с правилом «натянутых нитей» [9] тепловое излучение электрических нагревателей, расположенных, например, в области рамки с координатой x_7 , будет достигать всех участков поверхности платформы, правда, с уменьшением мощности потока в зависимости от отдаленности участка. Аналогично распределяется энергия и от других нагревателей.

Библиографический список

1. **Нижегородов, А. И.** Пути и пределы повышения энергоэффективности электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулита. Переход к новой концепции / А. И. Нижегородов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 13–18.
2. **Бауман, В. А.** Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. И. Быховский. — М.: Высш. школа, 1977.
3. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. — М.: Машиностроение, 1981. — 509 с.
4. **Пат. 2351862 РФ, МПК F 27 В 9/00.** Электрическая печь для обжига вермикулитовых концентратов / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Нижегородов А. И. — № 2007133939; заявл. 11.09.07; опубл. 10.04.09, Бюл. № 10.
5. **Нижегородов, А. И.** Факторы надежности энерго-технологических агрегатов для обжига вермикулита / А. И. Нижегородов // Строительные и дорожные машины. — 2015. — № 5. — С. 13–18.
6. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск: ИРНИТУ, 2015. — 250 с.
7. **Нижегородов, А. И.** Эффективность огневых и электрических модульно-спусковых печей для обжи-

На рис. 6 показано также примерное распределение мощности падающих эффективных потоков в зависимости от координаты участка. Точное распределение этих мощностей и, соответственно, температур на рабочей поверхности подвижной платформы может дать только аналитическая модель, основанная, например, на методе сальдо-потоков [10], дающем весьма точные результаты [11].

Работа по изучению возможностей энерго-технологических агрегатов новой концепции применительно к обжигу вермикулита и термоактивации других минералов [12] еще в самом начале. Необходимо провести моделирование процесса управления движением сыпучей среды на подовой платформе печи, процессов теплоусвоения и переноса теплового излучения на обрабатываемую среду с учетом ее оптических свойств, установить энергетические соотношения при теплоусвоении вермикулита и иных минералов, а также выполнить целый ряд экспериментальных исследований.

Но сделанный прогноз обнадеживает. К настоящему времени уже разработана техническая документация на опытный образец печи с подвижной подовой платформой и ведется ее изготовление.

Поддержано грантом ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (заявка С1-11374, приказ № 22-39 от 04. 03.2016).

га вермикулита / А. И. Нижегородов // Технология машиностроения. — 2010. — № 1. — С. 32–34.

8. **Пат. 141915 РФ, МПК F 27 В 15/14.** Электрическая печь для обжига вермикулита / Нижегородов А. И.; заявитель и патентообладатель Нижегородов А. И. — № 2014106514/02; заявл. 20.02.14; опубл. 20.06.14, Бюл. № 17.

9. **Крейт, Ф.** Основы теплопереноса: пер. с англ. / Ф. Крейт, У. Блэк. — М.: Мир, 1983. — 512 с.

10. **Телегин, А. С.** Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.

11. **Нижегородов, А. И.** Исследование теплопереноса в электрических модульно-спусковых печах для обжига вермикулита с учетом свойств поглощающей среды / А. И. Нижегородов // Огнеупоры и техническая керамика. — 2014. — № 5. — С. 29–36.

12. **Кременецкая, И. П.** Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентиносодержащих вскрышных пород / И. П. Кременецкая, О. П. Корытная, Т. Н. Васильева [и др.] // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2008. — № 4. — С. 33–40. ■

Получено 28.04.16

© А. И. Нижегородов, 2017 г.

Д. х. н. А. В. Беляков (✉), Зо. Е. Мо. У, Н. А. Попова,
И. А. Мин, В. А. Каримова

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия

УДК 666.3/7:539.2/6

УПРОЧНЯЮЩИЕ СВЯЗУЮЩИЕ ДЛЯ ПОРИСТОЙ ПРОНИЦАЕМОЙ КЕРАМИКИ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ ЭЛЕКТРОПЛАВЛЕННОГО КОРУНДА

Изучена прочная пористая проницаемая керамика, полученная подбором зерновых составов с наполнителем из электроплавленного корунда марок F600 (100–120 мкм); F360 (40–60 мкм) и F120 (10–20 мкм). В качестве упрочняющих связующих использовали высокодисперсные порошки корунда (~2 мкм), легированного 0,25 мас. % MgO; смесь порошков SiC (размер частиц 3–4 мкм) и MgO (размер частиц 1–2 мкм) в соотношении 2:1. Образцы в виде балочек размерами 60×15×5,5 мм получали одноосным полусухим прессованием под давлением 50 МПа (для монофракционных составов) и 25 МПа (для трехфракционных составов). Обжиг образцов проводили на воздухе при температурах от 1350 до 1550 °С. Открытая пористость образцов изменялась от 28 до 43 %, предел прочности при изгибе — от 1 до 36 МПа. Наиболее высокая прочность была получена при использовании связующего в системе SiC – MgO (5 мас. % связующего сверх 100 % заполнителя, $\sigma_{изг}$ 36 МПа, открытая пористость 30 %).

Ключевые слова: прочная пористая проницаемая керамика, электроплавленный корунд, открытая пористость, добавки.

ВВЕДЕНИЕ

Пористая проницаемая керамика в основном применяется в качестве элементов керамических мембран, носителей катализаторов, диафрагм и др. [1–6]. К важнейшим задачам при производстве керамики такого назначения относится формирование структуры материала, соответствующей проводимому процессу. При изготовлении керамических фильтров и подложек мембран широко используют пористую проницаемую керамику на основе электроплавленного корунда (ЭПК), получаемую подбором зерновых составов. ЭПК обеспечивает керамике высокую прочность и химическую стойкость, но для ее спекания требуются высокие температуры обжига. Для снижения температуры обжига керамики и регулирования ее структуры обычно применяют добавки.

Несмотря на перечисленные преимущества, керамические материалы обладают рядом существенных недостатков. Соединения, лежащие в их основе, обладают высокой прочностью химической связи, что обуславливает необходимость высокотемпературного обжига при производстве. Хрупкий характер разрушения при достижении критических напряжений сдерживает применение керамических материалов. Поэтому для надежной и долговременной работы при ис-

пользовании высоких механических нагрузок, материал должен обладать достаточно высокой прочностью. Прочность пористой керамики, полученной варьированием зернового состава, определяется прежде всего прочностью связки и ее контактов с зернами заполнителя. При этом количество связки должно быть минимальным, чтобы высокая пористость сохранилась. Поры являются концентраторами напряжений и снижают прочность материала. Для получения керамики с заданной структурой и свойствами необходимо вводить добавки, которые регулируют структуру и понижают температуру обжига [7, 8]. Для упрочнения керамики, состоящей из зернистого заполнителя и высокодисперсной связки, успешно применяют упрочняющие связующие, образующие при обжиге жидкую фазу и частично или полностью кристаллизующиеся из расплава. Эффективность использования подобных добавок для упрочнения пористой керамики с наполнителем из глинозема марки ГК со средним размером сферолитов 70–120 мкм со связкой из смеси карбида кремния с активатором показана в работе [9]. В статье не приведен состав активатора, но указано, что по границам кристаллов из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ располагался клиноэнтацит. Для его получения необходимо присутствие оксида магния, который, видимо, входил в состав активатора.

Цель данной работы — выбор состава и количества связующего для получения пористой и достаточно прочной керамики на основе электроплавленного корунда (ЭПК) при температурах



А. В. Беляков
E-mail: av_bel@bk.ru

обжига от 1350 до 1550 °С. Для использования в качестве фильтрующих элементов наиболее пригодны пористые материалы с узким распределением пор по размерам и средним размером пор 4–6 мкм [10].

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве заполнителя использовали порошки электрокорунда с различными средними размерами зерен: F600 (100–120 мкм), F360 (40–60 мкм), F120 (10–20 мкм). В качестве упрочняющих добавок использовали связующие из порошка дисперсного оксида алюминия (размер зерен ~2 мкм), легированного MgO (0,25 мас.* %), а также добавку в системе SiC–MgO. Для ее получения смешивали порошки дисперсного SiC с размером зерен 3–4 мкм и MgO с размером зерен 1–2 мкм. Соотношение SiC и MgO по массе составляло 2 : 1. Связующие вводили сверх 100 % по отношению к заполнителю. Для монофракционных составов ЭПК (100–120; 40–60; 10–20 мкм) смешивание со связующим из дисперсного оксида алюминия, легированного MgO, проводили сухим способом в корундовом барабане с корундовыми мелющими телами в течение 3 ч (соотношение мелющие шары : материал = 1 : 1). Связующее системы SiC – MgO смешивали с ЭПК таким же способом. Содержание обоих видов связующего в смесях с ЭПК составляло 1, 3 и 5 %. Для композиционных составов был выбран ЭПК трех фракций: крупной, средней и мелкой. Содержание обоих видов связующего в смесях с трехфракционными составами ЭПК составляло 3 и 5 %. В табл. 1 приведены составы исследованных образцов.

Для приготовления формовочной массы в качестве временного технологического связующего использовали водный раствор поливинилового спирта (5 %). Временное технологическое связующее вводили в количестве 7 % от массы шихты. Раствор поливинилового спирта добавляли небольшими порциями к сухой смеси компонентов при непрерывном перемешивании. Увлажненную тщательно перемешанную массу подвергали дополнительной гомогенизации, протирая ее через сито № 3. Из полученной формовочной массы ме-

* Далее вместо мас. % пишется %.

тодом одноосного полусухого прессования изготавливали образцы-балочки размерами 60×15×6,5 мм. Для монофракционных составов давление прессования составляло 50 МПа, для трехфракционных составов 25 МПа. Образцы сушили при 80 °С в течение 24 ч, затем обжигали на воздухе в печи с нагревателями из хромита лантана. Образцы нагревали до 700 °С со скоростью 2 °С/мин, затем делали выдержку в течение 30 мин. Далее образцы нагревали до максимальной температуры обжига с различными скоростями: до 1350 °С со скоростью 140 °С/мин, до 1450 °С — 160 °С/мин, до 1500 °С — 180 °С/мин, до 1550 °С — 200 °С/мин. Во всех случаях время выдержки при максимальной температуре составляло 2 ч. Охлаждение образцов проводили вместе с печью.

Максимальные температуры обжига образцов исследованных составов (см. табл. 1), спрессованных под давлением 25 МПа, приведены ниже:

Состав.....	1	2	3	4	5	6	7	8
Максимальная температура обжига.....	1450	1450	1450	1450	1500	1500	1500	1500
	1500	1500	1500	1500	1550	1550	1550	1550

Открытую пористость, плотность и предел прочности при 3-точечном изгибе спеченных образцов определяли по методикам, описанным в работе [11].

Результаты определения пористости, средней плотности изделий и предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ спеченных образцов приведены в табл. 2. Для монофракционных составов со связующим Al₂O₃ (MgO), представленных в табл. 2, самый высокий предел прочности при изгибе (6 МПа) был получен на образцах из ЭПК F120 (10–20 мкм) с содержанием связующего 5 % при давлении прессования 50 МПа и температуре обжига 1350 °С. Самый высокий предел прочности при изгибе (7 МПа) при открытой пористости 42 % был получен на образцах монофракционных составов со связующим из системы SiC–MgO (SiC : MgO = 2 : 1) 3 %, полученных из ЭПК F120 (10–20 мкм) при давлении прессования 50 МПа и температуре обжига 1350 °С. Самая высокая открытая пористость (46 %) для образцов с $\sigma_{изг}$ 5,5 МПа была получена при следующих параметрах: заполнитель F360 (40–60 мкм) с 5 % связующего

Таблица 1. Составы исследованных образцов, состоящие из смеси трех фракций заполнителя из электроплавленого корунда и связующих из высокодисперсного Al₂O₃ (MgO) и системы SiC–MgO

Состав	Содержание заполнителя ЭПК, %, фракции, мкм			Упрочняющее связующее	Содержание упрочняющего связующего, %, сверх 100 % заполнителя
	10–20	40–60	100–120		
1	40	10	50	Al ₂ O ₃ (MgO)	5
2	40	10	50	Al ₂ O ₃ (MgO)	3
3	80	15	5	Al ₂ O ₃ (MgO)	5
4	80	15	5	Al ₂ O ₃ (MgO)	3
5	40	10	50	SiC–MgO	5
6	40	10	50	SiC–MgO	3
7	80	15	5	SiC–MgO	5
8	80	15	5	SiC–MgO	3

Al₂O₃ (MgO), давление прессования 50 МПа, максимальная температура обжига 1350 °С. Увеличение содержания связующего от 1 до 5 % приводило к повышению прочности. Следует отметить, что при уменьшении размера частиц ЭПК от 100–120 до 10–20 мкм механическая прочность образцов всех составов увеличивалась.

Влияние состава спекающей добавки на свойства пористой керамики изучали на образцах из электрокорунда F600, F360 и F120. В табл. 2 приведены свойства пористой керамики в зависимости от состава и количества упрочняющей добавки. С уменьшением размера частиц заполнителя возрастает количество межчастичных контактов. Прочность керамики можно повысить за счет увеличения количества межчастичных контактов и прочности применяемого связующего.

Введение в состав керамических материалов связующего из оксида алюминия, легированного оксидом магния, позволяет получить достаточно прочную корундовую керамику, состоящую из зерен заполнителя ЭПК с размером фракции 10–20 мкм, при пониженных для таких материалов температурах обжига за счет высокой дисперсности упрочняющего корундового связующего. Мелкие частицы корунда припекаются к поверхности зерен заполнителя и образуют между ними перемычки, упрочняя межчастичные контакты. В зависимости от дисперсности заполнителя после обжига при 1350 °С предел прочности при изгибе такой керамики составлял от 0,4 до 6,0 МПа.

Механизм упрочнения керамики, содержащей в качестве добавки SiC–MgO, состоял в следующем. По результатам оптической микроскопии в материалах, содержащих 5 % добавки, при 950–1100 °С происходило окисление дисперсного карбида кремния с образованием активного SiO₂. При дальнейшем повышении температуры образовавшийся SiO₂ начинал растворять присутствующий в составе добавки MgO с образованием жидкой фазы клиноэнстатитового состава. При 1350 °С жидкая фаза смачивала поверхность зерен заполнителя. При охлаждении материала происходила кристаллизация клиноэнстатита в виде сетчатой волокнистой структуры. Толщина перемычек между зернами заполните-

Таблица 2. Керамические свойства монофракционных образцов, спрессованных под давлением 50 МПа и обожженных при 1350 °С

Заполнитель	Размер частиц заполнителя, мкм	Содержание связующего, %, сверх 100 % заполнителя	Открытая пористость, %	Предел прочности при изгибе, МПа
<i>Упрочняющее связующее Al₂O₃ (MgO)</i>				
F600	100–120	1	45,6	–
		3	46,0	1,0
		5	45,4	5,5
F360	40–60	1	45,6	0,5
		3	46,4	1,1
		5	46,0	5,5
F120	10–20	1	39,8	0,5
		3	39,3	1,0
		5	42,0	6,0
<i>Упрочняющее связующее SiC–MgO (2 : 1)</i>				
F600	100–120	1	47,3	1,1
		3	45,0	0,8
		5	44,5	1,8
F360	40–60	1	43,0	2,0
		3	45,0	1,9
		5	44,0	4,5
F120	10–20	1	43,0	5,5
		3	42,0	7,0
		5	42,0	5,5

ля составляла 3–5 мкм, размер кристаллов клиноэнстатита достигал 1,5 мкм.

Результаты определения пористости, средней плотности изделий и предела прочности при изгибе спеченных образцов трехфракционного состава с упрочняющим связующим системы SiC–MgO представлены в табл. 3. Самым высоким пределом прочности при изгибе (31,5 МПа) характеризовались образцы, отпрессованные под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % с 5 % связующего системы SiC–MgO, после обжига при 1450 °С. Достаточно высокий предел прочности при изгибе (22,7 МПа) имели образцы, отпрессованные под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 % с 5 % связующего системы SiC–MgO, после обжига при 1450 °С. При снижении содержания добавки от 5 до 3 % прочность образцов всех составов значительно уменьшилась. Обжиг образцов из этих масс при более низкой температуре (1350 °С) привел к резкому уменьшению $\sigma_{изг}$.

Результаты определения пористости, средней плотности изделий и предела прочности

Таблица 3. Керамические свойства образцов трехфракционного состава со связующим SiC–MgO (2:1), отпрессованных под давлением 25 МПа и обожженных при 1450 °С

Состав (см. табл. 1)	Открытая пористость, %	Средняя плотность, г/см ³	Предел прочности при изгибе, МПа
5	32,5	2,5	22,7
6	33,4	2,4	18,3
7	37	2,3	31,5
8	40	2,2	17,6

при изгибе спеченных образцов трехфракционного состава с упрочняющей добавкой Al_2O_3 (MgO) приведены в табл. 4. Самый высокий предел прочности при изгибе (15,2 МПа) имели образцы, отпрессованные под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % с 5 % связующего Al_2O_3 (MgO), после обжига при 1450 °С. На 30 % меньше был предел прочности при изгибе (10,8 МПа) у образцов, отпрессованных под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 % с 5 % связующего Al_2O_3 (MgO), после обжига при 1450 °С. При снижении содержания связующего от 5 до 3 % значительно уменьшилась прочность образцов, содержащих смесь фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 %. Обжиг этих масс при более низкой температуре (1350 и 1450 °С) привел к резкому уменьшению $\sigma_{изг}$ всех образцов.

Результаты определения пористости, средней плотности изделий и предела прочности при изгибе спеченных образцов трехфракционного состава с упрочняющими связующими Al_2O_3 (MgO) и $SiC-MgO$ приведены в табл. 5. Самый высоким показателем $\sigma_{изг}$ (36 МПа) характеризовались образцы, отпрессованные под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % и связующего $SiC-MgO$ 5 % после обжига при 1500 °С. Предел прочности при изгибе образцов, отпрессованных под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 %

Таблица 4. **Керамические свойства образцов трехфракционного состава со связующим Al_2O_3 (MgO), отпрессованных под давлением 25 МПа и обожженных при температуре 1550 °С**

Состав (см. табл. 1)	Открытая пористость, %	Средняя плотность, г/см ³	Предел прочности при изгибе, МПа
1	37,5	2,5	10,8
2	38,5	2,45	10,2
3	41,86	2,3	15,2
4	42,87	2,28	12,6

Таблица 5. **Керамические свойства трехфракционных образцов, изготовленных при давлении прессования 25 МПа и обожженных при температуре 1500 °С со связующими Al_2O_3 (MgO) и $SiC-MgO$ (2:1)**

Состав (см. табл. 1)	Открытая пористость, %	Средняя плотность, г/см ³	Предел прочности при изгибе, МПа
1	35,0	2,5	6,2
2	36,0	2,4	5,7
3	42,55	2,3	12,0
4	43,7	2,3	10,4
5	28,5	2,6	33,0
6	29,0	2,6	26,0
7	30,0	2,5	36,0
8	32,0	2,5	27,6

с 5 % связующего $SiC-MgO$, после обжига при 1500 °С составил 33 МПа. Для трехфракционных составов с добавкой Al_2O_3 (MgO) самым высоким показателем $\sigma_{изг}$ (12 МПа) характеризовались образцы, отпрессованные под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % с 5 % связующего Al_2O_3 (MgO), после обжига при 1500 °С. Предел прочности при изгибе образцов, отпрессованных под давлением 25 МПа из смеси фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 % с 5 % связующего Al_2O_3 (MgO), после обжига при 1500 °С составил 6,2 МПа. При снижении содержания добавки от 5 до 3 % прочность образцов всех составов значительно уменьшилась.

Применение в качестве заполнителя смеси трех составов ЭПК (F120; F360; F600) позволило изготовить проницаемую прочную керамику спеканием на воздухе при 1450–1550 °С с добавками уплотняющих связующих 3 или 5 % сверх 100 % по отношению к заполнителю. В смеси трех фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 % со связующим Al_2O_3 (MgO) (3 % и 5 % сверх 100 %) открытая проницаемая пористость образцов незначительно снижалась (с 38,5 до 35 %) при повышении температуры обжига с 1500 до 1550 °С, но при этом значительно возрастала их прочность. При добавке 3 % связующего $\sigma_{изг}$ увеличивался от 5,7 до 10,2 МПа, а при 5 % — от 6,2 до 10,8 МПа. Для смеси трех фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % пористость также незначительно снижалась (с 43,7 до 41,86 %) при повышении температуры обжига с 1500 до 1550 °С, а предел прочности при изгибе увеличивался от 12 до 15,2 МПа при 5 % связующего и от 10,4 до 12,6 МПа при 3 %.

В смеси трех фракций ЭПК 10–20 мкм 40 %, 40–60 мкм 10 %, 100–120 мкм 50 % со связующим из системы $SiC-MgO$ (3 и 5 % сверх 100 %) открытая проницаемая пористость образцов значительно снижалась (с 33,6 до 28,6 %) при повышении температуры обжига с 1450 до 1500 °С, но при этом значительно возрастала их прочность. При добавке 3 % связующего предел прочности при изгибе увеличивался от 18,3 до 26 МПа, а при 5 % добавки — от 22,7 до 33 МПа. Для смеси трех фракций ЭПК 10–20 мкм 80 %, 40–60 мкм 15 %, 100–120 мкм 5 % пористость также значительно снижалась (с 40 до 30 %) при повышении температуры обжига с 1450 до 1500 °С, а предел прочности при изгибе увеличивался от 31,5 до 36 МПа при добавке 5 % связующего и от 17,6 до 27,6 МПа при 3 %.

Для заполнителя из электроплавленного корунда связующее системы $SiC-MgO$ при массовом соотношении $SiC : MgO = 2 : 1$ оказалось значительно более эффективно, чем связующее Al_2O_3 (MgO). Для монофракционных образцов влияние вида связующего было менее значи-

тельным, чем для трехфракционных. Прочность образцов монофракционных составов со связующим Al_2O_3 (MgO) была в 3 раза меньше, чем для трехфракционных. При использовании связующего системы $SiC-MgO$ прочность образцов монофракционных составов была значительно (в 5 раз) меньше, чем трехфракционных.

При обжиге образцов со связующим системы $SiC-MgO$ на воздухе SiC окисляется до SiO_2 . При этом может частично образовываться SiO . Прохождению реакции способствует MgO , связывающий образующийся SiO_2 . На диаграмме состояния системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ имеются эвтектики с температурами плавления 1355, 1365 и 1370 °C [12]. Присутствие SiO может дополнительно понижать температуры эвтектик. Благодаря появлению жидкой фазы спекание происходит интенсивно, что обеспечивает высокую прочность получаемой пористой керамики. Присутствие второй фазы может понижать химическую стойкость материала в некоторых областях применения. Различие в ТКЛР связующего и заполнителя может отрицательно проявиться при использовании материала в условиях изменяющихся температур, и особенно при термических ударах.

Хотя применение связующего Al_2O_3 (MgO) позволило получить значительно меньшую прочность, чем при использовании связующего

системы $SiC-MgO$, пористая керамика состоит из одной фазы — корунда. Это должно повышать ее химическую стойкость. Однофазность керамики будет приводить к тому, что на границах связки с заполнителем при термических ударах не возникнет напряжений, связанных с различием ТКЛР. Это должно повысить устойчивость керамики в условиях изменяющихся температур, и особенно при термических ударах.

В результате работы для монофракционных и трехфракционных составов заполнителя из ЭПК установлено, что повышения прочности пористой керамики и снижения температуры обжига можно достичь с помощью активных к спеканию связующих. Прочность пористой керамики исследованных составов возросла с увеличением содержания тонких фракций в заполнителе, ростом содержания связующего и повышением температуры обжига. Образцы трехфракционных составов заполнителя из ЭПК показали наиболее высокую прочность. Наибольшее влияние на прочность образцов оказывало связующее системы $SiC-MgO$. При этом открытая пористая пористость образцов находилась в пределах 40–45 %.

Полученные виды пористой керамики перспективны для использования в качестве фильтров и подложек керамических мембран, применяемых при высоких механических нагрузках.

Библиографический список

1. **Гузман, И. Я.** Высокоогнеупорная пористая керамика / И. Я. Гузман. — М. : Металлургия, 1971. — 283 с.
2. **Беркман, А. С.** Пористая проницаемая керамика / А. С. Беркман. — М. : Стройиздат, 1969. — 170 с.
3. **Rice, R. W.** Porosity of ceramics / R. W. Rice. — New York : Marcel Dekker, Inc., 1998. — 539 p.
4. **Андрианов, Н. Т.** Химическая технология керамики : уч. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.]. — М. : ООО РИФ «Стройматериалы», 2011. — 496 с.
5. **Hammel, E.** Processing and properties of advanced porous ceramics: an application based review / E. Hammel, O. L.-R. Ighodaro, O. I. Okoli // Ceram. Int. — 2014. — Vol. 40, No 10. — P. 15351–15370.
6. **Nettleship, I.** Applications of porous ceramics / I. Nettleship // Key. Eng. Mat. — 1996. — Vol. 122–124. — P. 305–324.
7. **Kim, Y. W.** Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics / Y.-W. Kim, J.-H. Eom, S. Raju // J. Asian Ceram. Soc. — 2013. — Vol. 1. — P. 220–242.
8. **Yang, Z.** Fabrication and characterization of porous alumina-based ceramics using silicone resin as binder / Z. Yang, J. Yu, Z. Ren [et al.] // Transcation of the Indian Ceramic Society. — 2016. — Vol. 75. — P. 40–46.
9. **Томила, Е. М.** Пористая прочная керамика на основе оксида алюминия / Е. М. Томила, О. В. Пронина, Е. С. Лукин, Г. Г. Каграманов // Стекло и керамика. — 2000. — № 6. — С. 23, 24.
10. **Tomilina, E. M.** Porous alumina-based ceramic / E. M. Tomilina, O. V. Pronina, E. S. Lukin, G. G. Kagramanov // Glass and ceramic. — 2000. — Vol. 57, № 6. — P. 23, 24.
11. **Bruno, G.** Thermal and mechanical response of industrial porous ceramics / G. Bruno, I. Pozdnyakova, A. M. Efremov [et al.] // Mater. Sci. Forum. — 2010. — Vol. 652. — P. 191–196.
12. **Андрианов, Н. Т.** Практикум по химической технологии керамики : уч. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.] ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : ООРИФ «Стройматериалы», 2005. — 336 с.
13. **Osborn, E. F.** Phase equilibrium diagrams of oxide systems / E. F. Osborn ; ed. A. Muan. — American Ceramic Society with the Edward Orton Jr. Ceramic Foundation, Columbus, OH, 1960. — 204 p. ■

Получено 02.10.16

© А. В. Беляков, Зо. Е. Мо. У, Н. А. Попова, Й. А. Мин, В. А. Каримова, 2017 г.

Д. т. н. С. А. Колесников (✉), к. т. н. М. Ю. Бамборин, к. т. н. В. А. Воронцов,
к. т. н. А. К. Проценко, к. х. н. Е. Г. Чеблакова

АО «НИИГрафит». Госкорпорация «АО «Росатом», Москва, Россия

УДК 666.762.81:621.3.035.2

ФОРМИРОВАНИЕ УРОВНЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Теплопроводность углеродных материалов — важный фактор обеспечения стойкости к термическому удару. Рассмотрено влияние технологических параметров на воспроизведение величины теплопроводности при производстве заготовок трехмерно армированного высокоплотного углерод-углеродного композита. Средний уровень теплопроводности от 46 до 56 Вт/(м·К) имели более 82 % заготовок. От 4,6 до 12,5 % заготовок имели теплопроводность не менее 44 и не более 70 Вт/(м·К). Установлено, что изменение температуры обработки углеродной нити от 1600 до 2400 °С может привести к росту теплопроводности материала на 0,21 Вт/(м·К) на каждые 100 °С. Различие в структуре каркаса может дать изменение средней величины теплопроводности в пределах 3 Вт/(м·К). Вариация уровня кажущейся плотности материалов от 1,89 до 1,98 г/см³ дает изменение теплопроводности на 1,1 Вт/(м·К) на каждую +0,01 г/см³. Для углерод-углеродного композита установлена связь электропроводности ρ и теплопроводности λ , соответствующая по форме закону Видемана – Франца $\lambda \cdot \rho = \text{const}$.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, углеродные материалы, термический удар, теплопроводность, электропроводность, плотность.

Стойкость к термическому удару во многих случаях ограничивает возможности практического применения сверхвысокотемпературных огнеупорных материалов. К сверхвысокотемпературным огнеупорным материалам следует относить материалы, сохраняющие конструкционные качества при температуре, равной или превышающей температуру испарения стали. Анализ основных термодинамических, теплофизических, физико-механических свойств и их фактические уровни для этого класса материалов имеется в работе [1].

Наиболее ответственным этапом эксплуатации огнеупорных конструкций является начальный временной интервал нагрева до рабочей температуры. Стойкость к термическому удару ограничивает работоспособность углеродных материалов (УГМ) при их применении как в высокотемпературных узлах летательных аппаратов [2, 3], так и в электродах в электрометаллургической промышленности [4]. В середине XX в. Кинджери и Хассельман предложили ряд критериев термостойкости, связывающих минимальный перепад температуры поверхности материала, приводящий к появлению трещин или разрушению, с такими показателями,

как предел прочности, температурный коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона, теплопроводность и теплоемкость [5]. Углеродные материалы, в том числе углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) и конструкционные графиты (КГ), при одинаковых уровнях истинной и кажущейся плотности, температуре обработки характеризуются практически неразличимой химической, эрозивной, сублимационной стойкостью. УУКМ принципиально выделяются механической прочностью и термической стойкостью. При этом любые виды критериев эффективности термостойкости являются формой записи оценки запаса прочности n , являющимся отношением предела прочности при растяжении $[\sigma]$ к действующим термическим напряжениям $\sigma_{\text{дейст}}$:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{дейст}}} = \frac{[\sigma](1-\mu)}{\alpha_T E \Delta T} = \frac{[\sigma](1-\mu)}{\frac{\alpha_T E \delta Q}{\lambda}}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент Пуассона; α_T — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль Юнга; ΔT — температурный градиент; δ — толщина; Q — тепловой поток.

При эксплуатации изделий одинаковой толщины δ при одинаковых тепловом потоке Q и температурном градиенте ΔT , относительно малой и постоянной величине коэффициента Пуассона μ для керамических материалов, высоких температурном коэффициенте линейного расширения α_T (ТКЛР) и модуле Юнга E



С. А. Колесников
E-mail: Skolesnikov@mtu-net.ru

В. Д. Кинджери [4, 5] превратил это выражение в упрощенное, принятое всеми как критерий Кинджери R :

$$n\delta Q \frac{1}{1-\mu} = R = \frac{[\sigma]\lambda}{\alpha_T E}, \quad (2)$$

где λ — средняя величина теплопроводности.

Критерий в подобной форме введен в приемно-сдаточную документацию продукции из объемно-армированных УУКМ [6, 7]. Наиболее развернутый вариант критерия с учетом временного фактора представлен [8] следующим выражением:

$$\Delta T_d = \frac{\sigma_d \cdot (1-\mu)}{\psi E \alpha} \cdot S, \quad (3)$$

где ΔT_d — разрушающий перепад температуры; σ_d — разрушающее напряжение (предел прочности материала); μ — коэффициент Пуассона, характеризующий способность материала пластически деформироваться под действием механической нагрузки; ψ — коэффициент, характеризующий скорость прогрева образца; E — модуль упругости; α — ТКЛР; S — фактор формы.

Такой вариант записи критерия позволяет определить разрушающий перепад температуры поверхности образца при «достаточно быстром» ее изменении, реализующемся на практике, например, в виде термодурагов.

Скорость изменения температуры поверхности учитывается коэффициентом ψ , который является функцией критерия Bi_0 , характеризующего соотношение скоростей теплообмена на поверхности и в толще материала:

$$\psi = \frac{r_m \alpha_{he}}{2 \lambda}, \quad (4)$$

где r_m — характеристический размер образца (толщина или диаметр); α_{he} — коэффициент теплообмена на поверхности; λ — теплопроводность.

Коэффициент ψ зависит от теплопроводности, изменяется от 0 до 1 и равен единице в том случае, если значение критерия Bi_0 превышает 20.

Известен также критерий термочерноты для нестационарного режима нагрева с учетом режима эксплуатации и отражения части тепловой энергии в окружающее рабочее пространство, который используют [9] в виде

$$R_{\Delta T \text{ var } iabl} = \frac{[\sigma](1-\nu)\sqrt{\lambda C_p \gamma}}{(1-\varepsilon)\alpha_T E}, \quad (5)$$

где ν — скорость; C_p — удельная теплоемкость материала; γ — плотность материала изделия; ε — степень черноты поверхности изделия.

Техническая ситуация, требующая применения критериев типа (3) или (5), в первую очередь относится к наиболее интенсивным по скорости нагрева температурным режимам эксплуатации. Например, время выхода на режим с давлением $(50-60) \cdot 10^5$ Па и рабочей температурой среды до

3600–3800 К рабочей стенки высокотемпературного узла может составлять ~ 100 мс [10].

В таких условиях эксплуатации в последние годы все большее практическое применение находят углерод-углеродные композиционные материалы [6, 11]. УУКМ вытесняют традиционные конструкционные графиты благодаря в 5–10 раз более высокой механической прочности, в 10–20 раз более высокому модулю упругости, в 2–3 раза меньшему ТКЛР, в 1,5–2,0 раза более высокой эрозионной стойкости, а главное, в 5–10 раз более высокой термостойкости [2] при ее расчете по каждому из рассмотренных критериев.

Композитное строение этих материалов позволяет также управлять теплопроводностью в отдельных направлениях конструкции. При этом может быть повышено сопротивление термическому удару только в направлении основного теплового потока в конструкции. Например, в работе [12] показано, что направленное изменение объемного содержания углеродного волокна по выбранным направлениям армирования для двух- и трехмерно армированного УУКМ привело к изменению теплопроводности на 10–40 % в направлении воздействия интенсивного теплового потока. Использование при армировании углеродных волокон с высокой степенью графитации позволило авторам изменить теплопроводность еще на 100 % в том же направлении. Для УУКМ на основе неграфитированных углеродных волокон (прекурсоры из вискозы) теплопроводность и температуропроводность с повышением температуры до 2700 °С возрастают в несколько раз. В этих же условиях для УУКМ из относительно малографитирующихся волокон (прекурсор полиакрилонитрил) и полностью графитированных (прекурсор каменноугольный пек) теплопроводность и температуропроводность с повышением температуры только снижаются. В последнем случае уровни теплопроводности и закономерности их изменения с ростом температуры полностью соответствуют этим показателям конструкционных графитов. Такие особенности теплофизических характеристик УУКМ при высоких температурах открывают возможности специального конструирования огнеупорных узлов, опираясь на технологическое управление уровнем и анизотропией теплофизических характеристик.

Как известно, перенос тепла в углеродных материалах [13] осуществляется в основном тепловыми колебаниями со звуковыми скоростями ν кристаллической решетки — фононами, уподобляемыми квазичастицам вещества, движущимся в базисных плоскостях кристаллитов (по длине кристаллита L_d):

$$\lambda = \frac{1}{3} C_v \nu [L]; \quad (6)$$

где C_v — удельная теплоемкость; L — длина свободного пробега фононов.

У материалов с так называемой аморфной или мелкокристаллической структурой размер бездефектных областей мал ($L_a \approx 2,0 \div 3,0$ нм), длина свободного пробега фононов L , которую считают кратной размеру кристаллита, также мала. В процессе термической обработки теплопроводность λ углеродных материалов может быть увеличена более чем на порядок. Увеличение теплопроводности происходит не только за счет уплотнения вещества, роста бездефектных областей кристаллической решетки, но и за счет уменьшения количества аморфного углерода, расположенного по границам упорядоченных областей. Тем самым уменьшается сопротивление колебаниям фононной системы и возрастает скорость прохождения звука. Степень графитированности по Франклин, оценка которой основана на измерении среднего межслоевого расстояния, пропорциональна уменьшению доли аморфного углерода.

Из изложенного следует, что теплопроводность углеродных материалов является важным фактором обеспечения стойкости к термическому удару. Для УУКМ представляется возможным не только технологическое управление теплопроводностью, но и достижение стерической модификации за счет изменения пространственной схемы армирования.

Целью настоящей работы является анализ влияния технологических и структурных параметров на воспроизведение величины теплопроводности при серийном производстве заготовок трехмерно армированного высокоплотного углерод-углеродного композита, осуществляемом в АО «НИИГрафит» [6, 7, 11]. Актуальность вопросов формирования коэффициента теплопроводности для УУКМ различной природы сохраняется до настоящего времени в связи с развитием областей применения продукции.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Температурная обработка

Высокотемпературную обработку образцов УУКМ проводили в камере диаметром 40 и длиной 1300 мм водоохлаждаемой печи графитации (температурный диапазон от 30 до 3000 °С) по режиму: нагрев от 2170 ± 30 до 2900 °С, изотермическая выдержка от 1 до 17 ч. Температуру внутри рабочей камеры печи измеряли при помощи оптического пирометра «Проминь», показатели с поверхности графитового нагревателя фиксировались через кварцевое стекло смотрового окна. Отклонение от истинного значения температуры, обусловленное такими факторами, как индивидуальная чувствительность оператора, поглощение среды и стекла в окне измерения, неточность учета степени черноты тела и другими менее значимыми факторами, составляло от -40 до +10 °С от номинального значения.

Определение плотности материала

Измерение величин кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$ проводили двумя способами: на устройстве GeoPyc 1360 (изготовлено фирмой «Micrometritics», США) и по методике МИ 00200851-162-2009. Измерение величин истинной плотности d_i проводили также двумя способами: на устройстве AccuPyc 1340 (изготовлено фирмой Micrometritics, США) и по методике МИ 00200851-329-2010.

Для ряда исследуемых образцов определяли кажущуюся $\rho_{\text{каж}}$ и пикнометрическую ρ_n плотности и открытую пористость $P_{\text{отк}}$ в соответствии с методикой ГОСТ 2409, используя в качестве замещающей среды изооктан эталонный (ГОСТ 12433) с низким поверхностным натяжением $\sigma = 18,77 \cdot 10^{-3}$ Н/м при 20 °С, для которого известна температурная зависимость плотности с погрешностью $\pm 0,00005$ г/см³.

Плотность и открытую пористость крупногабаритных заготовок и заготовок сложных геометрических форм определяли гидростатическим способом. Методика аттестована в пределах значений открытой пористости от 5 до 35 %.

Параметры кристаллической решетки графита

Рентгенофазовый анализ проводили по методике МИ 00200851-343-2011 на порошковом дифрактометре D8 Advance фирмы «Bruker» в геометрии «на отражение», оснащенном рентгеновской трубкой с медным анодом. Образец перетирали до фракции мельче 80 мкм и укладывали тонким слоем на плоскую кювету из аморфного кварца. В качестве внутреннего стандарта в образец добавляли порошок кремния. Съёмку дифрактограммы проводили с шагом 0,02° и экспозицией в точке 11 с. Обработку данных проводили с помощью программы TOPAS.

Размеры кристаллитов L_c и L_a компонентов УУКМ (волокна и матрицы) рассчитывали по формуле Селякова – Шеррера [14]:

$$L = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (7)$$

где L — размер кристаллитов; λ — длина волны излучения; θ — угол падения луча; β — полуширина рефлекса.

По рефлексу (002) оценивается размер ОКР вдоль оси c , по рефлексу (110) — вдоль оси a . Положение рефлексов на шкале 2θ связано с межплоскостным расстоянием уравнением Вульфа – Брегга:

$$2d \sin\theta = n\lambda, \quad (8)$$

где d — межплоскостное расстояние; n — целое число.

По угловому положению 2θ интерференционного максимума (002) определяется межплоскостное расстояние d_{002} .

Степень графитации компонентов УУКМ рассчитывали по формуле Франклин:

$$g = \frac{d_{002} - d_{np}}{d_t - d_{np}}, \quad (9)$$

где g — степень графитации; d_t — межплоскостное расстояние в турбостратной структуре (3,44 Å); d_{np} — межплоскостное расстояние в структуре природного графита (3,354 Å); d_{002} — межплоскостное расстояние в структуре исследуемого компонента УУКМ.

В УУКМ на основе углеродных высокомодульных волокон (прекурсор полиакрилонитрил) и углеродной матрицы (прекурсор каменноугольный пек), получаемых по технологии изостатической карбонизации [6, 11], дифрактограммы образцов моделировались двумя фазами: турбостратной и графитоподобной. Турбостратную фазу относили к углеродным волокнам из полиакрилонитрила, которые при технологических температурах до 2170 °С не достигают высокой степени графитации. Графитоподобную фазу относили к углеродной матрице из каменноугольного пека, графитация которой начинается с температуры 2000 °С. Известно, что кинетика графитации по результатам испытаний коксов каменноугольных и нефтяных пеков описывается следующим типовым выражением:

$$g = (0,0002t, \text{ } ^\circ\text{C} - 0,3085) \ln t, \text{ мин} + (0,0004t, \text{ } ^\circ\text{C} - 0,5487). \quad (10)$$

Определение теплопроводности при температуре (300+10) К

Сущность метода заключается в измерении величины теплового потока, пропускаемого через испытуемый образец, и возникающего при этом перепада температур между рабочими поверхностями образца.

Установка для определения теплопроводности состоит из термостатируемой камеры, в которой находится медный термостатируемый теплоприемник, цилиндрический корпус охлаждается водой. На блоке нагрева с помощью дифференциального термоэлектрического термометра устанавливают температуру регулирования от 20 до 30 °С. Измерение разности потенциалов на концах дифференциального термоэлектрического термометра проводят микровольтметром (класс точности 0,005).

Предельная относительная погрешность величины теплопроводности составляет не более 10 % при доверительной вероятности $P = 0,95$ с учетом предельной относительной погрешности величины теплопроводности.

Определение удельного электрического сопротивления

Удельное электрическое сопротивление определяли на образцах углеродного материала с механически обработанной ровной поверхностью (Rz не более 60). Метод основан на измерении величин

электрического сопротивления в приповерхностном слое углеродного материала при помощи датчика вихревого тока, создающего на поверхности УГМ возбуждение, сила которого различна в местах изменения структуры материала.

Определение модуля упругости динамическим методом и скорости звука

Сущность метода заключается в определении собственной резонансной частоты продольных колебаний образца, установленного между двумя пьезоэлектрическими преобразователями. Один из них предназначен для ввода колебаний в образец со звукового генератора, другой — для преобразования механических колебаний образца в электрические сигналы, подаваемые на счетное устройство и индикатор резонансов.

При расчете динамического модуля упругости использовали зависимость упругих свойств материала от его собственной частоты продольных колебаний при условии, что поперечные размеры образца малы по сравнению с его длиной ($l/a \geq 5, l/d \geq 5$, где a — наибольший размер поперечного сечения образца, d — диаметр образца, l — длина образца).

Набор основного оборудования измерительного устройства включает электронный частотомер, обеспечивающий измерение частоты в диапазоне от 1 до 100 кГц с погрешностью не более 0,003 % (ГОСТ 22385); генератор синусоидальных сигналов, низкочастотный, любого типа, имеющий диапазон частот от 1 до 100 кГц и величину нелинейных искажений более 0,7 % (ГОСТ 23767) и микроамперметр любого типа с пределом измерений до 300 мкА не ниже 1-го класса (ГОСТ 8711).

Величину динамического модуля упругости E , ГПа, определяли по формуле

$$E = -4 \cdot 10^{-6} f^2 l^2 \gamma, \quad (11)$$

где f — частота собственных продольных колебаний образца, Гц; l — длина образца, м; γ — плотность материала образца, г/см³.

Скорость звука в образце определяется как

$$C = \sqrt{\frac{E}{\gamma}}. \quad (12)$$

Экспериментальной базой настоящего исследования служила совокупность результатов контроля качества материала более 300 заготовок серийной продукции, результатов дополнительного исследования свойств углеродных материалов и анализа исполнения технологических процессов. Заготовки представляли собой толстостенное кольцо, из которого механической обработкой изготавливали целевые изделия. Основными фрагментами технологии изготовления высокоплотных УУКМ являются до пяти последовательных процессов изостатической карбонизации, получившей в иностранной

литературе обозначение «High pressure – high temperature» [15].

Стандартный контроль качества материала серийной продукции включает определение кажущейся плотности, пределов прочности при сжатии и растяжении, модуля упругости динамическим методом, ТКЛР до 2800 °С и теплопроводности в области комнатных температур. Дополнительно исследовали изменение удельного электросопротивления и параметры кристаллической решетки графита — среднее межслоевое расстояние и рассчитываемую из него степень графитации по Франклин.

Анализ стабильности производства проводили в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО-9001 и ГОСТ РВ 15.002–2003. На рис. 1, например, представлены карты стабильности (диаграммы Шухерта) воспроизведения теплопроводности для разных групп заготовок. Все заготовки имели трехмерное армирование и уровень кажущейся плотности не менее 1900 кг/м³. В поле рис. 1 показаны ограничительные уровни ($\pm 2,3$ стандартного отклонения) воспроизведения характеристики с уровнем надежности $\sim 0,98$. Как видно, в совокупности последовательно выпущенных заготовок первой и второй

группы имели место значимые одиночные и повторные отклонения от среднего уровня теплопроводности. При определении величины теплопроводности установлено относительно низкое среднее значение стандартного отклонения (3,26 Вт/(м·К)) экспериментального определения теплопроводности на 16 образцах (по 8 определений в плоскостях XY и XZ) для каждой заготовки. Это означает устойчивость объективности измерения средней величины теплопроводности. Увеличение в некоторых случаях числа испытанных образцов вдвое не повлияло на уровень стандартного отклонения, что является показателем стабильности методического обеспечения.

На рис. 1, а группа заготовок 2 имеет статистически значимое отличие теплопроводности от базовой совокупности 1. На рис. 1, б приведены результаты измерения теплопроводности по осям армирования как Z, так и X(Y) второй совокупности заготовок. Различия значений теплопроводности по направлениям армирования статистически незначимы ($\Delta\lambda$ меньше одной величины стандартного отклонения). Поэтому совокупность 1 может считаться статистически аномально выделяющейся по теплопроводности.

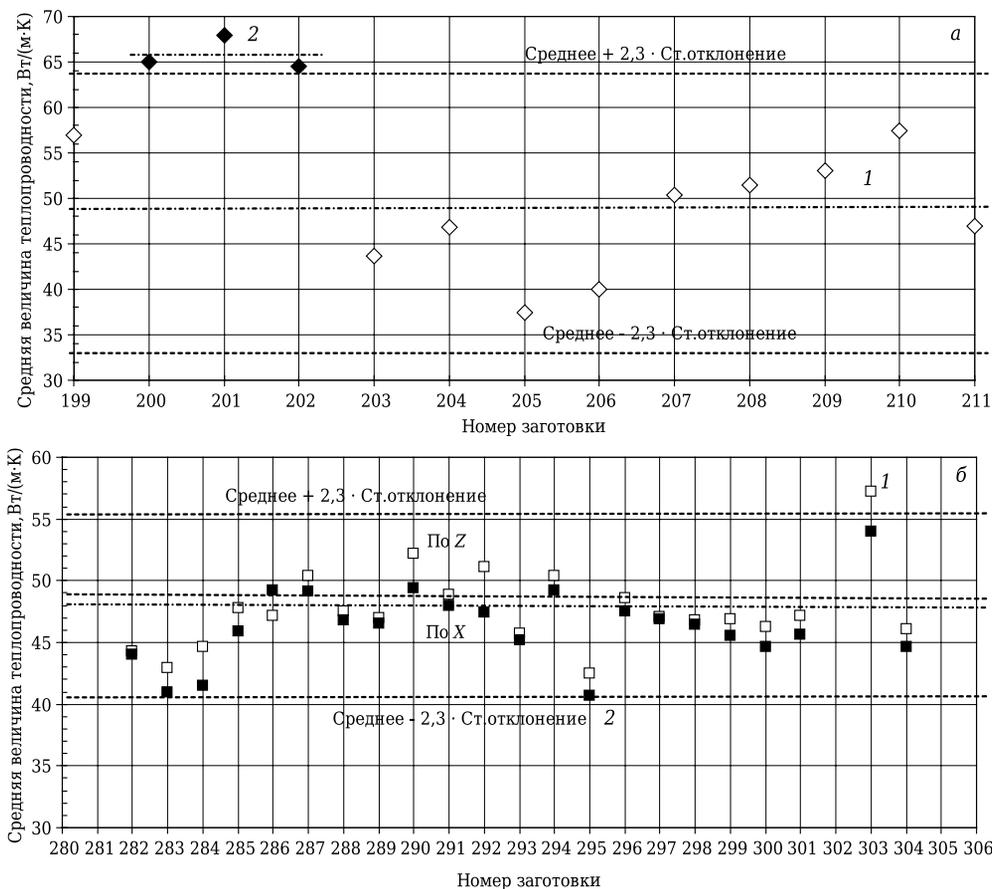


Рис. 1. Уровень теплопроводности материала заготовок при последовательном изготовлении продукции. Карты стабильности воспроизведения средней величины теплопроводности при выпуске продукции: а — 1 — базовая совокупность, 2 — совокупность с аномальным уровнем теплопроводности; б — 1, 2 — заготовки с аномальными уровнями теплопроводности

сти. Значения для заготовок № 283 и 295 (см. рис. 1, б) также свидетельствуют о технологических аномалиях.

Обработка всего объема карт стабильности по выпущенным заготовкам показала, что средний уровень теплопроводности от 46 до 56 Вт/(м·К) имели более 82 % заготовок. От 4,6 до 12,5 % заготовок имели теплопроводность не менее 44 и не более 70 Вт/(м·К). Влияние отдельных технологических факторов, вызывающих аномальные результаты, выясняли также сопоставлением результатов испытаний заготовок, изготовленных по отдельным программам, связанным с изменением сырья и технологических условий. Так, установлено, что применение исходных каменноугольных пеков различных заводов-изготовителей России и Украины не оказывает влияния на уровень физико-механических и теплофизических свойств высокоплотного композита. В таблице приведены сравнительные данные об изменении теплопроводности заготовок, различающихся типом армирующего углеродного волокна, от температуры измерения. Легко видеть из аппроксимационных уравнений зависимости теплопроводности от температуры испытания, что при комнатных температурах (300 К) уровни теплопроводности материала заготовок значительно разнятся. Однако при высоких температурах, когда $T^{-1} \rightarrow 0$, различие значительно только для материала на основе разных углеродных волокон.

Из таблицы также следует, что тип выбранной углеродной нити повлиял на уровень теплопроводности в существенно большей степени, чем способ сборки каркаса. Температура промышленной высокотемпературной обработки углеродной нити из полиакрилонитрила марки ВМН-4а (~2400 °С) существенно выше, чем для углеродной нити из полиакрилонитрила марки УКН-5000 (1600–1700 °С). Применяемая в производстве максимальная технологическая температура изготовления композита Десна Т-1 примерно 2170 °С, как видно, не нивелировала исходное различие физического состояния вещества углеродных наполнителей. Замена волокна УКН-5000 на ВМН-4а показывает, что повышение температуры обработки углеродной нити от 1600 до 2400 °С (на 800 °С) приводит к

росту теплопроводности материала Десна Т-1 на 21 Вт/(м·К). В результате можно ожидать, что на +100 °С температуры обработки углеродной нити можно ожидать до 2,625 Вт/(м·К) повышения теплопроводности. В случае различий в сборке каркаса отклонение средней величины теплопроводности составит примерно ту же величину — около 3 Вт/(м·К).

Из анализа диаграмм Шухерта по ГОСТ РВ 15.002 установлено, что вариация уровня кажущейся плотности материалов от 1,89 до 1,98 г/см³ (границы размаха параметра) дает изменение теплопроводности 1,1 Вт/(м·К) на каждые +0,01 г/см³. В штатном интервале уровней кажущейся плотности материалов Десна-1 от 1,93 до 1,97 г/см³ можно ожидать размах уровня средней величины теплопроводности примерно на 9,9 Вт/(м·К). Это превышение соизмеримо со статистическими границами верхнего и нижнего уровней на рис. 1.

Традиционным технологическим приемом управления уровнем теплопроводности углеродных конструкционных графитов является вариация предельной температуры обработки. При повышении температуры обработки средний размер кристаллита и вместе с ним длина свободного пробега (параметр [L] в выражении (6)) фоновых колебаний могут возрастать в несколько раз.

Для настоящих УУКМ экспериментально исследовали изменение теплопроводности, измеряемой в области комнатных температур, в зависимости от максимальной технологической температуры обработки в интервале от 2100 до 2800 °С. Сопоставление теплопроводности с температурой обработки конструкционных графитов [9] и трехмерно армированного УУКМ с углеродной матрицей на основе коксов из каменноугольного пека показано на рис. 2. Как видно, для УУКМ уровень теплопроводности несколько выше, чем справочный для УГМ. Основной причиной этого является высокая теплопроводность ($\lambda_b \sim 120$ Вт/(м·К)) наполнителя, обусловленная его известной более высокой текстурованностью ($\varphi_b \sim 0,85$ против $\varphi_{УГМ}$ примерно 0,3–0,5 [16] для изотропных УГМ). Из рис. 2 следует, что повышение температуры обработки композита от 2100 до 2300 °С (на 200 °С) может привести к росту теплопроводности материала УУКМ примерно

Аппроксимация экспериментальных данных по установлению зависимости средней величины теплопроводности от температуры испытания в интервале от 300 до 3200 К

Углеродная нить	Каркас	Уравнение зависимости теплопроводности, Вт/(м·К), от температуры испытания
УКН-5000	Плетеный	$\lambda_z = 23,84 + \frac{9341}{T, K}; \lambda_{x,y} = 24,95 + \frac{10056}{T, K}$
ВМН-4а	Стержневой	$\lambda_z = 28,6 + \frac{13920}{T, K}; \lambda_{x,y} = 27,2 + \frac{13701}{T, K}$
УКН-5000	»	$\lambda_z = 22,02 + \frac{9272}{T, K}; \lambda_{x,y} = 22,1 + \frac{9170}{T, K}$

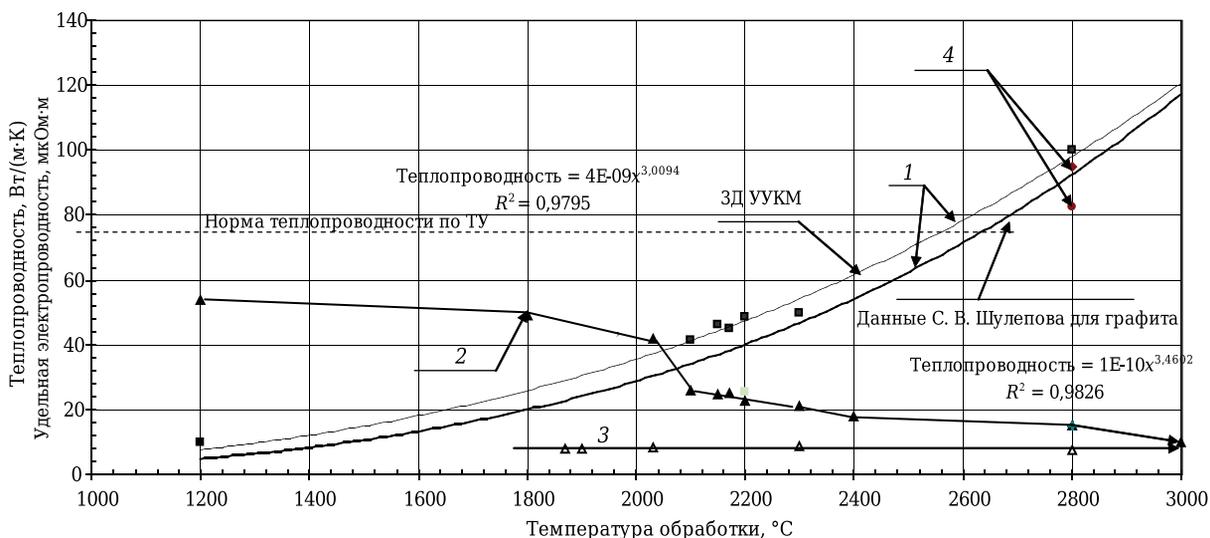


Рис. 2. Зависимость средней величины теплопроводности и удельного электросопротивления от температуры обработки углеродных материалов: 1 — теплопроводность УГМ и УУКМ; 2 — удельная электропроводность УГМ и УУКМ; 3 — удельное электросопротивление углеродного волокна из полиакрилонитрила; 4 — теплопроводность образцов кокса из каменноугольного пека, предварительно полученного по технологии изостатической карбонизации [8]

на 10 Вт/(м·K), т. е. на 0,2 Вт/(м·K) на +100 °C температуры обработки. Уровень метрологической точности воспроизведения предельной технологической обработки заготовок в электровакуумных печах существенно точнее (± 15 °C). Таким образом, это не может стать причиной отмеченного нестабильного воспроизведения средней величины теплопроводности.

Можно полагать, что в случае занижения предельной температуры обработки исходного углеродного волокна, например УКН-5000, в интервале от 1700 до 1500 °C теплопроводность материала может оказаться пониженной на ~3,225 Вт/(м·K) от среднего уровня.

Кристаллические преобразования в углеродных материалах от неграфитированного по Франклин ($g \sim 0$) графита к графиту разной степени совершенства протекают с объемными перемещениями массы углеродного вещества, и эти процессы, естественно, имеют собственные времена релаксации. При этом меняется связность элементов структуры углеродный наполнитель – углеродная матрица и в итоге меняются условия сопротивления передаче механической деформации (скорость звука), электропроводности и сопротивления теплопередаче.

Из выражения (6) следует зависимость теплопроводности УГМ от скорости передачи кинетической энергии в теле (скорость звука). Исследовали зависимости уровня теплопроводности от двух факторов: степени графитации материала и скорости звука. Найденная степень графитации относилась к веществу углеродной матрицы из каменноугольного кокса.

Полученная совокупность результатов контроля теплопроводности представлена в виде

зависимости от уровня скорости звука на рис. 3. Вариация скорости звука составила от ~4600 до ~5400 м/с. При метрологической погрешности определения 3 % можно утверждать, что имеется физическая причина интервала значений скорости звука и, соответственно, теплопроводности. Для совокупности заготовок со степенью графитации от 0,3 до 0,7 при повышении скорости звука примерно на 730 м/с отмечено возрастание теплопроводности почти на 8 Вт/(м·K). Для совокупности заготовок со степенью графитации от 0,645 до 0,73 при том же уровне изменения скорости звука изменение теплопроводности еще больше (~10 Вт/(м·K)).

Анализ исполнения технологии показал, что меньшие уровни модуля упругости с соответствующим уменьшением скорости звука в материале фиксируются для заготовок с фактически относительно заниженным уровнем прибыли массы на первом и втором процессах изостатической карбонизации. Причиной этого является разрушение технологической оснастки при давлении до 80 МПа. Фактическая эффективность третьего и последующих процессов не влияет на получаемые результаты. По всей вероятности, именно на начальных операциях, когда уровень кажущейся плотности повышается от 1,09 до 1,65 г/см³, углеродная масса матрицы обеспечивает механическую связность композитных стержней между собой. В этой части процесса формирования углеродной матрицы все большие объемные доли углеродного волокна включаются в процесс передачи механической деформации пропорционально прибавке углеродного вещества матрицы. В результате в одинаковой пропорции возрастает способность к

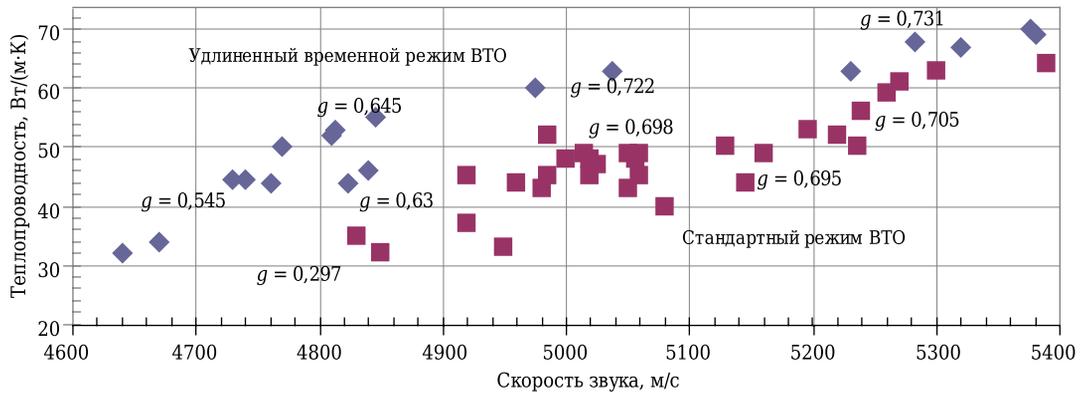


Рис. 3. Изменение уровня теплопроводности материала заготовок в зависимости от уровней степени графитации g и скорости звука

теплопередаче и трансляции звука в веществе. Как видно из рис. 3, в итоге может быть достигнуто повышение теплопроводности примерно на 30 Вт/(м·К).

Следующий управляемый скачок теплопроводности на 10–12 Вт/(м·К) реализуется при фактическом удлинении продолжительности пребывания заготовки в температурном интервале от 2100 до 2200 °С. На рис. 3 этот переход обозначен как стандартный режим ВТО → удлиненный режим ВТО. В силу конструктивных особенностей электровакуумных печей (объем графитовой оснастки, способ коммутации нагревателей) эффективная теплоемкость в них может различаться в несколько раз. В результате режимы нагрева, выдержки и охлаждения могут удлиняться или сокращаться. Как установлено из выражения (10), в области температур обработки 1900–2200 °С среднее межплоскостное расстояние и соответствующая ему степень графитации могут меняться на 10–20 % от номинального значения в зависимости от фактического времени пребывания в горячей зоне печи (в целом $\Delta\lambda \sim 12$ Вт/(м·К) на ~120 мин времени выдержки при максимальной температуре в печи).

Фононный механизм теплопроводности в углеродных материалах и сопротивление рас-

пространению тепла главным образом на границах кристаллов, как известно [9], сближают математическую аппроксимацию этих процессов в конструкционных графитах с электропроводностью в виде закона Видемана – Франца в форме $\lambda\rho = \text{const}$. Настоящая константа часто именуется числом Лоренца. Полученные результаты позволили оценить выполнение этого закона и на УУКМ.

На рис. 4 представлены результаты сопоставления величины числа Лоренца для трех- и четырехмерно армированных УУКМ с различной температурой технологической обработки. На том же графике помещены аналогичные результаты для углеродного волокна из полиакрилонитрила из работ [15, 17, 18].

Анализ сопоставления уровней электросопротивления и теплопроводности из данных рис. 4 показывает, что в достаточно широком температурном интервале наблюдается известное для различных УГМ следование закону Видемана – Франца в форме $\lambda\rho = \text{const}$ примерно на уровне 1200 ± 155 [13].

Это открывает возможность использования в производственной практике [7] мобильного и достаточно обоснованного и точного межоперационного контроля качества УУКМ, как это принято для широкого круга УГМ.

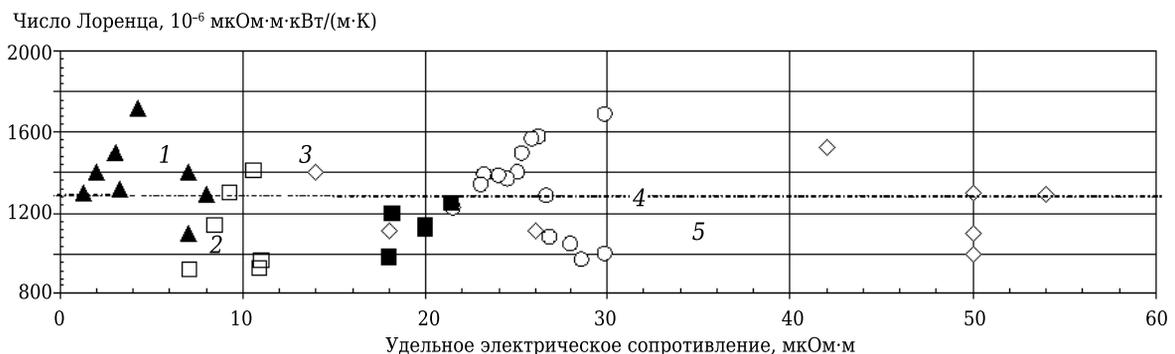


Рис. 4. Сопоставление экспериментального значения произведения $\lambda\rho$ (число Лоренца) и удельного электрического сопротивления УУКМ: 1 — углеродное волокно из полиакрилонитрила (ВТО 2400 °С); 2 — УУКМ, схема армирования 4ДЛ (2500 °С); 3 — УУКМ, схема армирования 4ДЛ (2200 °С); 4 — УУКМ, схема армирования 4ДЛ (2100 °С); 5 — УУКМ, схема армирования 3Д (2100–2600 °С)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено ранжирование факторов, определяющих уровень средней величины теплопроводности материала трехмерно армированного УУКМ в порядке убывания:

- уплотнение структуры в области механического контакта между углеродными стержнями — наполнителем и углеродной коксовой матрицей (~30 Вт/(м·К));
- время высокотемпературной обработки в температурном интервале от 1900 до 2200 °С (~12 Вт/(м·К));
- температура обработки композита от 2100 до 2300 °С (~10 Вт/(м·К));

– уровень плотности в интервале, обеспечивающем работоспособность деталей соплового тракта РДТТ от 1,89 до 1,98 г/см³ (~9,9 Вт/(м·К));

– температура обработки исходного углеродного волокна в интервале от 1500 до 1700 °С (~3,225 Вт/(м·К));

– способ сборки каркаса — текстильно-сплетенный или механически собранный из стержней (~3,0 Вт/(м·К));

Установлено, что связь электропроводности ρ и теплопроводности λ соответствует по форме закону Видемана – Франца $\lambda\rho = \text{const}$. Для большинства технических случаев величина этого произведения для УУКМ, известного как число Лоренца, может быть принята равной ~1200 мкОм·м · Вт/(м·К).

Библиографический список

1. **Котельников, Р. Б.** Особо тугоплавкие элементы и соединения / Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков, З. Г. Галиакбаров, А. И. Каштанов. — М. : Metallurgia, 1968. — 376 с.
2. **Соколовский, М. И.** Углеродные материалы НИИ-графит в разработках РДТТ ОАО НПО «Искра» / М. И. Соколовский, В. В. Лукьянов, Ю. Г. Лузенин // Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции : сб. науч. тр. — Челябинск : Библиотека А. Миллера, 2000. — С. 220, 221.
3. **Соколовский, М. И.** Материалы углеродного класса в РДТТ. Требования, предъявляемые к УУКМ, направления совершенствования / М. И. Соколовский, Г. А. Зыков, В. В. Лукьянов [и др.] // Современные проблемы производства и эксплуатации углеродной продукции : сб. науч. тр. — Челябинск. : Библиотека А. Миллера, 2000. — С. 151–153.
4. **Бабкин, М. Ю.** Оценка термостойкости графитированных электродов / М. Ю. Бабкин // Современное состояние и перспективы развития электродной продукции, конструкционных и композиционных углеродных материалов : сб. докл. междунар. конф. — Челябинск : Энциклопедия, 2010. — С. 202–205.
5. **Кинджери, В. Д.** Измерения при высоких температурах / В. Д. Кинджери. — М. : Metallurgizdat, 1963. — 236 с.
6. УУКМ марок «Десна-4», КМ-ВМ-4Д, КМ-ВМ-2Д и Десна Т-1. <http://www.Niigrafit.ru>
7. **Проценко, А. К.** Разработка углерод-углеродных технологий и перспективы их развития / А. К. Проценко, С. А. Колесников // Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита — 55 лет : сб. статей. — М. : Научные технологии, 2015. — С. 31–59. <http://www.niigrafit.ru/nauka-i-obrazovanie/sbornik.pdf>
8. **Аксельрод, Л. М.** Математическое моделирование разрушения футеровок металлургического оборудования под действием термоударов / Л. М. Аксельрод, А. В. Заболотский // Современная наука : сб. науч. статей. — 2010. — № 2 (4). — С. 165–169. <http://modern.science.triacon.org/ru/issues/2010/files/papers/2/165-169.pdf>
9. **Аполлонов, В. К.** Исследование воздействия лазерного излучения на зеркальные поверхности материалов / В. К. Аполлонов. — М. : Наука, 1975. — 101 с.
10. **Милёхин, Ю. М.** Расчет методом характеристик нестационарных внутрибаллистических параметров выхода РДТТ на рабочий режим / Ю. М. Милёхин, А. Н. Ключников, В. С. Попов, Н. Д. Пелукас // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 6. — С. 61–75. <http://www.sibran.ru/upload/iblock/3b7/3b7130e7bf08c1492cc57e439128ffbc.pdf>
11. **Соколов, А. И.** Многомерно армированные углерод-углеродные композиционные материалы / А. И. Соколов, А. К. Проценко, С. А. Колесников // Новые промышленные технологии. — 2009. — № 3. — С. 29–32.
12. **Glass, D. E.** Materials development for hypersonic flight vehicles / D. E. Glass, R. Dirlingz, H. Groops // <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20070004792.pdf>.
13. **Шулепов, С. В.** Физика углеродных материалов / С. В. Шулепов. — Челябинск : Metallurgia, Челябинское отделение, 1990. — 336 с.
14. **Нагорный, В. Г.** Свойства конструкционных материалов на основе графита : справочник / В. Г. Нагорный, А. С. Котосонов, В. С. Островский [и др.] ; под ред. В. П. Соседова. — М. : Metallurgia, 1975. — 336 с.
15. **Lalit M. Manocha.** High performance carbon-carbon composites / Lalit M. Manocha // Sahana. — 2003. — Vol. 28, parts 1/2. February/april. — P. 349–358.
16. **Фитцер, Э.** Углеродные волокна и углекомпозиаты / Э. Фитцер, Р. Дифендорф, И. Калнин [и др.] ; под ред. Э. Фитцера ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 336 с.
17. **Golecki, I.** Properties of high thermal conductivity carbon-carbon composites for thermal management applications / I. Golecki, L. Xue, R. Leung [et al.] // High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference, 1998. 27 Feb. 1998. — San Diego, CA, USA. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=730696
18. **Lavin, J. G.** The correlation of thermal conductivity with electrical resistivity in mesophase pitch-based carbon fibers / J. G. Lavin, D. R. Boyington, J. Lanijani [et al.] // Carbon. — 1993. — Vol. 31. — P. 1001–1004. <http://fgmdb.kakuda.jaxa.jp/SSPHTML/e-004st4.html> ■

Получено 17.08.16

© С. А. Колесников, М. Ю. Бамборин, В. А. Воронцов, А. К. Проценко, Е. Г. Чеблакова, 2017 г.

Д. т. н. Ю. Е. Пивинский¹ (✉), П. В. Дякин², А. Ю. Колобов³

¹ ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

³ ОАО «Динур», г. Первоуральск, Россия

УДК 666.762.1.017:620.181.428.4

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ФОРМОВАННЫХ И НЕФОРМОВАННЫХ ОГНЕУПОРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ВКВС. Часть 9. Получение и свойства смешанных ВКВС состава: плавленный бокситокорунд, кварцевое стекло, реактивный глинозем. Дилатометрические исследования материалов на их основе*

Методом совместного мокрого измельчения получены ВКВС композиционного состава, включающего плавленный бокситокорунд в качестве базового материала (89 %) и высокодисперсный плавленный кварц (11 %). На основе этой ВКВС получены также образцы с повышенным содержанием Al_2O_3 за счет введения в их состав 10–30 % реактивного глинозема. Проведены дилатометрические исследования, позволившие установить, что для материалов всех составов отмечаются четыре характерных интервала температур неізотермического нагрева: обычного теплового расширения (до 900 °С), процесса спекания или усадки (900–1300 °С), муллитизации или роста (1300–1450 °С) и спекания (усадки) замуллитизированного материала (1450–1500 °С).

Ключевые слова: ВКВС, гайанский боксит, корунд, плавленный кварц, бокситокорунд, неізотермический нагрев, усадка, рост, тепловое расширение.

В работе [1] методом совместного мокрого измельчения впервые были получены ВКВС смешанного состава на основе электроплавленного корунда (89 %) и высокодисперсного кварцевого стекла — ВДКС (11 %), характеризующиеся высокими реотехнологическими свойствами, что позволило получить отливки пористостью 17,5–20 %.

С использованием ВКВС этого состава были получены образцы прессованных и вибролитых керамобетонов. Способом вибролитья и литья из саморастекающихся бетонных смесей влажностью 3,8–4,2 % получены образцы корундовых керамобетонов с открытой пористостью 11–15 % и пределом прочности при сжатии до 160 МПа [2–4].

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧЕНИЕ ВКВС И ИХ СВОЙСТВА

В отличие от предшествующих работ, в которых в качестве исходного материала для получения

* Продолжение. Части 1–3 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 8, 10, 12 за 2015 г., части 4–8 — в № 2, 4, 6, 10 и 12 за 2016 г.



Ю. Е. Пивинский
E-mail: pivinskiy@mail.ru

как ВКВС высокоглиноземистого состава, так и огнеупорных заполнителей применяли обожженный (спеченный) китайский боксит с содержанием 87–92 % Al_2O_3 [4–8], в настоящей работе исследована возможность получения ВКВС на основе плавленного бокситокорунда и высокодисперсного кварцевого стекла (ВДКС). При этом в отличие от обычного китайского боксита марок RotaHD или MID с целью возможного расширения сырьевой базы для высокоглиноземистых огнеупоров в качестве исходного использовали предварительно обожженный при 1200 °С менее качественный гайанский боксит с содержанием 80–82 % Al_2O_3 и 10–11 % SiO_2 .

Одно из принципиальных отличий гайанского боксита от китайского аналога — высокое содержание в нем химически связанной воды. Если потери при прокаливании в процессе обжига китайских бокситов составляют около 10 %, то гайанских — около 30 % [8]. Столь существенное содержание связанной воды в гайанском боксите обусловлено тем, что основным минералом в нем является гиббсит (гидрагиллит) $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, характеризующийся содержанием 65 % Al_2O_3 и 35 % H_2O . С учетом четырехкратной разницы в плотности корунда и воды объемное содержание последней в гиббсите достигает 68 %. Примесными минералами в гайанском боксите являются бёмит $Al_2O_3 \cdot H_2O$, характеризующийся содержанием 15 %

связанной воды, а также каолинит и гидроксид железа [8, 9]. Вследствие изложенного даже после продолжительного высокотемпературного обжига (до 1600 °С) эти бокситы характеризуются высокой открытой пористостью, что затрудняет или исключает их применение не только в качестве материала для получения ВКВС, но и в виде огнеупорных заполнителей вследствие пропитки их поровой структуры расплавами.

Было сделано предположение, что использование боксита подобного типа возможно в плавном состоянии. С учетом пониженного содержания в нем Al_2O_3 процесс его плавки предложено осуществлять со значительным содержанием в исходной шихте технического глинозема. В зависимости от содержания Al_2O_3 в исходном боксите и заданного — в плавном продукте согласно проведенным в ОАО «Динур» промышленным опытам содержание глинозема в шихте колебалось в пределах 35–75 %, боксита 25–65 %.

Если исходить из содержания Al_2O_3 в гайанском боксите 80–82 %, то при указанных пропорциях исходных компонентов возможно получение плавного бокситокорунда с содержанием Al_2O_3 88–95 %. Плавные материалы такого состава применяются как при получении ВКВС, так и в качестве огнеупорных заполнителей различных видов формованных и неформованных огнеупоров высокоглиноземистого состава.

В настоящей работе была поставлена задача получения плавного бокситокорунда с обычным для китайского боксита содержанием Al_2O_3 (около 88 %). С учетом того, что исходный термообработанный при 1200 °С во вращающейся печи гайанский боксит содержал 80,5 % Al_2O_3 , 10,5 SiO_2 , 4,0 TiO_2 , 1,55 $CaO + MgO$, 1,58 Fe_2O_3 , для получения плавного бокситокорунда с заданным (88 %) содержанием Al_2O_3 была использована шихта из 65 % боксита указанного состава и 35 % технического глинозема (98 % Al_2O_3 , 0,5 % Na_2O). Следует отметить, что гайанский боксит изученного состава характеризуется значительно большим содержанием примесей по сравнению с китайскими аналогами [4–8]. Однако присутствующие в нем в виде примесей оксиды Ti, Ca, Mg, Fe являются модификаторами спекания для корундовых и высокоглиноземистых материалов [4, 9, 10].

Поскольку изучаемые ВКВС высокоглиноземистого состава применяются преимущественно в качестве матричной системы огнеупорных желобных масс [4–8], основным требованием к ним является достижение высокой механической прочности даже после их разогрева до 900–1100 °С.

В рассматриваемом аспекте изучаемый в настоящей работе и производимый в промышленных объемах в ОАО «Динур» корундобоксит с содержанием Al_2O_3 выше 90 % рассматривается как комплексно легированный корунд. Одна из последующих статей будет посвящена применению плавного корундобоксита такого вида для получения ВКВС.

Наплавленный бокситокорунд заданного состава подвергался измельчению, фракционированию и магнитной сепарации. Для получения ВКВС использовали фракцию бокситокорунда менее 1 мм. Мокрое измельчение осуществляли в промышленной шаровой мельнице ОАО «Динур» емкостью 3,5 м³ уралитовыми (высокоглиноземистыми) мелющими телами. Принципиально важно, что и в данном случае был реализован принцип мокрого измельчения с одностадийной загрузкой материала [4, 6, 11]. Это было достигнуто введением в состав мелющей загрузки совместно с водой высокодисперсной суспензии плавного кварца в количестве 11 % по твердому от общей массы загрузки. С учетом различной исходной плотности бокситокорунда (3,75 г/см³) и плавного кварца (2,2 г/см³) объемная доля ВДКС в смешанном материале составляла 17,5 %.

Контрольным параметром показателя дисперсности ВКВС в процессе мокрого измельчения было принято содержание частиц крупнее 63 мкм в количестве не более 1–2 %. Продолжительность мокрого измельчения до достижения заданной дисперсности составила 19 ч, что на 20–30 % больше, чем при получении аналогичных ВКВС на основе спеченного и характеризующегося наличием открытой пористости китайского боксита. В твердой фазе полученной ВКВС содержалось, %: Al_2O_3 78,4, SiO_2 17,1, TiO_2 2,1, Fe_2O_3 0,78.

Исходная ВКВС после совместного мокрого измельчения и стабилизации имела плотность 2,80 г/см³ ($C_v = 0,72$, влажность 10,2 %), pH = 8,2. Зерновой состав, определенный на лазерном анализаторе частиц «ShimadzuSALD - 230», представлен на рис. 1.

Следует отметить, что аналогичная ВКВС на основе плавного корунда (89 % Al_2O_3) и ВДКС (11 % SiO_2), согласно данным [1, 4], характеризовалась заметно меньшей объемной концентрацией ($C_v = 0,66$) и большей влажностью (13 %).

Из рис. 1 следует, что твердая фаза ВКВС характеризуется относительно высокой дисперсностью и существенной степенью полидисперсности. Содержание частиц размерами менее 0,5, 1,0 и 5 мкм составляет 6, 17 и 52 % соответственно. При этом значение медианного диаметра частиц $d_m = 4,5$ мкм, а $d_{90} = 26$ мкм, коэффициент полидисперсности $K_n = 15$. Следует отметить, что содержание частиц указанных выше размеров в данном случае заметно выше такового для ВКВС китайского боксита с подобным химическим составом по содержанию Al_2O_3 и SiO_2 [7].

Реологические свойства ВКВС определяли при помощи вискозиметра «Rheotest-2» (рис. 2).

Как и в случае ВКВС на основе боксита [7], ВКВС рассматриваемого в настоящей статье состава характеризуется тиксотропно-дилатантным характером течения. Как для исходной ВКВС (см. рис. 2, кривая 1), так и с дополнительным введением разжижающей добавки FL-30 (см. рис. 2,

кривая 2) при увеличении скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ с 1 до 10–30 с^{-1} эффективная вязкость уменьшается в 3–4 раза. Дальнейший рост $\dot{\epsilon}$ сопровождается значительным увеличением вязкости. Эффективность добавки FL-30 более значительна в области дилатантного течения ВКВС. Так, при значениях $\dot{\epsilon}$ 1, 48 и 81 с^{-1} показатели вязкости (см. рис. 2, кривая 2) в 1,25, 3,3 и 3,6 раза ниже по сравнению с вязкостью исходной ВКВС (см. рис. 2, кривая 1). Еще более значительный эффект отмечен при $\dot{\epsilon}$ 146 с^{-1} : если исходная суспензия при этой же скорости сдвига характеризовалась переходом в твердообразное состояние [11, 12], то дополнительно дефлокулированная ВКВС сохраняла текучесть и ее вязкость составляла 4,5 Па·с.

С целью получения ВКВС с повышенным содержанием Al_2O_3 проведены опытные работы по получению комплексных ВКВС с дополнительным введением в состав исходной суспензии различного количества реактивного глинозема СТС-30 производства фирмы «Almatis». При получении ВКВС смешанного состава порошок реактивного глинозема СТС-30 в состав базовой ВКВС корундомуллита вводили в количестве 10, 20 и 30 % от общей массы твердого в увлажненном состоянии. После смешивания порошка СТС-30 с суспензией отливали образцы. При этом значение C_V суспензии понижалось до 0,65–0,67. Если содержание Al_2O_3 и SiO_2 в исходной ВКВС составляло 78,4 и 17,1 %, то в ВКВС с добавкой 10, 20 и 30 % глинозема содержание Al_2O_3 повышалось до 80,5, 82,7 и 85 %, а SiO_2 — понижалось до 15,4, 13,7 и 12 % соответственно. С учетом указанного соотношения муллитобразующих оксидов предельно возможное образование муллита в изученных материалах ориентировочно может быть оценено от 43 % (для исходного состава) до 30 % (для суспензии с 30 % СТС-30). Однако с учетом того, что определенная доля SiO_2 переходит в состав многокомпонентной стеклофазы, реальное содержание муллита в материалах всех рассматриваемых составов после высокотемпературного обжига, по всей видимости, будет меньшим.

Глинозем СТС-30 характеризуется повышенной дисперсностью. Содержание в нем частиц менее 0,5, 1,0 и 5,0 мкм составляет 10, 30 и 75 % соответственно [4, 8], что существенно превышает эти показатели для базовой ВКВС (см. рис. 1). Увеличение дисперсности ВКВС смешанных составов, как это будет показано далее в статье, способствует ускорению как спекания, так и муллитизации.

На основе ВКВС базового состава, а также суспензий с содержанием 10, 20 и 30 % глинозема СТС-30 методом шликерного литья были изготовлены балочки размерами 10×10×80 мм. Образцы после сушки характеризовались средними показателями открытой пористости 17,5 для исходной ВКВС, 18,5, 23,0 и 25,0 % для ВКВС с 10, 20 и 30 % СТС-30 соответственно.

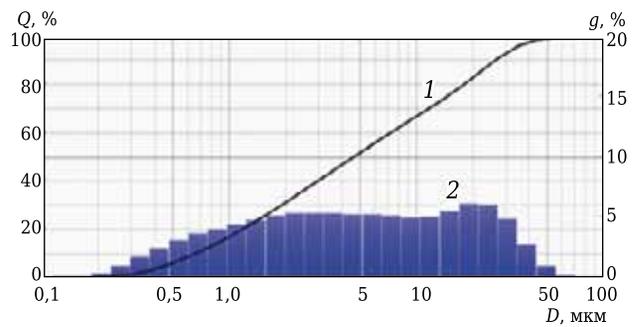


Рис. 1. Интегральное Q (1) и дифференциальное g (2) распределение по размерам D частиц исходной ВКВС бокситокорунда

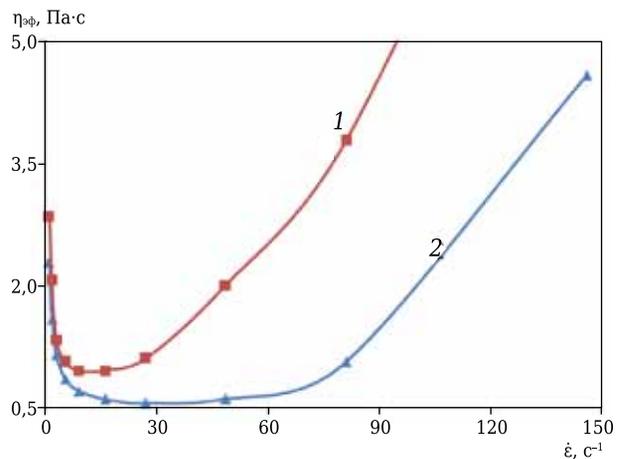


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости $\eta_{\text{эф}}$ от градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ исходной ВКВС бокситокорунда (1) и ее же после дополнительного разжижения (2)

ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. СПЕКАНИЕ И МУЛЛИТИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ИХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Как и в предшествующих статьях данной серии [7, 12–14], дилатометрические исследования, позволяющие изучить спекание (усадку) и муллитизацию (рост) материалов в режиме их неизотермического нагрева, проведены с использованием дилатометра системы «Netzsch Dil 402» (Германия). В процессе первичного и вторичного нагрева образцов изученных материалов до 1500 °С скорость подъема температуры была постоянной и составляла 5 °С/мин, или 300 °С/ч. При этом первичный нагрев для образцов всех изученных и представленных на рис. 3–5 составов осуществлялся на исходных высушенных отливках (см. рис. 3, а – рис. 5, а), а повторный (см. рис. 3, б – рис. 5, б) на тех же образцах, прошедших предварительный неизотермический обжиг до 1500 °С. На рис. 3, а показана зависимость относительного изменения линейных размеров образца на основе ВКВС плавленого бокситокорунда*.

* В дальнейшем исходные отливки без добавок глинозема будут обозначаться как состоящие из ВКВС бокситокорунда, хотя они содержат 11 % ВДКС.

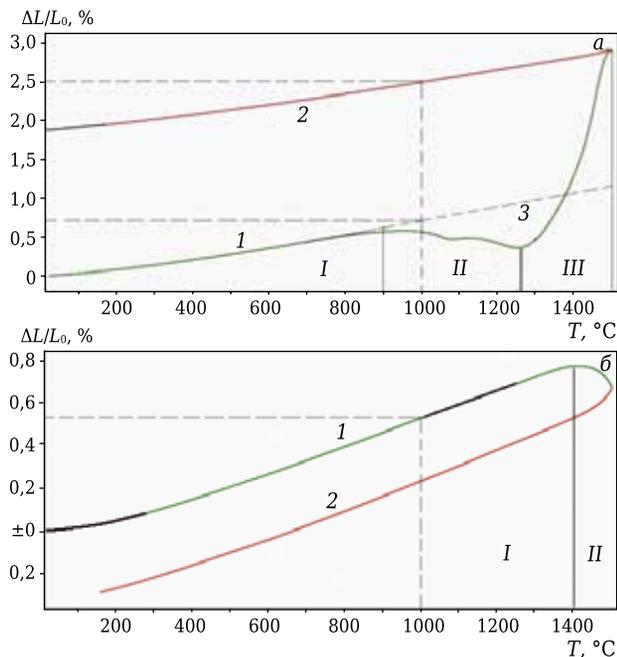


Рис. 3. Зависимость относительного изменения линейных размеров $\Delta L/L_0$ образца на основе исходной ВКВС бокситокорунда от температуры T первичного (а) и вторичного (б) нагрева до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в dilatометре при скорости ее повышения $5\text{ }^\circ\text{C/мин}$ (1) и последующего охлаждения (2); экстраполированная прямая теплового расширения (3). Области температур: I — линейного расширения; II — преобладающей усадки; III — преобладающего роста

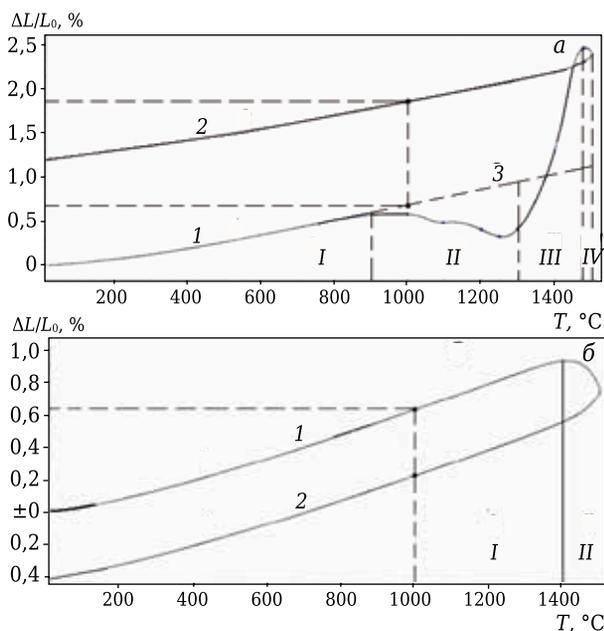


Рис. 4. Зависимость относительного изменения линейных размеров $\Delta L/L_0$ образца на основе ВКВС бокситокорунда с содержанием 10 % СТС-30 от температуры T нагрева в процессе первичного (а) и вторичного (б) нагрева до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в dilatометре при скорости ее повышения $5\text{ }^\circ\text{C/мин}$ (1) и последующего произвольного охлаждения (2), экстраполированная прямая теплового расширения 3. Области температур: I — линейного расширения; II — преобладающей усадки; III — преобладающего роста; IV — спекания и усадки замуллитизированного материала

Аналогичные данные для образцов с содержанием 10 и 30 % глинозема СТС-30 представлены на рис. 4 и 5. При этом кривые 1 отражают данные в процессе нагрева, кривые 2 — охлаждения.

Как и в предыдущих работах [7, 12–14], величину усадки при различных температурах неизотермического нагрева оценивали по разнице между экстраполированной прямой 3 теплового расширения и кривой 1 (см. рис. 3–5).

Из сопоставления и анализа данных, представленных на рис. 3–5, установлено, что по показателям роста, усадки или характеру кривой 1 в процессе повышения температуры до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ можно выделить 4 области температур. Если в области I вплоть до $900\text{ }^\circ\text{C}$ отмечается обычное тепловое расширение материала, то в области II ($900\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$) протекает процесс спекания, сопровождаемый усадкой. По мере повышения температуры отмечается рост, обусловленный муллитизацией (область III), а выше 1450 (см. рис. 5) или $1470\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 4) наблюдается спекание (усадка) замуллитизированного материала (область IV).

Следует отметить, что для материалов всех составов в процессе повторного нагрева при температурах выше $1400\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается значительное спекание замуллитизированного материала, сопровождаемое усадкой около 0,4 (см. рис. 3, 4) или 0,8 % (см. рис. 5).

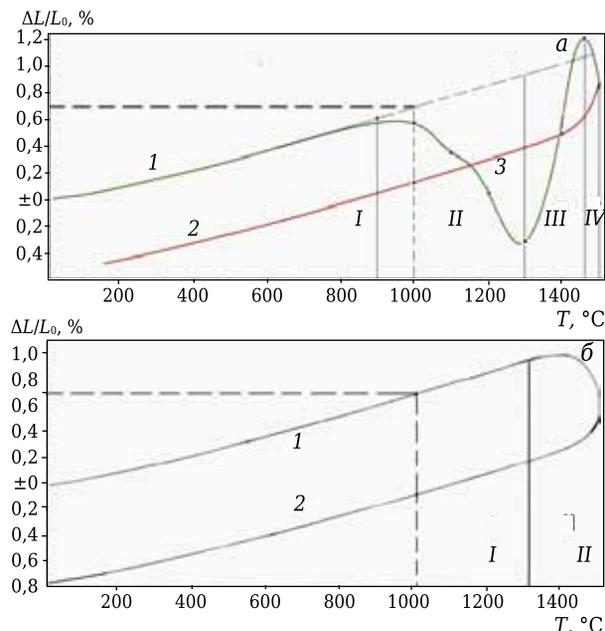


Рис. 5. Зависимость относительного изменения линейных размеров $\Delta L/L_0$ образца на основе ВКВС бокситокорунда с содержанием 30 % СТС-30 от температуры T нагрева в процессе первичного (а) и вторичного (б) нагрева до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в dilatометре при скорости ее повышения $5\text{ }^\circ\text{C/мин}$ (1) и последующего произвольного охлаждения (2), экстраполированная прямая теплового расширения 3. Области температур: I — линейного расширения; II — преобладающей усадки; III — преобладающего роста; IV — спекания и усадки замуллитизированного материала

Заметная усадка образца (0,15 %) отмечается уже при 1000 °С (см. рис. 3, а, кривая 1). При повышении температуры до 1100 и 1200 °С усадка возрастает до 0,3 и 0,4 %. Максимальное значение усадки (0,50 %) соответствует температуре неизотермического нагрева 1265 °С. Судя по тому, что при 1300 °С усадка несколько снижается, можно предположить, что заметная муллитизация материала в процессе неизотермического нагрева отмечается именно в этом узком интервале температур (1265–1300 °С).

Резкий рост образца вплоть до 2,9 %, свидетельствующий об интенсификации процесса муллитизации, происходит в интервале 1300–1500 °С. Следует отметить, что продолжительность пребывания образца в этом «активном» с точки зрения муллитизации интервале температур составляла 40 мин. При охлаждении образца наблюдалась практически прямолинейная (см. рис. 3, а, прямая 2) зависимость изменения размеров образца. При этом после охлаждения образца показатель роста после первичного нагрева 1,85 %.

Повторный нагрев образца (см. рис. 3, б) до 1410 °С характеризуется практически прямолинейной зависимостью, определяемой тепловым расширением материала в соответствии с его ТКЛР. При повышении температуры с 1410 до 1500 °С отмечается заметная усадка образца, которая еще несколько возрастает в интервале температур охлаждения 1500–1450 °С. Фактическая усадка образца в процессе повторного нагрева составляет 0,4 %. С учетом показателя роста после первичного нагрева («обжига») 1,85 % и усадки при вторичном нагреве общий показатель роста уменьшается до 1,45 %. Согласно dilatометрическим данным показатель теплового расширения образца при вторичном нагреве (см. рис. 3, б) при 1410 °С составил 0,81 % или 0,57 % при 1000 °С. Согласно опубликованным данным [13, 14] таким показателем теплового расширения характеризуются высокоглиноземистые материалы с содержанием около 40–50 % муллита и 50–60 % корунда.

Доказательством того, что процесс полной муллитизации достигается еще в процессе первичного нагрева, является тот факт, что между прямыми 1 и 2, отражающими процессы повторного нагрева и охлаждения (см. рис. 3, б), разница практически отсутствует, т. е. дополнительный «обжиг» образца не приводит к изменению показателя теплового расширения материала. Следует отметить, что окончание образования вторичного муллита обычно отмечали при более высоких температурах [15, 16].

На рис. 4, а показаны усадка и рост образца, содержащего 10 % глинозема СТС-30. Как и в предыдущем случае (см. рис. 3), заметная усадка (0,1 %) отмечается уже после неизотермического нагрева образца до 1000 °С. Повышение температуры нагрева до 1100, 1200, 1250 °С сопровождается ростом усадки до 0,23, 0,42, 0,52 % соответственно. В

интервале 1250–1300 °С кроме спекания отмечается и начальная стадия муллитизации материала. При повышении температуры с 1300 до 1470 °С протекает процесс интенсивной муллитизации, сопровождаемый существенным ростом образца. По отношению к максимальной усадке при температуре 1250 °С рост при 1470 °С составляет 2,1 %, а по отношению к прямой теплового расширения 3 — 1,4 %. В узком интервале температур нагрева 1470–1500 °С и в более значительной области температур охлаждения (с 1500 до 1400 °С) протекает процесс спекания замуллитизированного материала, сопровождаемый линейной усадкой 0,2 %. В конечном итоге показатель роста образца после его охлаждения составляет 1,2 %.

Данные о тепловом расширении и усадке образца рассмотренного состава после его повторного неизотермического нагрева до 1500 °С представлены на рис. 4, б. В процессе нагрева (см. рис. 4, б, прямая 1) до 1400 °С характерно обычное тепловое расширение образца, определяемое его ТКЛР. Однако в области температур 1400–1500 °С наблюдается заметная (около 0,28 %) усадка, свидетельствующая о спекании материала со значительным содержанием муллита. При этом менее существенное спекание (усадка 0,12 %) продолжается и в аналогичном интервале температур (1500–1400 °С) в процессе охлаждения (см. рис. 4, б, прямая 2), т. е. суммарная усадка составляет 0,4 %. С учетом роста образца после первичного нагрева (1,2 %) после повторного нагрева он уменьшился на 0,8 %.

Данные, характеризующие зависимость усадки и роста образца, содержащего 30 % глинозема СТС-30, представлены на рис. 5, а. Как и в предыдущих случаях (см. рис. 3, 4), до 900 °С отмечается обычное тепловое расширение, а заметная усадка (0,1 %) фиксируется после нагрева до 1000 °С. Однако при повышении температуры неизотермического нагрева до 1100, 1200 и 1300 °С усадка возрастает до 0,39, 0,75 и 1,21 % соответственно, что существенно превышает аналогичные значения для образца, содержащего 10 % этой добавки (см. рис. 4).

В интервале 1300–1460 °С отмечается рост образца, который при 1430 °С компенсирует предшествующую значительную усадку. Максимальное значение роста, соответствующее температуре неизотермического нагрева 1460 °С, по отношению к значению максимальной усадки (1300 °С) составляет 1,5 %, а по отношению к экстраполированной прямой теплового расширения (см. рис. 5, прямая 3) — только 0,16 %. Однако в интервале 1400–1500 °С вследствие спекания отмечается существенно большая (0,31 %) усадка, которая значительно возрастает (до 0,7 %) в процессе охлаждения от 1500 до 1400 °С. В конечном итоге после охлаждения образец характеризовался значением усадки 0,56 %, тогда как для образца, содержащего 10 % СТС-30, в этом случае отмечался значительный (1,2 %) рост (см. рис. 4).

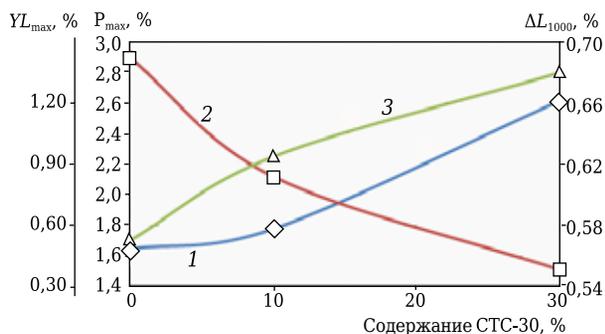


Рис. 6. Влияние содержания СТС-30 в образцах на показатели их максимальной усадки $Y_{L_{max}}$ в области температур первичного спекания (1), максимального роста P_{max} (2) в процессе первичного нагрева и теплового расширения образцов ΔL_{1000} (3) при 1000 °C после повторного нагрева

Повторный неізотермический нагрев образца до 1500 °C (рис. 5, б) сопровождается существенным дополнительным спеканием как в интервале температур нагрева 1350–1500 °C (усадка 0,48 %), так и в процессе охлаждения с 1500 до 1400 °C (усадка 0,3 %). Из данных рис. 5, а и б следует, что уровни усадки образца при первичном и вторичном нагреве сопоставимы.

Показатель теплового расширения при 1000 °C образца с 30 % СТС-30 при нагреве и охлаждении составляет 0,68 %, что заметно выше, чем для аналогичного образца с 10 % СТС-30. Согласно предшествующим исследованиям [14] при указанном показателе теплового расширения содержание в материале корунда и муллита ориентировочно составляет 65–70 и 30–35 % соответственно.

Из приведенных на рис. 3–5 данных очевидно значительное влияние состава образцов как на характер изменения их линейных размеров в различных интервалах температур нагрева, так и на тепловое расширение термообработанных материалов. Последнее подтверждается данными рис. 6.

Из рис. 6, кривая 1 следует, что показатели максимальной усадки в процессе первичного спекания (область температур II на рис. 3–5) увеличиваются от 0,50 % для образца исходного состава (см. рис. 3) до 1,21 % для образца с содержанием 30 % глинозема (см. рис. 5). При этом приведенные данные по максимальным усадкам достига-

ются в достаточно узком интервале температур неізотермического нагрева (1250–1300 °C).

Показатели максимальных значений роста на стадии процесса муллитизации (область температур III на рис. 3–5) с учетом компенсации предшествующей усадки в интервале почти в 2 раза понижаются от 2,9 % для исходного образца до 1,5 % для содержащего 30 % глинозема (см. рис. 3–5, кривая 2).

Показатели теплового расширения материалов при 1000 °C тем выше, чем выше содержание в них Al_2O_3 и ниже количество SiO_2 (см. рис. 6, кривая 3). Если показатель теплового расширения при 1000 °C образца исходного состава 0,56 % только на 0,11 % выше этого показателя для муллита (0,45 %), то с максимальным (30 %) содержанием Al_2O_3 — на 0,12 % ниже по сравнению с этим показателем корунда (0,68 и 0,8 % соответственно).

Экспериментальным данным по влиянию температуры изотермического обжига в интервале 900–1600 °C на показатели свойств материалов, рассмотренных в настоящей работе, будет посвящена следующая статья. Будет представлен также сопоставительный анализ процессов спекания и муллитизации в режимах неізотермического нагрева и изотермического обжига.

Таким образом, на основе плавленного бокситокорунда (89 %) и ВДКС (11 %) мокрым совместным измельчением получены ВКВС с высокими показателями реотехнологических свойств. На основе этой базовой ВКВС дополнительно получены образцы с повышенным содержанием Al_2O_3 за счет введения реактивного глинозема СТС-30 в пределах 10–30 %. На образцах проведены dilatометрические исследования, позволившие изучить процессы их спекания и муллитизации при неізотермическом нагреве до 1500 °C. Для материалов всех составов установлены четыре характерные области температур неізотермического нагрева: обычного теплового расширения (до 900 °C); процесса спекания, сопровождаемого усадкой (900–1300 °C); преимущественной муллитизации, сопровождаемой ростом (1300–1470 °C) и спекания (усадки) замуллитизированного материала (1450–1500 °C).

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Получение и свойства корундовых ВКВС и керамобетонов. Ч. 1. Смешанные ВКВС в системе электрокорунд – высокодисперсное кварцевое стекло / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 1. — С. 28–36.
2. **Пивинский, Ю. Е.** Получение и свойства корундовых ВКВС и керамобетонов. Ч. 2. Состав и свойства

прессованных керамобетонов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 2. — С. 39–46.

3. **Pivinskii, Yu. E.** Preparation and Properties of corundum HCBS and ceramic concretes. Part 2. Composition and properties of compacted ceramic concretes / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 1. — С. 32–38.

3. **Пивинский, Ю. Е.** Получение и свойства корундовых ВКВС и керамобетонов. Ч. 3. Процессы литья и объемо-постоянство керамобетонов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 3. — С. 27–34.

Pivinskii, Yu. E. Preparation and properties of corundum HCBS and ceramic concretes. Part 3. Casting and volume constancy of ceramic concretes / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2010. — Vol. 51, № 1. — С. 88–94.

4. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении : избр. тр. В 3 т. Т. 3 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Политехника, 2012. — 682 с.

5. **Пивинский, Ю. Е.** Разработка технологий, производство и служба формованных и неформованных огнеупоров на основе ВКВС / Ю. Е. Пивинский, Е. М. Гришпун, А. М. Гороховский // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 5. — С. 29–39.

Pivinskii, Yu. E. Engineering, manufacturing, and servicing of shaped and highly concentrated ceramic binding suspensions / Yu. E. Pivinskii, E. M. Grichpun, A. M. Gorokhovskii // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 245–253.

6. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. В 3 т. Т. 2 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Стройиздат СПб., 2003. — 668 с.

7. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 8. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных на основе смешанных ВКВС состава: боксит, кварцевое стекло, реактивный глинозем / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 12. — С. 26–35.

8. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 1. Высокоглиноземистый боксит как базовый сырьевой компонент / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, В. А. Перепелицын // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 8. — С. 16–23.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 1. High-alumina bauxite as a basic raw material component / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, V. A. Perepelitsyn // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 344–350.

9. **Гришпун, Е. М.** Двадцатилетняя эпоха сотрудничества / Е. М. Гришпун, Ю. Е. Пивинский // *Новые огнеупоры*. — 2007. — № 1. — С. 15–25.

10. **Пивинский, Ю. Е.** Технологические особенности получения спеченной керамики на основе боксита / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, С. С. Орданьян [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2004. — № 1. — С. 31–38.

Pivinskii, Yu. E. Technology for preparing sintered ceramics based on bauxite HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, S. S. Ordanyan [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2004. — Vol. 45, № 2. — P. 124–130.

11. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические вяжущие и керамобетоны / Ю. Е. Пивинский. — М. : Металлургия, 1990. — 274 с.

12. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 5. Влияние температуры обжига на свойства материалов, полученных из композиционных ВКВС с добавкой огнеупорной глины / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Л. В. Острыakov // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 4. — С. 24–29.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 5. Effect of firing temperature on properties of materials prepared from composite HCBS with addition of refractory clay / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, L. V. Ostryakov // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 180–184.

13. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 6. О процессе муллитизации и тепловом расширении материалов на основе ВКВС композиционного состава / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, А. Ю. Колобов // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 6. — С. 31–38.

Pivinskii, Yu. E. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 6. Mullitization and thermal expansion of materials based on compound composition HCBS / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, A. Yu. Kolobov // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 297–303.

14. **Пивинский, Ю. Е.** Исследования в области получения формованных и неформованных огнеупоров на основе высокоглиноземистых ВКВС. Часть 7. О спекании и вторичном муллитообразовании материалов на основе ВКВС композиционного состава в процессе изотермического нагрева и изотермического обжига / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 10. — С. 42–51.

15. **Полубояринов, Д. Н.** Высокоглиноземистые керамические и огнеупорные материалы / Д. Н. Полубояринов, В. Л. Балкевич, Р. Я. Попильский ; под ред Д. Н. Полубояринова. — М. : Стройиздат, 1960. — 234 с.

16. **Морено, А. К.** Получение и квантификация муллита высокой степени чистоты при 1600 °С из каолиновой глины и кальцинированного глинозема / А. К. Морено, М. Б. Ломбарди, А. Н. Суан // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 8. — С. 24–30.

Moreno, A. X. Production and quantification of high-purity mullite at 1600 °C from kaolinitic clay and calcined alumina / A. X. Moreno, M. B. Lombardi, A. N. Scian // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 2016. — Vol. 56, № 4. — P. 351–357. ■

Получено 22.04.16

© Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин,
А. Ю. Колобов, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

International Conference on
Nanomaterials and Nanotechnology
A global platform for smart nanotechnology
01 - 03 March, 2017
Allahabad, India
www.vbripress.com/icnano
Organised and sponsored by
Vinoba Bhave Research Institute
IAAM
VBRI Press

С. В. Зайцев, к. т. н. В. А. Дороганов (✉), к. т. н. Е. А. Дороганов,
д. т. н. Е. И. Евтушенко

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

УДК 666.762.1: 666.792.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ МУЛЛИТОКАРБИДКРЕМНИЕВОГО СОСТАВА И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Проведены исследования синтеза искусственных керамических вяжущих муллитокарбидкремниевого состава и композитов на их основе. Исследованы реологические и физико-механические характеристики вяжущих. Установлены закономерности уплотнения композитов в зависимости от условий формования и типа исходного сырья. Показана возможность использования искусственных керамических вяжущих для получения высокоплотных керамических композитов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: карбид кремния, искусственные керамические вяжущие, композиты, высокоглиноземистый шамот.

Развитие атомной энергетики, металлургической, машиностроительной и химической отраслей промышленности, авиационной и космической техники невозможно без создания композиционных материалов, пригодных для работы в экстремальных условиях. Такие материалы при агрессивных условиях эксплуатации должны быть работоспособны и надежны. Поэтому разработка и внедрение высокоэффективных материалов, надежно работающих в экстремальных условиях, представляет собой весьма актуальную задачу.

В области создания высокоэффективных огнеупорных композитов большой интерес вызывают композиты муллитокорундового состава [1, 2], а также на основе бескислородных соединений, которые характеризуются повышенной стойкостью к воздействию агрессивных сред при высоких температурах. Одним из самых распространенных бескислородных соединений является карбид кремния. Он обладает хорошими механическими свойствами при комнатной и высоких температурах, высокой теплопроводностью, хорошей химической стойкостью, высокими показателями износо- и коррозионной стойкости [3–5].

Одним из путей повышения эффективности работы композиционных материалов, эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных высокотемпературных сред, является добавка в них искусственных керамических вяжущих (ИКВ) различного состава, полученных по технологии высококонцентрированных керамиче-

ских вяжущих суспензий (ВКВС) [6–10]. В связи с этим в данной работе представлены результаты исследования совместного синтеза ИКВ муллитокарбидкремниевого состава на различные свойства суспензии и композитов на ее основе.

В качестве исходного сырья для проведения исследований в данной работе использовали высокоглиноземистый шамот муллитокорундового состава с содержанием Al_2O_3 не менее 75 % и черный карбид кремния (ГОСТ 26327). Синтез ИКВ на основе карбида кремния и шамота проводили методом совместного помола в шаровой мельнице объемом 0,1 м³ с корундовыми футеровкой и мелющими телами в оптимальной области pH при поэтапной загрузке материала с постепенным повышением значения объемной концентрации твердой фазы C_v . Состав смеси для помола был выбран исходя из исследований, проведенных ранее [11], и содержал 70 % высокоглиноземистого шамота и 30 % карбида кремния. После помола суспензии стабилизировались в барабане объемом 0,01 м³ в течение 6 ч путем гравитационного перемешивания. Затем определяли основные характеристики ИКВ. Результаты приведены ниже:

Влажность, %.....	13,8
Плотность, г/см ³	2,41
Время истечения, мин.....	3,0
Содержание частиц, %:	
более 63 мкм.....	4,1
менее 100 нм.....	1,2
Объемная концентрация твердой фазы.....	0,65

Реологические характеристики полученной ИКВ определяли на ротационном вискозиметре «Реотест-2» с использованием системы коаксиальных гладких цилиндров (рис. 1). Анализ реологической зависимости показал, что полученная дисперсная система характеризуется ярко выраженным тиксотропным характером поведе-



В. А. Дороганов
E-mail: dva_vadjik1975@mail.ru

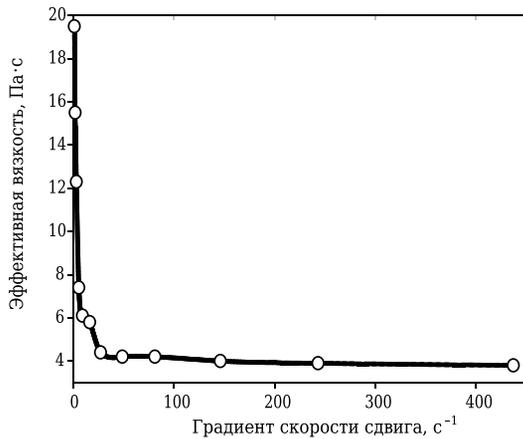


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига муллитокарбидкремниевых ИКВ

ния с повышенными значениями эффективной вязкости. Особенно это проявляется в области низких градиентов скорости сдвига, что отличается от этого показателя ИКВ, полученного раздельным способом [11].

Анализ микроструктуры полученной дисперсной системы, выполненный с помощью сканирующей электронной микроскопии (микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU), показал, что преимущественный диаметр частиц 1–5 мкм (рис. 2). Наличие частиц диаметром менее 100 нм свидетельствует о механохимических процессах, происходящих при помоле. За счет разности в твердости сырьевых компонентов происходит более интенсивное увеличение содержания наночастиц по сравнению с их количеством при раздельном помоле данных материалов [11].

Из синтезированного ИКВ карбида кремния и высокоглиноземистого шамота были отформованы методом шликерного литья в гипсовые формы образцы в виде кубиков с ребром 30 мм. Образцы высушивали при 100–110 °С в сушильном шкафу до постоянной массы и подвергали обжигу в лабораторной электропечи в интервале температур от 1000 до 1300 °С в окислительной среде. Выдержка при максимальной температуре составляла 1 ч. Затем образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры и определяли их основные физико-механические характеристики, представленные на рис. 3.

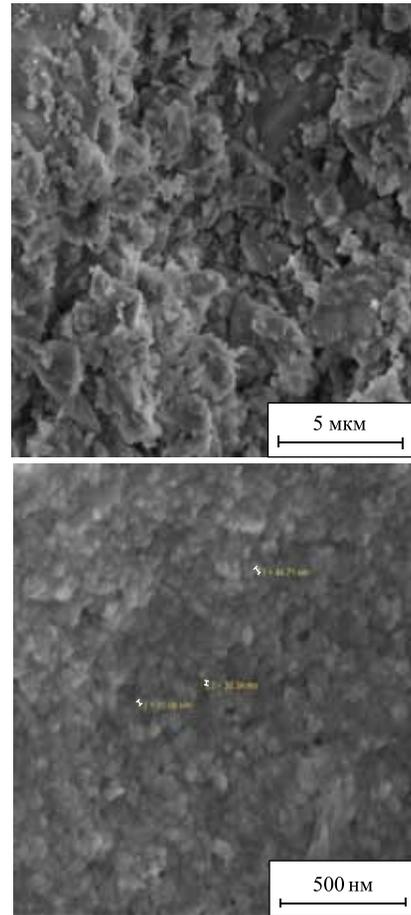


Рис. 2. Микрофотографии частиц твердой фазы муллитокарбидкремниевых ИКВ после сушки

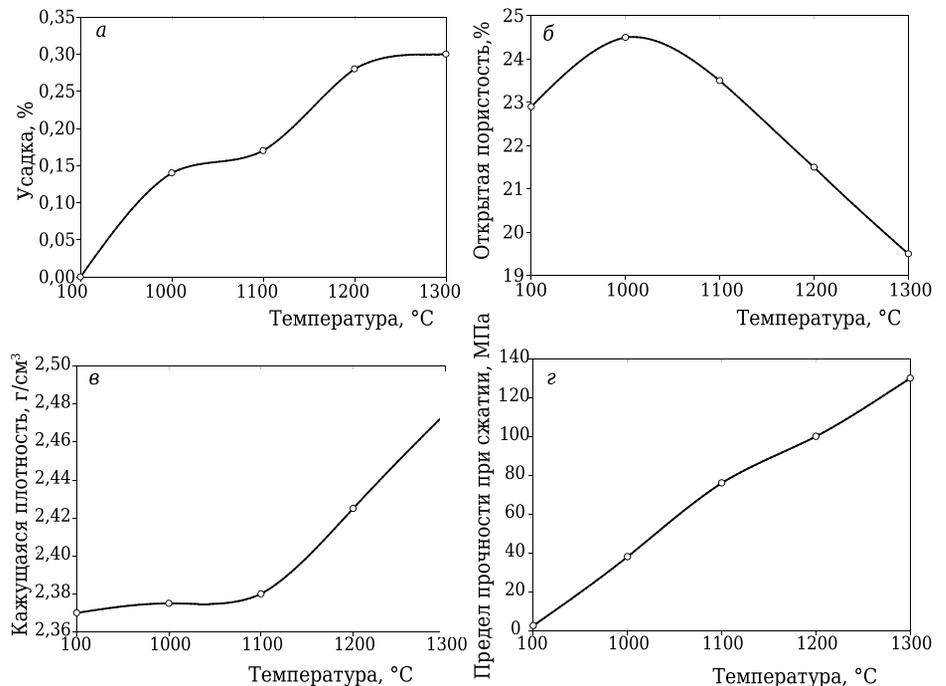


Рис. 3. Зависимость усадки (а), открытой пористости (б), кажущейся плотности (в) и предела прочности при сжатии (г) образцов на основе ИКВ муллитокарбидкремниевых состава от температуры обжига

Образцы на основе муллитокарбидкремниевый ИКВ с повышением температуры обжига до 1300 °С характеризуются незначительным увеличением огневой усадки до максимального значения, не превышающего 0,3 %. Процесс

Таблица 1. **Зерновые составы исследуемого заполнителя**

Состав	Содержание фракций, %, размером, мм		
	<0,5	0,5–2,5	2,5–5,0
1	–	–	100
2	–	100	–
3	100	–	–
4	60	20	20
5	40	40	20
6	40	20	40
7	20	60	20
8	20	40	40
9	20	20	60

Таблица 2. **Составы для формования**

Состав	Содержание вяжущего, %	Содержание заполнителя, %, при формовании	
		вибропрессованием	полусухим прессованием
1	70	30	30
2	60	40	40
3	50	50	50
4	40	60	60
5	30	–	70

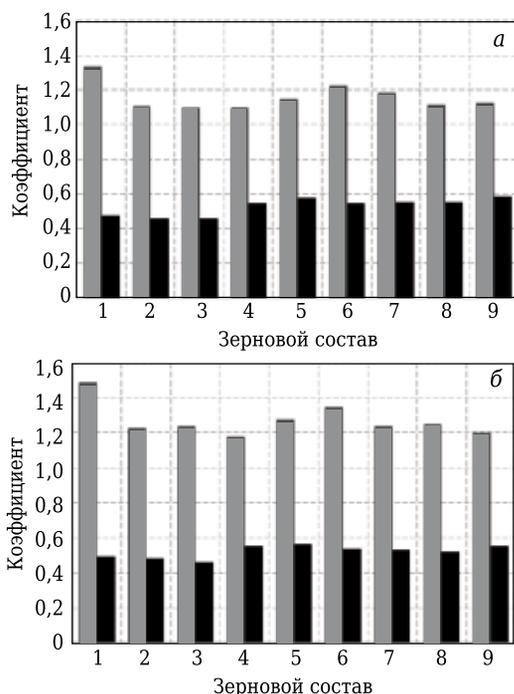


Рис. 4. Диаграммы изменения коэффициента уплотнения (■) и коэффициента упаковки заполнителя (■) в зависимости от фракционного состава (состав указан в табл. 1) при полусухом формовании (а) и вибропрессовании (б)

сопровождается снижением открытой пористости на 3,5–4,0 %, повышением кажущейся плотности на 4–5 % и увеличением механической прочности более чем в 40 раз до максимального значения 130 МПа.

При формировании структуры огнеупорных материалов важную роль играет зерновой состав заполнителя. В этой связи при разработке композитов на основе ИКВ муллитокарбидкремниевый состав был подобран оптимальный трехфракционный зерновой состав заполнителя, соответствующие составы представлены в табл. 1. В качестве заполнителя использовали высокоглиноземистый шамот с содержанием Al_2O_3 , аналогичным содержанию в шамоте для получения суспензии. Оптимальный зерновой состав подбирали по значению коэффициента упаковки $K_{уп}$ и коэффициента уплотнения $K_{упл}$ [12]. На рис. 4 представлены диаграммы изменения значений коэффициентов уплотнения и упаковки заполнителя для вибро- и полусухого прессования. Из анализа диаграмм следует, что для вибропрессования и полусухого формования оптимальным зерновым составом заполнителя является состав 6 (см. табл. 1), который характеризуется повышенными значениями коэффициентов упаковки ($K_{уп}$ равен 0,54 и 0,55) и уплотнения ($K_{упл}$ равен 1,35 и 1,23).

На основе выбранного оптимального зернового состава заполнителя были исследованы различные массы на основе ИКВ муллитокарбидкремниевый состав в соответствии с табл. 2. Экспериментальные образцы (кубы с ребром 30 мм) формовали методом вибро- и полусухого прессования под давлением 50 МПа. После сушки при 100–110 °С образцы подвергали обжигу в окислительной среде при 1300 °С с выдержкой 1 ч. Затем были определены основные физико-механические характеристики (рис. 5).

Из анализа представленных на рис. 5 графиков видно, что при увеличении содержания суспензии с 30 до 50 % происходит снижение открытой пористости на 44–45 % до минимального значения 12–14 %, при этом происходит повышение кажущейся плотности и предела прочности при сжатии до максимальных значений — 2,50–2,55 г/см³ и 75–80 МПа соответственно. При дальнейшем увеличении количества вяжущего от 50 до 70 % происходит ухудшение свойств. Из вышеизложенного следует, что оптимальная концентрация вяжущего в шихте при различном способе формования составляет 50 %, при этом образцы характеризуются максимальными значениями прочности и плотности, а также минимальной пористостью (11,5–12,0 %), при этом огневая усадка не превышает 0,3–0,4 %.

Таким образом, из представленных результатов следует, что при совместном помолу ИКВ на основе муллитокорундового шамота и кар-

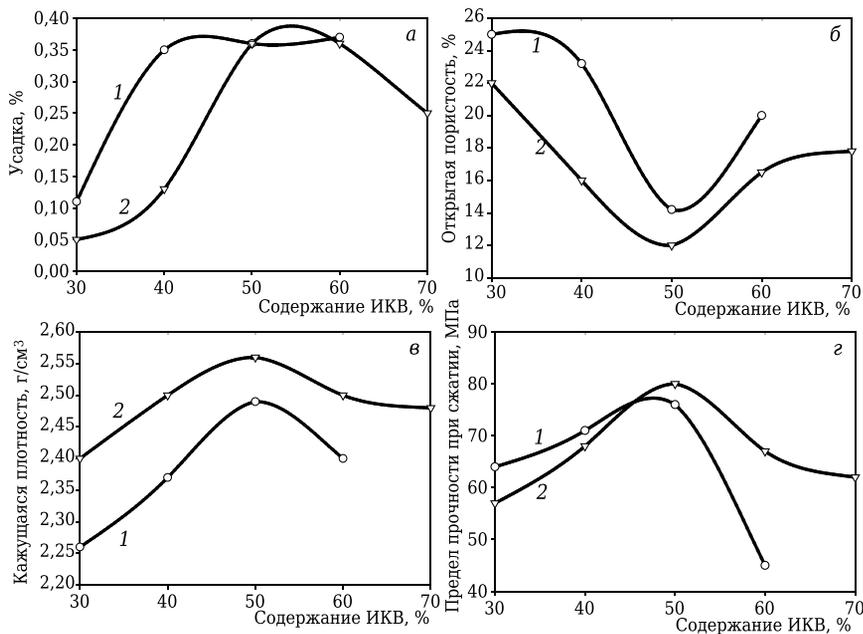


Рис. 5. Зависимость усадки (а), открытой пористости (б), кажущейся плотности (в) и предела прочности при сжатии (г) образцов, отформованных вибропрессованием (1) и полусухим формованием (2), термообработанных при 1300 °С, от содержания ИКВ в формовочной массе

бида кремния происходит эффективный синтез муллитокарбидкремниевой дисперсной системы, характеризующейся высокими физико-механическими показателями при незначительной усадке. Показана возможность использования данной системы в качестве вяжущего для огнеупорных композиционных материалов, характеризующихся низкими показателями открытой пористости (до 14 %) и отличающихся незначительной усадкой (до 0,4 %) при температуре обжига 1300 °С.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 14-43-08046 и Программы стратегического развития БГТУ им. В. Г. Шухова.

Библиографический список

- Meng, B.** Effects of in situ synthesized mullite whiskers on flexural strength and fracture toughness of corundum-mullite refractory materials / *B. Meng, P. Jinhui* // *Ceram. Intern.* — 2013. — Vol. 39, Is. 2. — P. 1525–1531.
- Kong, X.** Effects of pyrolusite additive on the microstructure and mechanical strength of corundum-mullite ceramics / *X. Kong, T. Yuming, C. Yuesheng* // *Ceram. Int.* — 2015. — Vol. 41, № 3, Part B. — P. 4294–4300.
- Kwang-Young, L.** Mechanical properties of electrically conductive silicon carbide ceramics / *L. Kwang-Young, K. Young-Wook, J. Kwang* // *Ceram. Int.* — 2014. — Vol. 40, № 7, Part B. — P. 10577–10582.
- Филонов, К. Н.** Новая профилированная керамика на основе карбида кремния / *К. Н. Филонов, В. Н. Курлов, Н. В. Классен, К. Н. Филонов* // *Известия РАН. Серия физическая.* — 2009. — Т. 73, № 10. — С. 1460–1462.
- Zhang, J.** Properties of silicon carbide ceramics from gelcasting and pressureless sintering / *J. Zhang, J. Dongliang, L. Qingling* // *Materials & Design.* — 2015. — Vol. 65. — P. 12–16.
- Пивинский, Ю. Е.** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. В 2 т. Т. 2 / *Ю. Е. Пивинский.* — СПб. : Стройиздат СПб., 2003. — 688 с.
- Дороганов, В. А.** Разработка и исследование композиционных огнеупорных материалов на основе модифицированных дисперсных систем / *В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Н. С. Бельмаз* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2009. — № 11. — С. 35–41.
- Doroganov, V. A.** Development and study of composite refractory materials based on modified dispersed systems / *V. A. Doroganov, E. A. Doroganov, N. S. Bel'maz* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2009. — Vol. 50, № 6. — P. 431–437.
- Дороганов, В. А.** Высококонтрированные керамические вяжущие суспензии на основе карбида кремния / *В. А. Дороганов, Ю. Н. Трепалина* // *Новые огнеупоры.* — 2010. — № 8. — С. 50–52.
- Doroganov, V. A.** Highly concentrated ceramic binder suspensions based on silicon carbide / *V. A. Doroganov, Yu. N. Trepalina* // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2010. — Vol. 51, № 4. — P. 302–304.
- Дороганов, В. А.** Огнеупорные материалы на основе искусственных керамических вяжущих суспензий карбидкремниевой состава / *В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко* [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* — 2013. — № 4. — С. 156–160.
- Дороганов, В. А.** Исследование наномодифицированных вяжущих карбида кремния и композитов на их основе / *В. А. Дороганов, Н. А. Перетоккина, Е. А. Дороганов* [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 9. — С. 44–47.
- Doroganov, V. A.** Study of nano-differentiated silicon carbide binders and composites based on them / *V. A. Doroganov, N. A. Peretokina, E. A. Doroganov* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics.* — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 465–468.
- Зайцев, С. В.** Исследование свойств наносодержащих искусственных керамических вяжущих в системе Al₂O₃-SiO₂-SiC / *С. В. Зайцев, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко* // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 10. — С. 32–36.
- Дороганов, В. А.** Огнеупорные керамобетоны : монография / *В. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко.* — Saarbrücken : LAB LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. — 188 с. ■

Получено 09.06.16

© С. В. Зайцев, В. А. Дороганов, Е. А. Дороганов, Е. И. Евтушенко, 2016 г.

К. х. н. М. С. Манылов¹ (✉), С. В. Филимонов¹, к. х. н. О. Н. Шорникова^{1, 2},
к. х. н. А. П. Малахо^{1, 2}, д. х. н. В. В. Авдеев^{1, 2}

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова», Москва, Россия

² ЗАО «Институт новых углеродных материалов и технологий»,
Москва, Россия

УДК 546.26.-162; 541.66

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЕНОГРАФИТА

Путем одноосного прессования пенографита с его последующей пропиткой ацетоновым раствором пропаргиллизованной новолачной смолы и коксованием были получены низкоплотные теплопроводящие углерод-углеродные материалы с содержанием кокса от 2,8 до 40 мас. % и плотностью, варьирующейся в диапазоне от 0,065 до 0,081 г/см³. Показано, что механическая прочность полученных образцов растет пропорционально содержанию в них кокса в диапазоне от 17 до 40 мас. %, при этом теплопроводность практически не меняется и находится в пределах 2,5–3,2 Вт/(м·К).

Ключевые слова: *пенографит, коксование, углерод-углеродные композиты, теплопроводящие материалы.*

ВВЕДЕНИЕ

Низкоплотные материалы на основе термо-расширенного графита обладают рядом важных технических качеств: высокими химической и термической стойкостью (выдерживают нагрев до 3000 °С в инертной атмосфере) и пористостью, простотой формования, позволяющей получать компакты с широким варьируемым интервалом теплопроводности [1–3], что определяет возможность их применения в различных сферах производства как в качестве высокотемпературной изоляции, так и в качестве теплораспределителя. В частности, такие материалы нашли применение в производстве теплораспределительных панелей для потолочных систем обогрева и кондиционирования помещений [4, 5].

Повышение механической прочности теплораспределительных низкоплотных графитовых плит (НГП) является важной задачей, поскольку их деформация в процессе производства и эксплуатации существенно влияет на технические характеристики, в том числе на теплопроводность.

Целью данной работы являлось определение эффективности пропитки НГП раствором полимерного связующего с его последующим отверждением и коксованием для объемного упрочнения теплопроводящих материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Нитрат графита V степени синтезировали из природного очищенного графита (чистота 99,8 %, размер частиц 250–350 мкм) по методике, описанной в работе [6]. Номер степени интеркалированного соединения графита подтвержден данными рентгенофазового анализа, период идентичности составил 21,22 Å, что согласуется с литературными данными [6]. Нитрат графита гидролизovali для получения окисленного графита, который затем вспенивали при 1000 °С. Время термоудара не превышало 3 с. Насыпная плотность полученного терморасширенного графита (ТРГ) составила 4,7 кг/м³. Пенографитовые компакты плотностью 63 кг/м³ формовали в пресс-форме с точно известными геометрическими параметрами.

Для пропитки НГП была выбрана пропаргиллизованная новолачная смола со степенью замещения пропаргиллом 50 % (PN-50) [7, 8]. Смола PN-50 отличается от фенолоформальдегидной повышенной стойкостью к термическому окислению и отсутствием содержания летучих компонентов (фенола и формальдегида). Это является критическим фактором, поскольку, во-первых, выделение летучих веществ при отверждении пропитанного низкоплотного графитового материала приводит к нарушению его структуры, а во-вторых, фенол и формальдегид являются токсичными соединениями, негативно влияющими на организм человека. Синтез смолы проводили по методике, описанной в работе [7]. Контроль содержания смолы в НГП осуществляли путем определения ее концентрации в растворе при фиксированном времени пропитки (до насыщения). С этой целью



М. С. Манылов
E-mail: manylov.msu@gmail.com

готовили растворы смолы в ацетоне с концентрациями 0,5, 5, 10, 15, 20 и 25 мас. %. Образцы НГП размерами 150×150×20 мм помещали в ванну с раствором смолы и выдерживали в течение 1 ч для полного насыщения. Затем образцы сушили при 60 °С в течение 12 ч. Отверждение пропитанных образцов НГП проводили при 250 °С в течение 5 ч.

Коксование образцов осуществляли в вакуумной печи при 600 °С в течение 6 ч.

Плотность образцов определяли весовым методом, измеряя их массу на лабораторных весах «OHAUS Adventurer» с погрешностью 0,001 г и геометрические размеры с помощью штангенциркуля FIT-19856 с погрешностью 0,01 мм. Плотность образцов ρ рассчитывали по формуле

$$\rho = \frac{m}{abc}, \quad (1)$$

где m — масса образца; a , b и c — линейные размеры образца.

Для оценки механических свойств определяли модуль упругости и предел прочности при изгибе на настольной разрывной электро-механической машине «TiniusOlsen (Hounsfield) H5KS».

Модуль упругости при сжатии определяли на образцах в форме параллелепипедов размерами 20×20×40 мм со скоростью 2 мм/мин. При этом измеряли нагрузку на образец и смещение каретки разрывной машины. По тангенсам угла наклона начальных линейных участков полученных кривых сжатия рассчитывали модуль Юнга:

$$E = \frac{Fl}{Sx}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости, МПа; F — приложенная сила, Н; l — высота образца, мм; S — площадь основания образца, мм²; x — деформация образца, мм.

Предел прочности при изгибе НГП определяли трехточечным методом [9] на образцах в виде параллелепипедов размерами 150×15×15 мм. Скорость перемещения индентора составляла 20 мм/мин. Предел прочности при изгибе рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2}, \quad (3)$$

где σ — предел прочности при изгибе, МПа; F — приложенная сила, Н; l — рабочая длина, мм; b — ширина образца, мм; h — толщина образца, мм.

Предел прочности при изгибе определяется максимумом на кривой зависимости нагрузки от перемещения индентора.

Коэффициент температуропроводности измеряли методом лазерной вспышки с использованием прибора флешанализатора «NETZSCH

LFA 457 MicroFlash» при 25 °С на образцах размерами 10×10×4 мм. При расчете коэффициента температуропроводности с помощью встроенного программного обеспечения использовали математическую модель, учитывающую радиальные потери тепла.

Измерение удельной теплоемкости образцов проводили в платиновых тиглях на приборе синхронного термического анализа «NETZSCH STA Jupiter 449C» при скорости нагрева 10 К/мин в потоке аргона со скоростью подачи газа 70 мл/мин. В качестве образца сравнения использовали сапфир.

Теплопроводность рассчитывали с использованием полученных значений удельной теплоемкости и плотности образцов по формуле

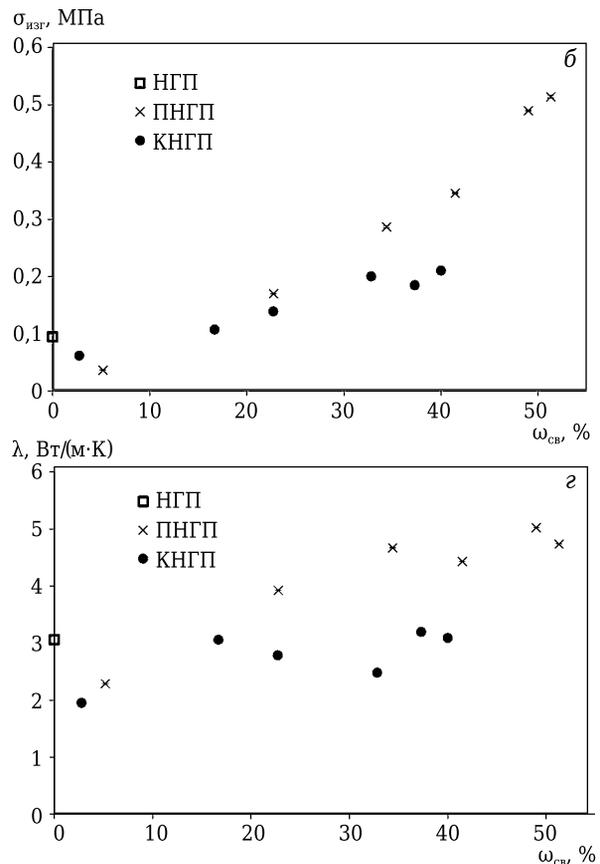
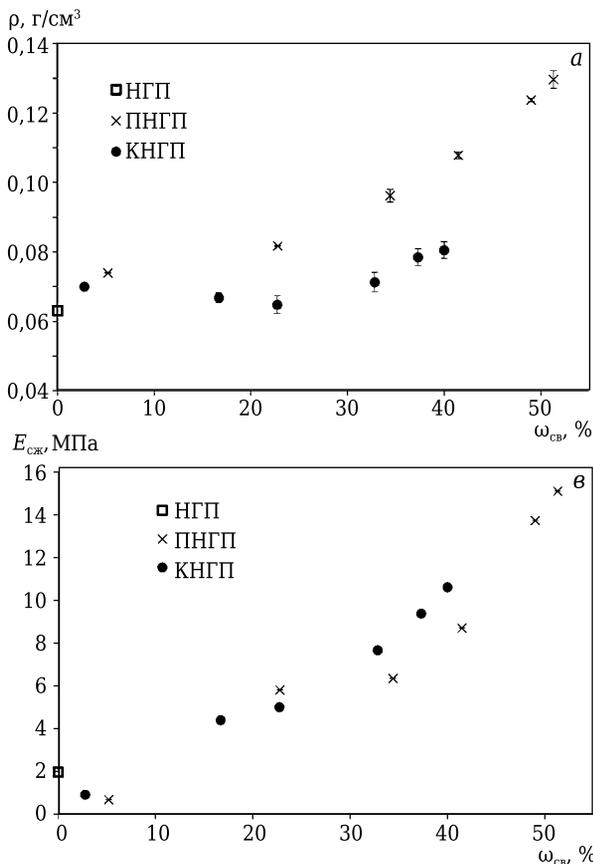
$$\lambda = 10^{-2} \alpha C_p \rho, \quad (4)$$

где λ — теплопроводность, Вт/(м·К); α — коэффициент температуропроводности, мм²/с; C_p — удельная теплоемкость, Дж/(г·К); ρ — плотность образца, кг/м³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате пропитки и отверждения были получены образцы ПНГП с содержанием связующего до 51 мас. %. В процессе удаления растворителя и отверждения смолы изменения геометрических размеров образцов не происходило. В результате коксования были получены образцы КНГП с содержанием связующего (продукта термолитиза смолы PN-50) до 40 %, коксовый остаток составил (62±4) мас. %. В процессе термолитиза в результате выделения газообразных веществ произошло увеличение размеров образцов низкоплотного материала пропорционально содержанию связующего в ПНГП, однако трещин и полостей в материале не наблюдалось. Кривые зависимости плотности материалов от содержания связующего (смолы PN-50 в ПНГП и кокса в КНГП) представлены на рисунке, а. Плотность образцов ПНГП растет равномерно с увеличением массовой доли смолы, в свою очередь, снижение плотности КНГП связано с расширением материала при коксовании.

Согласно результатам механических испытаний, увеличение массовой доли смолы PN-50 в ПНГП от 23 до 51 мас. % приводит к равномерному повышению его прочностных характеристик: предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ и модуля упругости при сжатии $E_{сж}$ (рисунок, б, в). В то же время пропитка 0,5 %-ным раствором PN-50 приводит к разрушению связей между частицами компактированного пенографита [10], в результате чего нарушается структура материала. Такой эффект вызван быстрым испарением ацетона с поверхности, причем 5 %-ного содержания смолы недостаточно даже



Зависимость плотности ρ (а), предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ (б), модуля упругости при сжатии $E_{сж}$ (в), теплопроводности λ (г) графитовых плит от содержания в них связующего $\omega_{св}$

для сохранения исходной прочности компактированного пенографита. После коксования $\sigma_{изг}$ КНГП падает вдвое по сравнению с показателями соответствующих образцов ПНГП с содержанием смолы 23–51 мас. %, что можно связать как с деструкцией и уменьшением количества связующего, так и с понижением плотности материала. Тем не менее прочность КНГП с содержанием кокса от 33 до 40 мас. % вдвое превосходит предел прочности при изгибе исходного материала. Модуль упругости низкоплотного материала после коксования претерпевает меньшие изменения.

На рисунке, г представлен график зависимости рассчитанной по уравнению (4) теплопроводности низкоплотных графитовых плит от содержания в них связующего. Из-за значительного увеличения плотности и удельной теплоемкости образцов ПНГП с содержанием смолы более 20 мас. % их теплопроводность возрастает, достигая значения 5,0 Вт/(м·К). Как и в случае с механической прочностью, падение теплопроводности в результате пропитки 0,5 %-ным раствором объясняется разрушением связей и снижением удельного числа контактов между частицами пенографита в НГП. В результате коксования теплопроводность образцов КНГП падает и находится в диапазоне 2,5–3,2 Вт/(м·К),

что примерно соответствует значению для исходного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате пропитки низкоплотных пенографитовых компактов ацетоновым раствором пропаргилированной новолачной смолы с последующим коксованием были получены образцы углерод-углеродного теплораспределяющего материала с содержанием кокса от 2,8 до 40 мас. % и плотностью, изменяющейся в диапазоне от 0,065 до 0,081 г/см³ в зависимости от содержания смолы в пропиточном растворе. Показано, что представленный в работе метод позволяет повысить механическую прочность (на изгиб и сжатие) теплораспределяющего материала пропорционально содержанию в нем кокса при сохранении его теплопроводности в пределах 2,5–3,2 Вт/(м·К).

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках мероприятия 1.3 (Соглашение о предоставлении субсидии Минобрнауки России № 14.579.21.0028 от 5 июня 2014 г. Уникальный идентификатор соглашения — RFMEFI57914X0028).

Библиографический список

1. **Bonnissel, M.** Compacted exfoliated natural graphite as heat conduction medium / *M. Bonnissel, L. Luo, D. Tondeur* // Carbon. — 2001. — Vol. 39. — P. 2151–2161.
2. **Wang, L. W.** Anisotropic thermal conductivity and permeability of compacted expanded natural graphite / *L. W. Wang, Z. Tamainot-Telto, S. J. Metcalf* [et al.] // Appl. Therm. Eng. — 2010. — Vol. 30. — P. 1805–1811.
3. **Po-Hsiu, Chen.** Thermal and electrical conduction in the compaction direction of exfoliated graphite and their relation to the structure / *Chen Po-Hsiu, D. D. L. Chung* // Carbon. — 2014. — Vol. 77. — P. 538–550.
4. **Yong-Li, Yuan.** Experimental Study of Heat Performance on Ceiling Radiant Cooling Panel / *Yuan Yong-Li, Zhou Xiang, Zhang Xu* // Proc. Engineering. — 2015. — Vol. 121. — P. 2176–2183.
5. **Wilkins, C. K.** Cool ceiling system. A European air-conditioning alternative / *C. K. Wilkins, R. Kosonen* // ASHRAE J. — 1992. — Vol. 39. No. 4. — pp. 41–45.
6. **Авдеев, В. В.** Синтез соединений внедрения графита с HNO_3 / *В. В. Авдеев, Н. В. Сорокина, О. А. Тверезовская* [и др.] // Вестник Московского университета. — 1999. — Т. 40, № 6. — С. 422–425.
7. **Bulgakov, B.** Synthesis and characterization of cured allyl/propargyl ether novolac resins / *B. Bulgakov, D. Kalugin, A. Babkin* [et al.] // J. Chem. Eng. — 2013. — Vol. 7. — P. 1131–1135.
8. **Bulgakov, B.** Propargylated novolac resins for fibre-reinforced plastics: processing aspects / *B. Bulgakov, D. Kalugin, A. Babkin* [et al.] // Can. J. Chem. Eng. — 2015. — Vol. 94, № 1. — P. 46–52.
9. **Филимонов, С. В.** Теплофизические свойства высокопористых монолитов на основе пенографита / *С. В. Филимонов, Н. Е. Сорокина, Н. В. Яценко* [и др.] // Неорганические материалы. — 2013. — Т. 49, № 4. — С. 352–358.
10. **Yang, Leng.** Influences of density and flake size on the mechanical properties of flexible graphite / *Leng Yang, Gu Jialin, Cao Wenquan, Zhang Tong-Yi* // Carbon. — 1998. — Vol. 36, № 7/8. — P. 875–881. ■

Получено 09.08.16

© М. С. Манылов, С. В. Филимонов, О. Н. Шорникова, А. П. Малахов, В. В. Авдеев, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ТЕРМООБРАБОТКА

11-я международная специализированная выставка

18 - 20 сентября 2017

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 7, зал 1

Единственная в России
выставка термического
оборудования и технологий

18 - 19 сентября

Международная конференция
«ИННОВАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ»

Разделы выставки:

- ✦ Термическое, химико-термическое, индукционное оборудование
- ✦ Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- ✦ Лабораторные печи, сушильные шкафы
- ✦ Лабораторное оборудование
- ✦ Установки нанесения покрытий
- ✦ Оборудование для электронно-лучевой сварки и сварки в среде аргона
- ✦ Лазерно-технологическое оборудование
- ✦ Комплексы глубокого охлаждения (криогенная обработка)
- ✦ Оборудование для исследования свойств материалов, неразрушающий контроль

Информационная поддержка:



Факты о выставке 2015 года:

- 97 экспонентов из 12 стран мира
- 3015 кв.м. экспозиции
- 2780 посетителей-специалистов




Организатор: **ООО «Выставочная Компания «Мир-Экспо»** | 115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507 | Тел./факс: 8 495 988-1620 | E-mail: info@htexporus.ru
 Сайт: www.htexporus.ru | Твиттер: @htexpo_ru | YouTube: youtube.com/user/termoobrabotka

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), к. т. н. М. Ю. Фёдоров, к. т. н. М. А. Волосова

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ТРАНСФОРМАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ TiC-ПОКРЫТИЯ. ВАРИАНТ НАГРУЖЕНИЯ — ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Изучено влияние толщины покрытия из карбида титана на трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики под действием теплового потока. В результате численных экспериментов установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм, нанесенного на нитридную керамику, приводит к уменьшению температуры керамики, возрастанию σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i и показателей их структурной неоднородности в поверхностном слое керамики.

Ключевые слова: нитридная керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, тепловой поток, поверхностный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в сфере изделий для высокотемпературного применения во многом зависит от успехов в создании новых керамических материалов многофункционального назначения [1–3]. Комплекс свойств керамики на основе нитрида кремния обеспечивает ее эффективное применение в горячих зонах двигателей и энергоустановок, а также соплах, горелках и инструментах [4–6]. При этом не только уменьшается износ этих конструктивных элементов и инструментов, но и интенсифицируются условия их эксплуатации [7–10]. Дополнительные преимущества нитридной керамики предоставляют покрытия со специальными свойствами, наносимые на рабочие поверхности деталей и инструментов [11, 12]. Эти преимущества базируются на совокупности физических эффектов, которые подробно проанализированы в работе [13].

Однако интуитивное понимание этих положительных эффектов оказывается недостаточным при создании инновационных керамических деталей и инструментов. Разработчикам новой техники необходимы более глубокие знания о сложных процессах, протекающих в нитридной керамике с покрытием при высоких температурах [14]. Особенно актуальны сведения о тепловом и напряженном состоянии поверхностного слоя керамики системы керамика

– покрытие [15–17]. Однако выявление взаимосвязей в этой системе довольно сложная задача из-за существенного влияния многочисленных факторов на ее состояние [18, 19]. Частично задача решена в работах [20, 21]. Однако за рамками этих исследований остался вопрос влияния толщины покрытия на напряженное состояние керамики.

В данной работе поставлена цель — исследовать трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя керамики на основе нитрида кремния, находящейся под действием теплового потока, при изменении толщины TiC-покрытия. Настоящая статья является продолжением работ [22, 23].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении численных экспериментов использовали расчетную схему и методику, приведенные в работе [22]. Исследовали керамику системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ с покрытием TiC толщиной 5, 10 и 15 мкм. К поверхности покрытия прикладывали тепловой поток $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м², а с поверхности, свободной от теплового потока, осуществляли теплоотвод с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м²·град). Определяли напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , и интенсивность напряжений σ_i в поверхностном слое основных структурных элементов керамики — зерна (З), межзеренной фазы, примыкающей к зерну (МФЗ), межзеренной фазы, примыкающей к матрице (МФМ), и поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (М). Использовали метод контрольных точек (КТ), которые были расположены на этих поверхностях [24]. Структурную неоднородность напряжений в поверхностном слое элементов



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

керамики характеризовали следующими показателями: наибольшее σ_{\max} , наименьшее σ_{\min} и среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значения, диапазон изменения Σ , стандартное отклонение s и число N изменений знака для σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние толщины TiC-покрытия на температуры, формирующиеся в КТ поверхностей 3, МФЗ, МФМ и М под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м², показано на рис. 1. Видно, что с увеличением толщины покрытия от 5 до 15 мкм температура в поверхностном слое керамики заметно уменьшается. Например, ее максимальные значения T_{\max} в поверхностном слое 3 (рис. 1, а), МФЗ (рис. 1, б), МФМ (рис. 1, в) и М (рис. 1, г) уменьшаются с 1125 до 921 °С, с 1116 до 914 °С, 1115 до 912 °С и 1113 до 911 °С соответственно при увеличении толщины покрытия Δ_n от 5 до 15 мкм.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое 3 под действием теплового потока $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² показаны на рис. 2. Установлено, что напряжения σ_{11} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 252 МПа — от 3 (КТ24) до -249 МПа (КТ13) при $\sigma_{\text{ср}} = -146$ МПа, $s = 91$ МПа и $N = 1$ (рис. 2, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 268 МПа — от -16 (КТ23) до -284 МПа (КТ16) при $\sigma_{\text{ср}} = -162$ МПа, $s = 95$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 276 МПа — от -3 (КТ23) до -279 МПа (КТ16) при $\sigma_{\text{ср}} = -152$ МПа, $s = 98$ МПа и $N = 0$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 260 МПа — от 26 (КТ19) до -234 МПа (КТ4) при $\sigma_{\text{ср}} = -87$ МПа, $s = 82$ МПа и $N = 2$ (рис. 2, б). При $\Delta_n = 10$ мкм в поверхностном слое зерна формируются σ_{22} с диапазоном изменения 290 МПа — от 21 (КТ17) до -269 МПа (КТ4) при

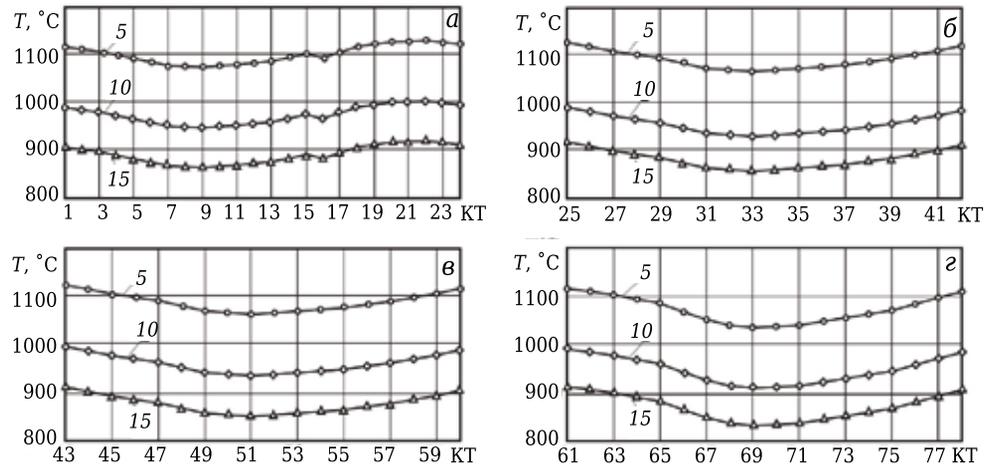


Рис. 1. Влияние толщины TiC-покрытия на температуру T в поверхностных слоях 3 (а), МФЗ (б), МФМ (в) и М (г) в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике; Δ_n указана на кривых, мкм

$\sigma_{\text{ср}} = -91$ МПа, $s = 92$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 316 МПа — от 43 (КТ17) до -273 МПа (КТ4) при $\sigma_{\text{ср}} = -80$ МПа, $s = 99$ МПа и $N = 3$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 129 МПа — от -55 (КТ4) до -184 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = -96$ МПа, $s = 31$ МПа и $N = 0$ (рис. 2, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 123 МПа — от -118 (КТ5) до -241 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = -156$ МПа, $s = 28$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} , которые изменяются в диапазоне 161 МПа — от -147 (КТ6) до -308 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = -198$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 219 МПа — от 96 (КТ23) до 315 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = 226$ МПа, $s = 69$ МПа (рис. 2, г). При $\Delta_n = 10$ мкм диапазон изменения σ_i составляет 264 МПа — от 209 (КТ23) до 473 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = 327$ МПа, $s = 65$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в ди-

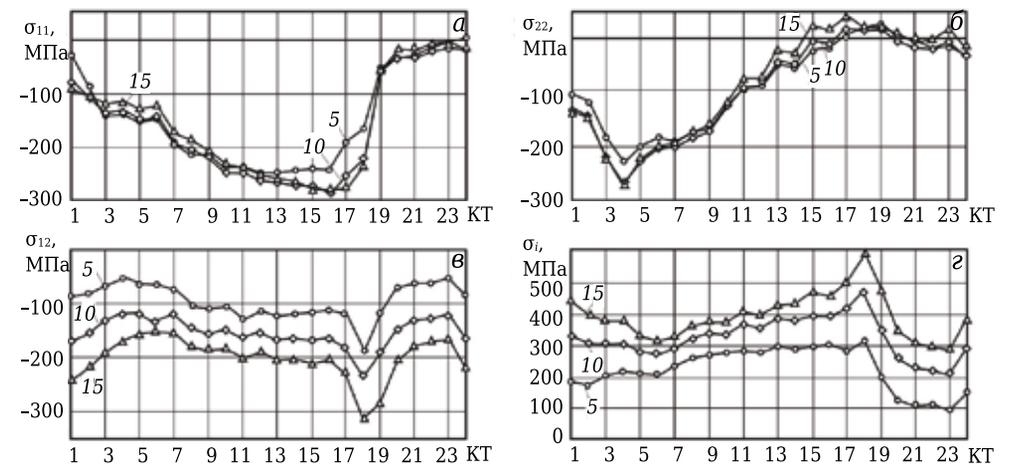


Рис. 2. Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя 3 в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике; Δ_n указана на кривых, мкм

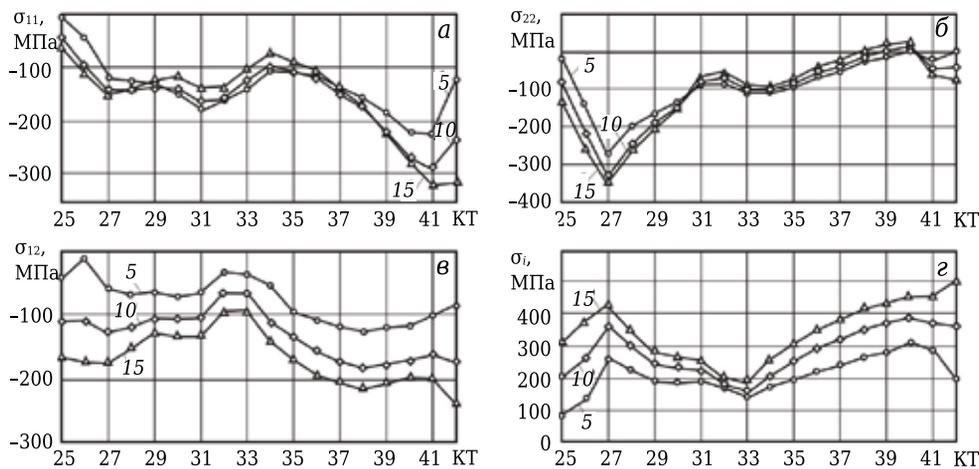


Рис. 3. Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя МФЗ в Si₃N₄-TiC-Y₂O₃-керамике; Δ_п указана на кривых, мкм

апазоне 301 МПа — от 286 (КТ23) до 587 МПа (КТ18) при σ_{ср} = 392 МПа, s = 73 МПа.

Результаты расчетов σ₁₁, σ₂₂, σ₁₂ и σ_i в поверхностном слое МФЗ показаны на рис. 3. Установлено, что напряжения σ₁₁ при Δ_п = 5 мкм изменяются в диапазоне 216 МПа — от -4 (КТ25) до -220 МПа (КТ41) при σ_{ср} = -133 МПа, s = 53 МПа и N = 0 (рис. 3, а). При Δ_п = 10 мкм формируются σ₁₁, изменяющиеся в диапазоне 242 МПа — от -43 (КТ25) до -285 МПа (КТ41) при σ_{ср} = -153 МПа, s = 62 МПа и N = 0. При Δ_п = 15 мкм формируются σ₁₁ с диапазоном изменения 254 МПа — от -64 (КТ25) до -318 МПа (КТ41) при σ_{ср} = -155 МПа, s = 77 МПа и N = 0.

Напряжения σ₂₂ при Δ_п = 5 мкм изменяются в диапазоне 280 МПа — от 5 (КТ40) до -275 МПа (КТ27) при σ_{ср} = -87 МПа, s = 75 МПа и N = 3 (рис. 3, б). При Δ_п = 10 мкм формируются σ₂₂ с диапазоном изменения 347 МПа — от 17 (КТ40) до -330 МПа (КТ27) при σ_{ср} = -100 МПа, s = 92 МПа и N = 2. При Δ_п = 15 мкм образуются σ₂₂, изменяющиеся в диапазоне 381 МПа — от 33

s = 37 МПа и N = 0. При Δ_п = 15 мкм формируются напряжения с диапазоном изменения 147 МПа — от -92 (КТ32) до -239 МПа (КТ42) при σ_{ср} = -168 МПа, s = 41 МПа и N = 0.

Интенсивность напряжений σ_i в этом поверхностном слое при Δ_п = 5 мкм изменяется в диапазоне 221 МПа — от 84 (КТ25) до 305 МПа (КТ40) при σ_{ср} = 204 МПа, s = 58 МПа (рис. 3, г). При Δ_п = 10 мкм диапазон изменения σ_i составляет 232 МПа — от 162 (КТ33) до 394 МПа (КТ40) при σ_{ср} = 287 МПа, s = 75 МПа. При Δ_п = 15 мкм σ_i изменяется в диапазоне 319 МПа — от 184 (КТ33) до 503 МПа (КТ42) при σ_{ср} = 344 МПа, s = 93 МПа.

Результаты расчетов σ₁₁, σ₂₂, σ₁₂ и σ_i в поверхностном слое МФМ показаны на рис. 4. При Δ_п = 5 мкм в этом слое формируются напряжения σ₁₁, изменяющиеся в диапазоне 243 МПа — от -46 (КТ43) до -289 МПа (КТ59) при σ_{ср} = -170 МПа, s = 61 МПа и N = 0 (рис. 4, а). При Δ_п = 10 мкм образуются σ₁₁, изменяющиеся в диапазоне Σ = 235 МПа от -75 (КТ43) до -310 МПа (КТ59)

при σ_{ср} = -166 МПа, s = 66 МПа и N = 0. При Δ_п = 15 мкм формируются σ₁₁ с диапазоном изменения 253 МПа от -79 (КТ43) до -332 МПа (КТ59) при σ_{ср} = -162 МПа, s = 75 МПа и N = 0.

Напряжения σ₂₂ при Δ_п = 5 мкм изменяются в диапазоне 246 МПа — от -2 (КТ59) до -248 МПа (КТ45) при σ_{ср} = -122 МПа, s = 74 МПа и N = 0 (рис. 4, б). При Δ_п = 10 мкм формируются σ₂₂ с

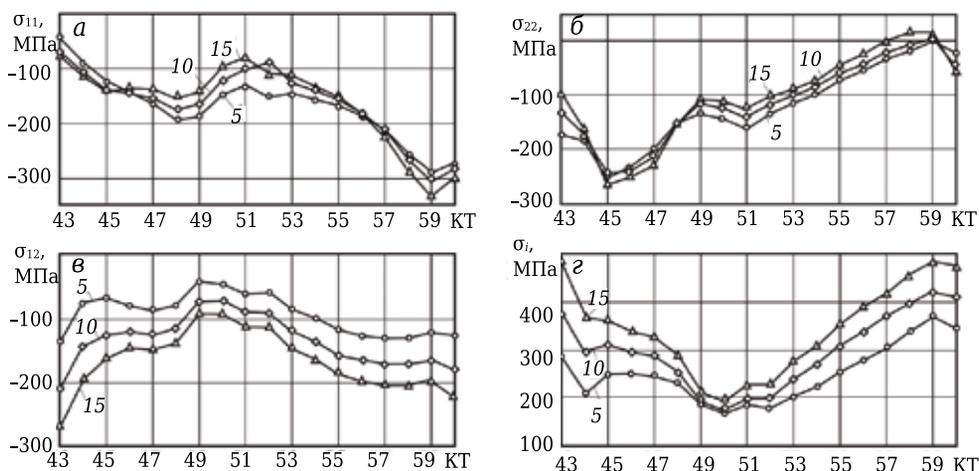


Рис. 4. Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя МФМ в Si₃N₄-TiC-Y₂O₃-керамике; Δ_п указана на кривых, мкм

диапазоном изменения 251 МПа — от 5 (КТ59) до -246 МПа (КТ45) при $\sigma_{cp} = -111$ МПа, $s = 75$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 276 МПа — от 18 (КТ59) до -258 МПа (КТ45) при $\sigma_{cp} = -102$ МПа, $s = 84$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 93 МПа — от -43 (КТ49) до -136 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = -93$ МПа, $s = 31$ МПа и $N = 0$ (рис. 4, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 137 МПа — от -73 (КТ49) до -210 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = -136$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 178 МПа — от -96 (КТ49) до -274 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = -170$ МПа, $s = 96$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 201 МПа — от 164 (КТ50) до 365 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = 246$ МПа, $s = 61$ МПа (рис. 4, г). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 246 МПа — от 176 (КТ50) до 422 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = 298$ МПа, $s = 78$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 292 МПа — от 196 (КТ50) до 488 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = 346$ МПа, $s = 96$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое М показаны на рис. 5. Установлено, что при $\Delta_n = 5$ мкм в этом поверхностном слое формируются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 411 МПа — от -99 (КТ67) до 312 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 124$ МПа, $s = 124$ МПа и $N = 3$ (рис. 5, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 435 МПа — от -78 (КТ67) до 357 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 164$ МПа, $s = 145$ МПа и $N = 3$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 474 МПа — от -96 (КТ78) до 378 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 190$ МПа, $s = 153$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 545 МПа — от -202 (КТ62) до 343 МПа (КТ78) при $\sigma_{cp} = 66$ МПа, $s = 151$ МПа и $N = 3$ (рис. 5, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 634 МПа — от -236 (КТ62) до 398 МПа (КТ78) при $\sigma_{cp} = 84$ МПа, $s = 181$ МПа и $N = 3$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 657 МПа — от -244 (КТ62) до 413 МПа (КТ78) при $\sigma_{cp} = 102$ МПа, $s = 192$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 385 МПа — от 123 (КТ69) до -262 МПа (КТ77) при $\sigma_{cp} = -118$ МПа, $s = 116$ МПа и $N = 2$ (рис. 5, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 475 МПа — от 119 (КТ69) до -356 МПа (КТ77) при $\sigma_{cp} = -175$ МПа, $s = 147$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 519 МПа — от 107 (КТ69) до -412 МПа (КТ77) при $\sigma_{cp} = -215$ МПа, $s = 162$ МПа и $N = 2$.

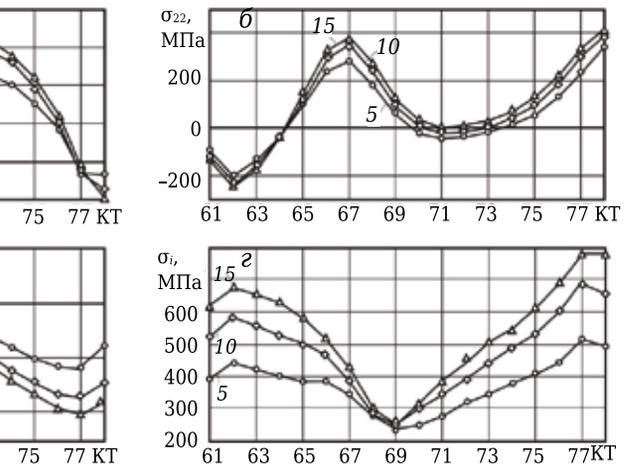


Рис. 5. Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя М в Si₃N₄-TiC-Y₂O₃-керамике; Δ_n указана на кривых, мкм

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 282 МПа — от 229 (КТ69) до 511 МПа (КТ77) при $\sigma_{cp} = 369$ МПа, $s =$

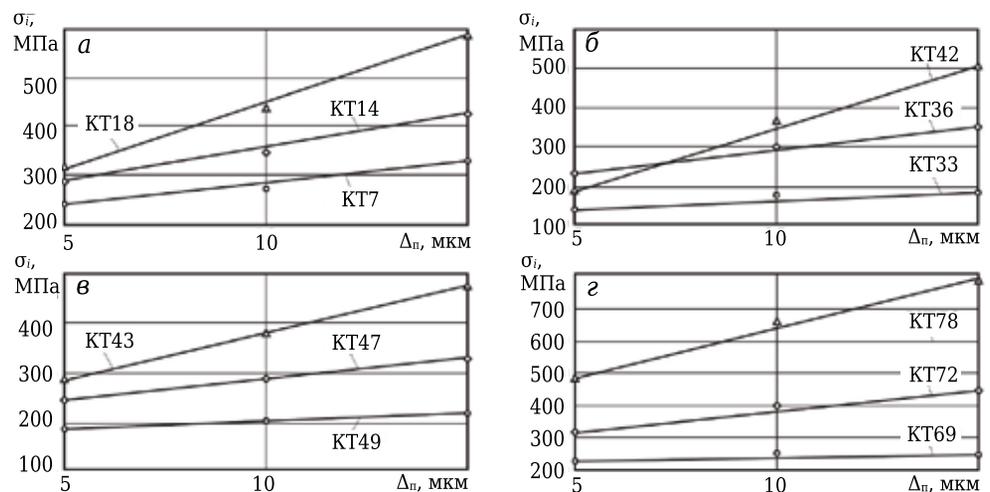


Рис. 6. Влияние толщины TiC-покрытия на σ_i в КТ поверхностных слоев 3 (а), МФ3 (б), МФМ (в) и М (г)

Показатели	σ_{11}			σ_{22}			σ_{12}			σ_i		
	при толщине покрытия Δ_n , мкм											
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
<i>Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе</i>												
Σ	252	268	276	260	290	316	129	123	161	219	264	301
$\sigma_{\text{макс}}$	-249	-284	-279	-234	-269	-273	-184	-241	-308	315	473	587
$\sigma_{\text{мин}}$	3	-16	-3	26	21	43	-55	-118	-147	96	209	286
$\sigma_{\text{ср}}$	-146	-162	-152	-87	-91	-80	-96	-156	-198	226	327	392
N	1	0	0	2	2	3	0	0	0	-	-	-
s	91	95	98	82	92	99	31	28	38	69	65	73
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну</i>												
Σ	216	242	254	280	347	381	112	118	147	221	232	319
$\sigma_{\text{макс}}$	-220	-285	-318	-275	-330	-348	-126	-184	-239	305	394	503
$\sigma_{\text{мин}}$	-4	-43	-64	5	17	33	-14	-66	-92	84	162	184
$\sigma_{\text{ср}}$	-133	-153	-155	-87	-100	-99	-78	-132	-168	204	287	344
N	0	0	0	3	2	2	0	0	0	-	-	-
s	53	62	77	75	92	105	33	37	41	58	75	93
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице</i>												
Σ	243	235	253	246	251	276	93	137	178	201	246	292
$\sigma_{\text{макс}}$	-289	-310	-332	-248	-246	-258	-136	-210	-274	365	422	488
$\sigma_{\text{мин}}$	-46	-75	-79	-2	5	18	-43	-73	-96	164	176	196
$\sigma_{\text{ср}}$	-160	-162	-166	-122	-111	-102	-93	-136	-170	246	298	346
N	0	0	0	0	2	2	0	0	0	-	-	-
s	61	66	75	74	75	84	31	39	96	61	78	96
<i>Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе</i>												
Σ	411	435	474	545	634	657	385	475	519	282	446	535
$\sigma_{\text{макс}}$	312	357	378	343	398	423	-262	-356	-412	511	697	787
$\sigma_{\text{мин}}$	-99	-78	-96	-202	-236	-244	123	119	107	229	251	252
$\sigma_{\text{ср}}$	124	164	190	66	84	102	-118	-175	-215	369	477	543
N	3	3	2	3	3	2	2	2	2	-	-	-
s	124	145	153	151	181	192	116	147	162	79	128	160

= 79 МПа (рис. 5, з). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 446 МПа — от 251 (КТ69) до 697 МПа (КТ77) при $\sigma_{\text{ср}} = 477$ МПа, $s = 128$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 535 МПа — от 252 (КТ69) до 787 МПа (КТ78) при $\sigma_{\text{ср}} = 543$ МПа, $s = 160$ МПа.

Анализ полученных данных показывает, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к однозначному возрастанию σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностных слоях структурных элементов нитридной керамики, причем степень этого влияния существенно зависит от двух факторов. Во-первых, от структурного элемента керамики и, во-вторых, от расположения КТ в его поверхностном слое. В качестве примера на рис. 6 показаны зависимости изменения σ_i в КТ разных поверхностей. Видно, что с увеличением Δ_n с 5 до 15 мкм значения σ_i возрастают в поверхностных слоях: 3 (рис. 6, а) в 1,4, 1,5 и 1,8 раза в КТ7, КТ14 и КТ18 соответственно (расположение этих КТ см. на рис. 1 в статье [22]); МФ3 (рис. 6, б) в 1,4, 1,6 и 2,7 раза в КТ33, КТ36 и КТ42 соответственно; МФМ (рис. 6, в) в 1,2, 1,4 и 1,7 раза в КТ49, КТ47 и КТ43 соответственно; М (рис. 6, з) в 1,1, 1,4 и 1,6 раза в КТ69, КТ72 и КТ78 соответственно.

Приведенные в таблице систематизированные результаты расчетов свидетельствуют о

сложном характере трансформации напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики под действием теплового потока. Последовательно анализируем влияние толщины TiC-покрытия на показатели структурной неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностных слоях разных элементов $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики.

Установлено, что с увеличением Δ_n с 5 до 15 мкм в поверхностных слоях 3, МФ3, МФМ и М максимальные значения σ_{11} увеличиваются в 1,1, 1,4, 1,1 и 1,2 раза; диапазон изменения σ_{11} в 1,1, 1,2, 1,05 и 1,2 раза, среднее значение σ_{11} в 1,05, 1,2, 1,05 и 1,5 раза соответственно и стандартное отклонение в 1,1, 1,5, 1,2 и 1,2 раза соответственно. Также уменьшается число смен знака σ_{11} в поверхностных слоях 3 и М, в поверхностных слоях МФ3 и МФМ этот показатель не изменяется.

С изменением толщины покрытия максимальные значения σ_{22} в поверхностных слоях 3, МФ3, МФМ и М увеличиваются в 1,2, 1,3, 1,05 и 1,2 раза; диапазон изменения в 1,2, 1,4, 1,1 и 1,2 раза и стандартное отклонение в 1,2, 1,4, 1,1 и 1,3 раза соответственно. Среднее значение σ_{22} увеличивается в поверхностных слоях МФ3 и М в 1,1 и 1,5 раза, а в 3 и МФМ уменьшается в 1,1 и 1,2 раза соответственно. Изменение Δ_n приводит

к уменьшению числа смен знака для напряжений σ_{22} в поверхностных слоях МФЗ и М с 3 до 2. В поверхностных слоях З и МФМ с увеличением Δ_n этот показатель возрастает с 2 до 3 и с 0 до 2 соответственно.

С увеличением толщины покрытия максимальные значения σ_{12} в поверхностных слоях З, МФЗ, МФМ и М увеличиваются в 1,7, 1,9, 2,0 и 1,6 раза; диапазон изменения в 1,2, 1,3, 1,9 и 1,3 раза, стандартное отклонение в 1,2, 1,2, 3,0 и 1,4 раза и среднее значение в 2,0, 2,1, 1,8 и 1,8 раза соответственно. Число смен знака напряжений σ_{12} с увеличением Δ_n не изменяется.

С увеличением толщины покрытия максимальные значения σ_i в поверхностных слоях З, МФЗ, МФМ и М увеличиваются в 1,9, 1,6, 1,3 и 1,5 раза; диапазон изменения в 1,4, 1,4, 1,5 и 1,9 раза, стандартное отклонение в 1,1, 1,6, 1,6 и 2,0 раза и среднее значение в 1,7, 1,7, 1,4 и 1,5 раза соответственно.

Библиографический список

1. **Soboyejo, W. O.** Review of high temperature ceramics for aerospace applications / *W. O. Soboyejo, J. D. Obayemi, E. Anpan* [et al.] // *Advanced Materials Research*. — 2016. — Vol. 1132. — P. 385–407.
2. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / *В. В. Кузин, С. И. Досько, В. Ф. Попов* [и др.] // *Вестник машиностроения*. — 2005. — № 9. — С. 46–50.
3. **Kuzin, V. V.** Tooling for high-speed cutting / *V. V. Kuzin, S. I. Dos'ko, V. F. Popov* [et al.] // *Russian Engineering Research*. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.
4. **De, U.** Ferroelectric materials for high temperature piezoelectric applications / *U. De* // *Solid State Phenomena*. — 2015. — Vol. 232. — P. 235–278.
5. **MohdNor, A.** Review on ceramic application in automotive turbocharged engine / *A. MohdNor, M. R. Abbas, S. Rajoo* [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. — 2014. — Vol. 660. — P. 219–228.
6. **Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // *Вестник машиностроения*. — 2004. — № 5. — С. 39–43.
7. **Kuzin, V. V.** Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // *Russian Engineering Research*. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.
8. **Кузин, В. В.** Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / *В. В. Кузин* // *Вестник машиностроения*. — 2004. — № 9. — С. 47–52.
9. **Kuzin, V. V.** Thermal state of ceramic cutting tools in high-speed cutting / *V. V. Kuzin* // *Russian Engineering Research*. — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 32–40.
10. **Кузин, В. В.** Изнашивание режущих пластин из нитридной керамики при обработке отливок из серых чугунов / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров* // *Вестник машиностроения*. — 2013. — № 3. — С. 58–62.
11. **Kuzin, V. V.** Wear of nitride ceramic inserts in machining gray cast iron castings / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov* // *Russian Engineering Research*. — 2013. — Vol. 33, № 6. — P. 343–347.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных численных экспериментов установлено, что изменение толщины TiC-покрытия, нанесенного на керамику системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$, приводит под действием теплового потока к уменьшению ее температуры и увеличению напряжений в поверхностном слое. При увеличении толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм зафиксирована существенная трансформация напряженного состояния поверхностного слоя этой керамики. Выявлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к повышению показателей неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i (исключением являются средние значения σ_{11} и σ_{22} в поверхностных слоях З и МФМ).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

8. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / *В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Фёдоров* // *Трение и износ*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.
9. **Kuzin, V. V.** Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / *V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov* // *J. Friction and Wear*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 199–203.
9. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // *Трение и износ*. — 2014. — № 6. — С. 728–734.
10. **Kuzin, V. V.** The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 1. Macrolevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova* // *J. Friction and Wear*. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.
10. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров* // *Трение и износ*. — 2015. — № 1. — С. 50–55.
11. **Kuzin, V. V.** Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. Yu. Fedorov* // *Journal of Friction and Wear*. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.
11. **Kim, D.W.** TiC and TiN coatings formed on $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ composite ceramics by chemical vapour deposition / *D. W. Kim, Y. J. Park, J. G. Lee, J. S. Chun* // *Thin Solid Films*. — 1988. — Vol. 165, № 1. — P. 149–161.
12. **Almeida, F. A.** MPCVD diamond coating of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiN}$ electroconductive composite substrates / *F. A. Almeida, M. Belmonte, A. J. S. Fernandes* [et al.] // *Diamond and Related Materials*. — 2007. — Vol. 16, № 4–7. — P. 978–982.
13. **Григорьев, С. Н.** Инженерия поверхности металлорежущего инструмента методом комбинированной вакуумно-плазменной обработки. Часть 1 / *С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // *Ремонт, восстановление, модернизация*. — 2004. — № 7. — С. 2–6.
14. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated Si_3N_4 ceramic tools in turning grey cast iron / *V. Kuzin*,

S. Grigoriev // Key Engineering Materials. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.

15. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, D. Batako // Proceedings of the 37th International Conference MATADOR, 2012. — 2013. — P. 181–184.

16. **Kuzin, V.** Applications of multi-level method of stress-strain state analysis in ceramic tools design / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 173–176.

17. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.

18. **Григорьев, С. Н.** Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с покрытием / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.

Grigoriev, S. N. Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

19. **Григорьев, С. Н.** Влияние свойств керамики на напряженно-деформированное состояние режущей пластины в условиях установившейся теплопроводности / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 4. — С. 76–80.

Grigoriev, S. N. Influence of ceramic properties on the stress-strain state of a plate in steady heat conduction / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, D. Burton [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012, — Vol. 32, № 4. — P. 374–379.

20. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н.

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

Kuzin, V. V. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

21. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / M. A. Volosova, S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

22. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — действует сосредоточенная силовая нагрузка / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 8. — С. 59–65.

23. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — действует распределенная силовая нагрузка / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 58–63.

24. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 19.09.16

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

15-Й ВСЕМИРНЫЙ КОНГРЕСС

26–29 сентября 2017 г.

г. Сантьяго, Чили

И ОБЪЕДИНЕННАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОГНЕУПОРАМ



ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

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

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

<http://unitecr2017.org>

Е. З. Коварская¹, д. т. н. И. Б. Московенко¹ (✉), д. т. н. А. И. Потапов²¹ ООО «ЗВУК», Санкт-Петербург, Россия² ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.76.017:620.179.1

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОСВОЕНИЮ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложен проект целевой научно-технической программы использования неразрушающих методов контроля качества и физико-механических характеристик изделий из углеродных материалов. Приведено обоснование возможности и целесообразности проведения таких работ на основании анализа ранее выполненных работ в области неразрушающего контроля качества углеродных изделий, используемых при производстве алюминия, и аналогичных по технологии изготовления абразивных изделий.

Ключевые слова: углеродные материалы, неразрушающий контроль, физико-механические свойства, акустические методы контроля, частоты собственных колебаний.

Современный уровень технологии изготовления изделий из углеродных материалов, используемых в первую очередь в металлургии, предусматривает необходимость контроля их физико-механических свойств, осуществляемого, как правило, разрушающими методами на образцах, которые вырезают из изделий, отобранных из технологических партий, подлежащих контролю. Выборка в таком случае должна проводиться в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к статистической обработке результатов измерений. В условиях действующего производства углеродных изделий осуществление подобной репрезентативной выборки практически не представляется возможным. Повышение надежности контроля в таких условиях производства может быть достигнуто при использовании методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих, с одной стороны, обеспечить возможность определения физико-механических свойств реальных изделий без их разрушения и, с другой стороны, существенно повысить надежность и производительность контроля.

В результате совместной работы Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ВАМИ) и Всесоюзного

научно-исследовательского института абразивов и шлифования (ВНИИАШ), выполненной в 1985–1988 гг., была показана возможность и целесообразность использования акустических методов контроля, основанных на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) изделий, для оценки физико-механических свойств подовых блоков и обожженных анодов электролизеров, используемых при производстве алюминия [1–3]. В соответствии с рекомендациями ВАМИ на Новосибирском электродном заводе был освоен выпуск подовых блоков с нормированными показателями физико-механических свойств в соответствии со специально разработанными ТУ 48-4804-27-91, предусматривающими маркировку на блоках результатов акустического контроля в виде так называемых звуковых индексов (ЗИ). Такие блоки по запросу заводов, производящих алюминий, поставлялись по несколько повышенной цене, и результаты акустического контроля, замаркированные на блоках, учитывались при подборе комплектов, используемых для монтажа электролизеров. В дальнейшем по причинам в основном организационного характера эти работы применительно к контролю подобных углеродных изделий были практически прекращены. Однако применительно к другим видам изделий, в первую очередь различного рода абразивным инструментам, эти работы продолжались, и в 2007 г. был разработан и введен в действие ГОСТ Р 52710-2007 «Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн», в соответствии с которым в настоящее время



И. Б. Московенко
E-mail: info@ndtest.ru

производится подобный контроль на ряде фирм — производителей и потребителей абразивной продукции. Этот стандарт может быть положен в основу нормативно-технической документации или стандарта, обеспечивающих возможность аналогичного акустического контроля углеродной продукции. За прошедшее время сменилось по крайней мере два поколения приборов типа «Звук». Выпускаемые ООО «ЗВУК» приборы «Звук-203М» и «Звук-130» прошли государственные испытания, сертифицированы, включены в Государственный реестр средств измерений, достаточно широко используются в нашей стране и поставляются на экспорт в развитые зарубежные страны.

В настоящее время в алюминиевой промышленности вместо маркировки на блоках результатов акустического контроля реализованы несколько иные принципы комплектации. В частности, с 2014–2015 гг. на алюминиевых заводах начаты работы по комплектации подиновыми блоками с близкими характеристиками. В качестве базовых параметров катодных блоков используют величину удельного электросопротивления (УЭС) и механическую прочность при сжатии. Оценку показателей производят на основании результатов измерений на отобранных от обожженных заготовок образцах, а также по результатам измерения УЭС товарных катодных блоков. С учетом градаций величин УЭС и механической прочности сформулированы требования к комплектам подовых блоков. На основании сформулированных требований изготовителем формируются комплекты с близкими электрическими и прочностными свойствами, которые затем отгружают на алюминиевые заводы для проведения капитального ремонта. Данные требования юридически закреплены, т. е. вносятся в контракты на поставку продукции. При этом (по крайней мере, взамен определения механической прочности на образцах) более экономично и эффективно, по нашему мнению, может быть использован метод, основанный на измерении ЧСК.

Кроме того, принимая во внимание, что работоспособность углеродных изделий в значительной степени определяется их пористостью [2], которая, в свою очередь, существенно определяет результаты интегрального акустического контроля, основанного на измерении ЧСК, результаты акустического контроля, выраженные в звуковых индексах ЗИ, могут быть достаточно эффективно использованы при прогнозировании работоспособности углеродных изделий различных производителей.

Также было показано [4], что акустический метод контроля с использованием приборов «Звук» может быть успешно применен для получения оперативной информации о физико-механических свойствах как обожженных

анодов, так и необожженных («зеленых») углеродных изделий, что может быть использовано для контроля за соблюдением и стабильностью технологического процесса их производства.

Результаты, накопленные в ходе испытаний и многолетнего использования НК для определения физико-механических свойств и качества, в первую очередь абразивных и огнеупорных, а также других видов изделий в условиях их производства и эксплуатации [3–10], по нашему мнению, позволяют приступить к более широкому освоению НК углеродных изделий различных типоразмеров и назначения.

Расширение областей применения НК углеродных изделий целесообразно проводить в рамках целевой научно-технической программы, разработанной и согласованной с изготовителями и потребителями соответствующей углеродной продукции. Специалистами кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный» и ООО «ЗВУК» подготовлен с использованием ранее разработанных рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров [11] проект программы «Неразрушающий контроль качества и диагностика изделий из углеродных материалов», в котором приведены обоснование целесообразности постановки подобной работы и основные этапы ее выполнения. Паспорт указанной программы приведен в таблице.

Обоснованием необходимости реализации программы «Неразрушающий контроль качества и диагностика изделий из углеродных материалов» является широкое применение в различных отраслях промышленности, особенно в металлургии, авиакосмической технике и на транспорте, таких углеродных материалов, как углеграфитовые материалы и их компоненты, пиролитические, углеволокнистые, полимерные композиционные, углерод-углеродные, тонкопленочные алмазоподобные, наноструктурные и другие разновидности этих материалов

Проблема контроля качества изделий из углеродных материалов весьма актуальна, так как техническое состояние данных изделий (тиглей, катодных блоков, анодов электролизеров, деталей авиакосмической техники, тормозных колодок на транспорте и др.) определяет их производительность, срок службы, качество выпускаемой продукции и т. д. Наиболее эффективны для решения этой проблемы неразрушающие физические методы контроля, которые широко применяются для контроля качества изделий из металлов. Применение данных методов для углеродных материалов и изделий представляет определенные трудности, так как углеродные материалы по физическим свойствам существенно отличаются от металлов, а также вследствие

Паспорт целевой научно-технической программы «Не разрушающий контроль качества и диагностика изделий из углеродных материалов»

Наименование Программы	Целевая научно-техническая программа «Не разрушающий контроль качества и диагностика изделий из углеродных материалов»
Дата принятия решения о разработке Программы, дата ее утверждения (наименование и номер соответствующего нормативного акта)	–
Заказчик Программы	Министерство образования и науки, Министерство промышленности и торговли
Основные разработчики Программы	Научно-исследовательские, научно-производственные организации и высшие учебные заведения РФ
Цели и задачи Программы, важнейшие целевые показатели	Обеспечение металлургической, авиакосмической и других отраслей промышленности современными научно-техническими разработками, выполненными в НИИ, КБ и вузах для реализации стратегии повышения качества и конкурентоспособности; привлечения инвестиций в научно-техническую сферу; создания научно обоснованных систем, приборов и методов контроля качества и диагностики углеродных материалов и изделий, паспортизации эксплуатируемых изделий из углеродных материалов, снижения уровня аварий, обеспечения информацией о текущих и прогнозируемых изменениях технического состояния изделий из углеродных материалов, создания научно-технической и нормативно-правовой базы по эффективному использованию потенциала науки в интересах металлургической и других отраслей промышленности
Сроки реализации Программы	2016–2018 гг.
Перечень подпрограмм и основных мероприятий	Создание методов и средств неразрушающего контроля качества и диагностики изделий из углеродных материалов; разработку методов и средств неразрушающего контроля сырья, полуфабрикатов и технологических процессов изготовления изделий из углеродных материалов; разработка методов и средств технического обследования и паспортизации изделий из углеродных материалов с применением неразрушающего контроля; организация подготовки, повышения квалификации и переподготовки специалистов в области неразрушающего контроля качества углеродных материалов и изделий на их основе
Объемы и источники финансирования	Для реализации Программы в 2016–2018 гг. потребуется 98 млн руб., в том числе из: - федерального бюджета 50 млн руб.; - внебюджетных источников 48 млн руб.
Ожидаемые конечные результаты реализации Программы	Научно обоснованные методики и сертифицированные приборы неразрушающего контроля физико-механических, структурных и геометрических параметров углеродных материалов и изделий. Нормативные документы по неразрушающему контролю углеродных материалов и изделий. Учебно-методические комплексы и пособия по неразрушающему контролю качества изделий из углеродных материалов для курсов повышения квалификации и переподготовки специалистов. Увеличение срока эксплуатации изделий из углеродных материалов, сокращение затрат на обследование, ремонт, улучшение и совершенствование эксплуатации изделий из углеродных материалов; создание новых рабочих мест. В результате реализации Программы должно быть обеспечено создание на базе отечественных разработок принципиально новых техники, технологий, материалов, решены крупные научно-технические проблемы, а также проведены исследования по новым перспективным направлениям развития науки и техники, что позволит создать научный и технический задел
Система контроля за исполнением Программы	Контроль за исполнением Программы осуществляет научный совет по подпрограммам. Промежуточные и окончательные итоги работ по Программе систематически рассматриваются на заседаниях научных советов по подпрограммам с привлечением научной общественности и экспертов

большого разнообразия видов углеродных материалов, которые, как правило, являются неоднородными и анизотропными, особенно армированные. Поэтому для реализации неразрушающих методов контроля качества изделий из углеродных материалов необходимо разработать комплекс методов, включающий акустические методы (метод собственных колебаний,

акустико-эмиссионный, низкочастотный эхоимпульсный и др.), радиоволновые (резонаторный, фазовый, свободного пространства и др.), для электропроводящих углеродных материалов — вихретоковый, электрический (емкостной, кондуктометрический, термоЭДС) и др.

Реализация программы «Не разрушающий контроль качества и диагностика изделий из

углеродных материалов» позволит в металлургической и других отраслях промышленности создать научно обоснованную систему неразрушающего контроля качества и технической диагностики изделий из углеродных материалов, оценки и учета их, управления состоянием и эксплуатацией изделий из углеродных материалов, более объективно оценивать степень их износа и более правильно назначать сроки ремонтно-восстановительных работ, получать уникальные результаты, не имеющие аналогов в отечественной и мировой науке. Метрологическое обеспечение средств неразрушающего контроля, разработка эталонов и поверочных средств позволит существенно повысить достоверность и точность неразрушающего контроля физико-механических и электрофизических характеристик углеродных материалов непосредственно в изделии. Учитывая уникальность применяемых неразрушающих методов и средств контроля и диагностики, все работы по обследованию изделий из углеродных материалов проводятся без прекращения их эксплуатации.

Основные результаты Программы нацелены на создание научно обоснованных принципов ремонтно-восстановительных работ, увеличение срока эксплуатации изделий из углеродных материалов, сокращение затрат на обследование, ремонт и восстановление, улучшение и совершенствование эксплуатации изделий из углеродных материалов, снижение уровня аварийной опасности, создание новых рабочих мест. В результате реализации Программы должно быть обеспечено создание принципиально новой техники, технологий, материалов, решены крупные научно-технические проблемы, а также проведены исследования по новым перспективным направлениям развития науки и техники, что позволит создать научный и технический задел для реализации полученных результатов в других направлениях металлургической и других отраслях народного хозяйства. Результаты реализации Программы могут служить моделью для других отраслей народного хозяйства.

Осуществление Программы приведет к увеличению срока эксплуатации изделий из углеродных материалов; сокращению затрат на обследование, ремонт, улучшение и совершенствование эксплуатации изделий из углеродных материалов; созданию новых рабочих мест.

Целями Программы являются обеспечение металлургических, авиакосмических и других предприятий современными научно-техническими разработками, выполненными в НИИ, КБ и вузах для реализации стратегии развития, повышения качества и конкурентоспособности металлургических предприятий, привлечение инвестиций в научно-техническую сферу; создание научно обоснованной системы

паспортизации изделий из углеродных материалов; сохранение и создание новых рабочих мест; сокращение технических и экологических аварий и катастроф; обеспечение информацией о текущих и прогнозируемых изменениях технического состояния изделий из углеродных материалов, создание баз данных о техническом состоянии изделий из углеродных материалов; создание научно-технической и нормативно-правовой базы по эффективному использованию потенциала науки в интересах металлургических и других предприятий, увеличение вклада науки и техники в развитие экономики и реализацию важнейших производственных и социальных задач металлургических и других предприятий, получение новых знаний в области фундаментальной и прикладной науки, решение актуальных научно-технических проблем, создание образцов конкурентоспособной техники, технологий, материалов, обеспечивающих общий подъем уровня знаний и практическую реализацию качественно новых научных идей, сохранение ведущих школ и коллективов, развитие научно-технического и экспортного потенциала России, формирование рынка научно-технической продукции.

При определении целей и задач подпрограмм должны учитываться перспективные потребности отдельных металлургических предприятий и других отраслей экономики в принципиально новых технических решениях для качественного изменения параметров производства и выпускаемой продукции.

Предлагаемый проект программы разработан с целью продвижения инноваций, которые обеспечили бы достижение экономического прогресса металлургических и других предприятий.

В Программу должны войти разработки, которые имеют высокую степень завершенности и финансирование которых в настоящее время продолжает осуществляться государственными или другими заинтересованными организациями. Из бюджета Программы предполагается лишь частичное дополнительное финансирование, необходимое для практической реализации или адаптации разработок в интересах металлургических и других предприятий.

Кроме прямого эффекта в сфере приложения результатов разработок на предприятиях металлургической и других отраслей, их участие в работе обеспечивает им право на соответствующую долю прибыли в случае коммерческой реализации проектов в других регионах или за рубежом.

В результате реализации Программы должно быть обеспечено создание принципиально новой техники, технологий, материалов, решены крупные научно-технические проблемы, а также проведены исследования по новым пер-

спективным направлениям развития науки и техники, что позволит создать научный и технический задел для их реализации в других направлениях отраслей экономики.

Библиографический список

1. **Герашенко, Н. П.** Результаты освоения в условиях производства неразрушающего акустического метода контроля углеродных изделий для алюминиевых электролизеров / Н. П. Герашенко, А. Ф. Гребенкин, В. И. Заливной [и др.] // Пути ускорения научно-технического прогресса производства углеродной продукции в свете решений XXVII съезда КПСС : тезисы докл. и сообщ. VI Всесоюз. науч.-техн. конф., г. Челябинск, октябрь 1988. — С. 58–60.
2. **Гребенкин, А. Ф.** Исследование физико-механических свойств углеродных блоков различных изготовителей с помощью акустического метода / А. Ф. Гребенкин, В. А. Крюковский, И. Б. Московенко // Решение экологических проблем в производстве алюминия : сб. науч. тр. — Л. : ВАМИ, 1990. — С. 62–72.
3. **Гребенкин, А. Ф.** Акустический метод неразрушающего контроля качества углеродных изделий / А. Ф. Гребенкин, И. Б. Московенко // Заводская лаборатория. — 1992. — Т. 58, № 2. — С. 23–25.
4. **Grebjonkin, A. F.** Zerstörungsfreie akustische Materialprüfung an Kohlenstoffanoden / A. F. Grebjonkin, W. A. Krjukowski, V. A. Glagowski [et al.] // Aluminium-66, Jahrgang. — 1990. — № 9. — S. 854–857.
5. **Чернявец, А. Н.** Акустический неразрушающий метод контроля качества углеродных тиглей для плавки металла / А. Н. Чернявец, И. Б. Московенко, Е. З. Коварская // Цветные металлы. — 1997. — № 3. — С. 77–79.
6. **Московенко, И. Б.** Акустический метод контроля углеродных изделий в процессе их производства и эксплуатации / И. Б. Московенко, Е. З. Коварская, А. Н. Чернявец // В мире неразрушающего контроля. — 2005. — №2 (28). — С. 12–14.
7. **Московенко, И. Б.** Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий / И. Б. Московенко, Е. З. Коварская // В мире неразрушающего контроля. — 2012. — № 4 (58). — С. 5–8.
8. **Носов, В. В.** Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В. В. Носов, А. И. Потапов, И. Н. Бураков // Дефектоскопия. — 2009. — № 2. — С. 47–57.
9. **Потапов, А. И.** Выявление расслоений и глубины их залегания в углепластиковых конструкциях с использованием вихретокового вида НК / А. И. Потапов, В. А. Сясько, Д. Н. Чертов // Изв. вузов. Машиностроение. — 2012. — № 8. — С. 66–69.
10. **Потапов, А. И.** Измерение толщины изделий из углеродных композиционных материалов с использованием вихретокового двухчастотного амплитудно-фазового метода / А. И. Потапов, В. А. Сясько, Д. Н. Чертов // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 4 (178). — С. 12–18.
11. **Московенко, И. Б.** Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров / И. Б. Московенко, Е. З. Коварская, А. И. Потапов // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 64–67. ■

Получено 13.07.16

© Е. З. Коварская, И. Б. Московенко,
А. И. Потапов, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

 <p>European Metallurgical Conference EMC 2017 June 25 - 28, 2017, Leipzig, Germany</p>	<p style="text-align: right;">9-я Европейская конференция металлургов</p> <p style="text-align: center;">25–28 июня 2017 г. г. Лейпциг, Германия</p> <p style="text-align: right;">www.emc.gdmb.de</p>
<p style="text-align: center;">Production and Recycling of Non-Ferrous Metals: Saving Resources for a Sustainable Future</p>  <p style="text-align: center;">GDMB</p>	

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

- Журнал приветствует, если авторы, в тех случаях, когда это возможно и применимо, помещают данные, подтверждающие результаты их исследований, на общедоступных ресурсах (репозиториях). Авторам и редакторам, которые не располагают предпочитаемыми репозиториями, рекомендуется ознакомиться со списком таких ресурсов, представленным издательством Springer Nature, а также с политикой издательства в отношении исследовательских данных.

- Список ресурсов

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

- Политика в отношении исследовательских данных

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

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

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

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

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

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

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. 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 present 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 format TIF (tone images — 300 dpi, stroke images — 600 dpi), JPEG, EPS. Images (with the exception of Exel diagrams), introduced into files of format DOC are not accepted as originals because they don't ensure the required standard polygraphic quality.
- Providing the article to Editorial office the authors thereby convey the copyright of publication to the publisher. The authors get either one copy of the article in format PDF. It 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 format PDF.

- The journal encourages authors, where possible and applicable, to deposit data that support the findings of their research in a public repository. Authors and editors who do not have a preferred repository should consult Springer Nature's list of repositories and research data policy.

• List of Repositories

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

• Research Data Policy

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

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

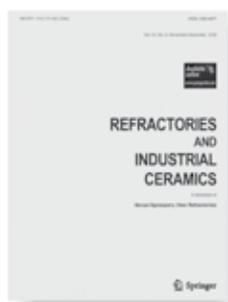
Datasets that are assigned digital object identifiers (DOIs) by a data repository may be cited in the reference list. Data citations should include the minimum information recommended by DataCite: authors, title, publisher (repository name), identifier.

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

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

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

ВНИМАНИЕ!



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

Содержание журнала «Refractories and Industrial Ceramics» с указанием авторов, названия ст



БЕРЕМСЯ ЗА НОВОЕ И ВЫИГРЫВАЕМ

*Беседа с ученым**

Этот год для участка по производству кварцевой керамики первого цеха юбилейный. Тридцать лет назад на динасовом заводе начали выпускать продукцию по технологии, основателем которой стал Ю. Е. ПИВИНСКИЙ. На прошлой неделе Юрий Ефимович приезжал на «ДИНУР», и мы, конечно же, не могли не расспросить академика Российской академии инженерных наук о целях его очередного визита, впечатлениях и предновогоднем настроении.

— В этом году — не один, а два юбилея, — сказал Юрий Ефимович. — Тридцать лет кварцевой керамике и двадцать — как мы получили первые изделия на бокситовых керамобетонах. Без излишней скромности можно сказать, что внедрение этих технологий в свое время стало революционным шагом в огнеупорной отрасли.

— Несмотря на то, что «ваше детище» успешно работает, вы не останавливаетесь на достигнутом. Вносите новые предложения, изменения, совершенствуя технологию, повышая качество продукции. Юрий Ефимович, какие идеи сегодня претворяете в практику?

— Вместе с коллегой, научным сотрудником Санкт-Петербургского технологического университета Павлом Васильевичем Дякиным работаем над совершенствованием производства желобных масс в плане улучшения качества, а значит — их конкурентоспособности.

— Находясь на участке и рассматривая вместе с Павлом Васильевичем Дякиным изготавливаемые на керамике мелкоштучные изделия, вы сказали, что сейчас находитесь в большом эксперименте. Что вы, Юрий Ефимович, имели в виду?

— Эксперимент заключается в том, как без дополнительных затрат, несколько усовершенствовав состав, изменив соотношение компонентов, параметры суспензии, повысить стойкость желобных масс. Опытные образцы сделаны. То, что получено лабораторным путем, дало ожидаемые показатели. И если данные испытаний в печи будут положительными, то изменения введем в технологический процесс. Всю нашу «кухню» раскрывать не стану, скажу только, что стараемся использовать в этой работе фракции неликвидного корунда, который остается при производстве порошков для абразивной промышленности. Такая утилизация поможет из-

бавиться от неликвидного материала, который будет успешно использоваться как компонент в желобных массах.

Топтаться на месте нельзя, мол, создали технологию и почищаем на лаврах. Тут же обойдут, обгонят, оставят на задворках рынка. Далеко за примерами ходить не надо. Знаете, почему на Подольском заводе погибло производство кварцевой керамики? Там до самого конца формовали изделия в гипсовых формах. Очень неэффективно, затратно. На «ДИНУРЕ» оперативно внедрились центробежное формование и выиграли. В разы выросла производительность за счет сокращения времени формования каждого изделия и многолетней неизнашиваемости форм. Первоуральский динасовый всегда смело берется за все новое и выигрывает.

— Если сравнивать продукцию из кварцевой керамики, допустим, двадцатилетней давности и нынешнюю, то она отличается, наверное, как небо и земля?



* По материалам газеты «Огнеупорщик» № 49 за 2016 г.



— Конечно. Мы на месте не стояли. Благодаря высоким служебным характеристикам этих изделий, которых удалось добиться, трубы, стаканы, мелкоштучная продукция, производимые на участке кварцевой керамики, по-прежнему пользуются большим спросом у металлургов. Я поинтересовался у заместителя начальника первого цеха Николая Викторовича Гусева цифрами о реализации продукции участка, ее рентабельностью и долей в заводской прибыли. Знаете, получил полное удовлетворение. Кварцевая керамика живет, у нее хорошее будущее. Для потребителей она надежна в эксплуатации, для производителя — проста в технологии и прибыльна.



Юрий Ефимович улетел домой, в Санкт-Петербург. В завершение нашей беседы он передал самые искренние поздравления коллективу огнеупорщиков с наступающим Новым годом, сказав буквально следующее: «Мне всегда приятно бывать на «ДИНУРЕ». Здесь трудится замечательный коллектив, возглавляемый командой профессионалов. Несмотря на все сложности, которые сегодня переживает экономика страны, вы остаетесь на плаву и успешно работаете, содержите свою социальную базу. Добра всем, дальнейших успехов!»

Алла ПОТАПОВА
Фото Никиты СТАРКОВА



ABSTRACTS

UDC 666.762.11:66.041.55

The lining of the small capacity tunnel type kiln with the high alumina-silicate fiber refractories

Zubashchenko R. V. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 3–5.

The structure and properties are presented for the developed high alumina refractory products based on the alumina-silicate fiber. The data on the industrial application of these refractory products in the small capacity tunnel type kiln's working lining is shown in the article. Ill. 2. Ref. 8.

Key words: tunnel type kiln, lining, heat insulating products, fiber materials, sintering kinetics, refractories.

UDC 621.867.3

Dynamic response definition of the bucket hinge for the high-angle bucket conveyor

Davydov S. Ya., Zolkin A. P., Shvarev V. S., Zolkina L. A. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 6–11.

The new version is proposed for the high-angle belt bucket conveyor without conveyor belt slips relatively to the drum shells. The buckets' characteristic vibrations were measured in the course of motion taking into account the total hardness of the two combined belts and of the plates lodged between them. The conveyors belt's resonant speed was defined. The dynamic response factor was determined. Ill. 8. Ref. 9.

Key words: high-angle belt conveyor, buckets, pulling ability, hardness, plate, oscillation frequency, resonant speed, flexible conveyors runs, combined belts.

UDC 621.867

The upgrading of the tubular scraper conveyor junction points

Bespalkov A. A., Lukashuk O. A., Kozhushko G. G. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 12–14.

The ways of problems solution are presented which arise during the operation of the tubular scraper conveyors intended for the bulk and small pieces abrasive materials transportation. The problems which arise mostly often are: the pulling chain seizure in the loaded turnable section, the pipes and scrapers wear and tear, the penetration of the conveyed materials into the take-up when the conveyor reversing, the elevated level of noise. Ill. 3. Ref. 2.

Key words: tubular scraped conveyor, bulk materials transportation, upgrading, antifriction materials.

UDC 666.1.031

Generalized analysis of the glass-melting furnaces thermal performance

Dzyuzer V. Ya. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 15–18.

The new approach is proposed in the article to the analyses of the glass-melting furnaces thermal performance. The generalized heat balance equation was obtained for the glass-melting furnace within the boundaries of the chimney–molten glass channels. The temperature boundary conditions were formulated for the mediums which heat contents define the expensive items of the heat balance. It was shown how the specific heat rate per 1 kg of melting glass influences the percentage composition of the generalized heat balance expense items. The calculation

of the heat balance was carried out for the melting zone of the container glass furnace with a capacity of 320 tons per day under the specific heat consumption 1000 large calories per 1 kg. Ill. 2. Ref. 7. Tab. 2.

Key words: glass-melting furnace, heat balance, energy efficiency, temperature, lining.

UDC 666.7; 66.041.3-65:691.365

Energy efficient electric kiln with a mobile bottom platform for vermiculite firing

Nizhegorodov A. I. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 19–24.

A new concept is regarded for the power-engineering units — electric kilns with mobile bottom platform which are intended for the vermiculite concentrate firing and for thermally-activation of other minerals. The reasoned statements are given that the new concept provides the high energy efficiency. The prediction is given for the energy cost reduction up till 40 MJ/m³ under the vermiculite firing. Ill. 6. Ref. 12.

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

UDC 666.3/7:539.2/6

Strengthening binders for the porous permeable ceramics with the electro-fused corundum aggregate

Belyakov A. V., U Zo. E. Mo., Popova N. A., Min Y. A., Karimova V. A. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 25–29.

The strengthened porous ceramics was investigated in the article which had been obtained by the grain composition mix design using the electro-fused corundum aggregates: F600 (particle size is 100–200 micron); F360 (40–60 micron) and F120 (10–20 micron). In the capacity of strengthening binders the highly dispersed corundum powders (about 2 micron) doped with 0,25 wt. % of MgO; and the mixture of SiC powder (3–4 micron) and of MgO powder (1–2 micron) in the ratio of 1:2 were used. The test-beams of the size 60×15×5,5 mm were obtained by means of uniaxial semi-dry compacting under the pressure of 50 MPa (for mono-fractional compositions) and of 25 MPa (for three-fractional compositions). The samples were burnt on the air at the temperatures from 1350 to 1550 °C. The open porosity varied from 28 to 43 %, the ultimate bending strength varied from 1 to 36 MPa. The highest strength was attained when the SiC–MgO binder was used (5 wt. % of the binder over 100 % of the aggregate, the ultimate bending strength was 36 MPa, the open porosity was 30 %). Ref. 12. Tab. 5.

Key words: strengthened porous ceramics, electro-fused corundum, open porosity, aggregates.

UDC 666.762.81:621.3.035.2

Thermal conductivity level improving for carbon-carbon composite materials

Kolesnikov S. A., Bamborin M. Yu., Vorontsov V. A., Protsenko A. K., Cheblakova E. G. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 30–38.

The carbon materials' thermal conductivity is the important factor supporting their resistance against the thermal shock. In the article the influence is regarded of the

operational characteristics on the heat conductivity values reproduction when the three-dimensional reinforced high-density carbon-carbon composite billets producing. More than 82 % of all billets had the average value of heat conductivity between 46 and 56 W/(m·K). The amount of all billets between 4,6 and 12,5 % had the values of heat conductivity between 44 and 70 W/(m·K). It was established that the treatment temperature's elevation from 1600 to 2400 °C can result in the heat conductivity rising by 0,21 W/(m·K) per each 100 °C. The difference in the frame structure can lead to the average heat conductivity's variation within 3 W/(m·K). The variation of the apparent density level between 1,89 and 1,98 g/cm³ makes the heat conductivity change by 1,1 W/(m·K) per each 0,01 g/cm³ increment. The connection was found between the carbon-carbon's electric conductivity ρ and heat conductivity λ which shape corresponds to the Wiedemann – Frantz relation $\lambda \cdot \rho = \text{const}$. Ill. 4. Ref. 18. Tab. 1.

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

UDC 666.762.1.017:620.181.428.4

The investigation of shaped and non-shaped refractories formation on base of high-alumina HCBS. Part 9. Preparation and properties of the mixed HCBS consisting of fused bauxite-corundum, quartz glass, reactive alumina. Dilatometric investigation of the materials on its base

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 39–45.

The wet co-milling method was used to prepare the composite highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS) containing 89 % of the fused bauxite-corundum (base material) and 11 % of highly dispersed fused quartz. On base of this HCBS the samples with the elevated Al₂O₃ contents were obtained at the expense of the inserted 10–30 % reactive alumina. The dilatometric investigations were carried out which allowed to determine four characteristics time intervals for the materials of all composition under the non-isothermal heating: the regular thermal expansion (up till 900 °C), the sintering or shrinkage process (900–1300 °C), the mullitization or growth (1300–1450 °C) and the sintering (shrinkage) of the millitized material (1450–1500 °C). Ill. 6. Ref. 16.

Key words: HCBS, Guyanese bauxite, corundum, fused quarts, bauxite-corundum, non-isothermal heating, shrinkage, growth, thermal expansion.

UDC 666.762.1: 666.792.32

The investigation of the artificial ceramic mullite-silicon-carbide binders and of the composites on their base

Zaitsev S. V., Doroganov V. A., Doroganov E. A., Evtushenko E. I. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 46–49.

The synthesis was investigated of the artificial ceramic mullite-silicon-carbide binders and of the composite materials on their base. The rheological, physical and mechanical properties of the binders were studied. The regularities of the composites' compressing depending on the formation condition and on the initial materials type were established. The possibility was demonstrated of the artificial ceramic

binder's application for the high-density high performance ceramic composite production. Ill. 5. Ref. 12. Tab. 2.

Key words: silicon carbide, artificial ceramic binders, composites, high-alumina chamotte.

UDC 546.26.-162; 541.66

Thermal-physical properties of the carbon-carbon materials on base of graphite foam

Manylov M. S., Filimonov S. V., Shornikova O. N., Malakho A. P., Avdeev V. V. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 50–53.

By means of the one-dimensional graphite foam compacting with subsequent both the impregnation with the acetone solution of the propargyl novolac resin and the carbonization, the low density heat conducting carbon-carbon materials containing from 28 to 49 wt. % of the coke and whose density varied from 0,065 to 0,081 g/cm³ were prepared. It was shown that the mechanical strength of the samples obtained grow proportionally to their coke contents within 17 and 40 wt. %, the heat conductivity being almost constant within 2,5–3,2 W/(m·K). Ill. 1. Ref. 10.

Key words: graphite foam, carbonization, carbon-carbon composite, heat-conducting materials.

UDC 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

The nitride ceramics surface layer stress state transformation under the variation of the TiC-coating thickness. The applied load is the heat current

Kuzin V. V., Fedorov M. Yu. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 54–60.

The influence of the TiC-coating's thickness on the surface layer stress state transformation is investigated in the article for the Si₃N₄-TiC-Y₂O₃-ceramics under the heat current action. The numerical experiment allowed to establish that the increasing of the Si₃N₄-TiC-Y₂O₃-ceramics TiC-coating thickness within 5–15 micron gives the decreasing of the ceramics temperature, and the raising of both the σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , σ_i values and their structural heterogeneity in the surface ceramics layer. Ill. 6. Ref. 24. Tab. 1.

Key words: nitride ceramics, coating, stress state's structural heterogeneity, heat current, surface layer.

UDC 666.76.017:620.179.1

Recommendations development on the mastering of the non-destructive testing for the carbonaceous productions' quality and physical and mechanical properties

Kovarskaya E. Z., Moskovenko I. B., Potapov A. I. // *New Refractories*. — 2017. — No 2. — P. 61–65.

The project is proposed for the special-purpose program which should use the non-destructive methods for testing the quality and the physical and mechanical characteristics of the carbonaceous products. The justification of the possibility and applicability of such methods was given on base of the analysis of the previously performed works on the non-destructive testing of carbonaceous products used in aluminum production, and on the abrasive products manufacturing which were similar in technology. Ref. 11. Tab. 1.

Key words: carbonaceous materials, non-destructive testing, physical and mechanical properties, acoustic testing methods, natural oscillation frequency.



05-08 ИЮНЯ
МОСКВА
РОССИЯ **2017**

Место проведения:
 **ЭКСПОЦЕНТР**
МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНГРЕССЫ
МОСКВА

ЛИТМАШ

Международная выставка литейных технологий, материалов и продукции

МЕТАЛЛУРГИЯ

Международная выставка металлургических технологий, процессов и металлопродукции

NI
в мире



При поддержке
The Bright World of Metals

www.metallurgy-russia.ru
www.litmash-russia.ru

Металл-Экспо
Тел.: +7 (495) 734-99-66

Messe Düsseldorf GmbH
Тел.: +49 (0) 2 11/45 60-77 93





МИР СТЕКЛА

Производство
Архитектура
Декор

05–08.06.2017

ЭКСПОЦЕНТР



Организаторы:

- АО «Экспоцентр»
- Национальный Объединенный Совет предприятий стекольной промышленности «СтеклоСоюз»

При поддержке Министерства промышленности и торговли РФ

Под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ



12+

Реклама



19-я международная
выставка
стеклопродукции,
технологий
и оборудования
для изготовления
и обработки стекла

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.mirstekla-expo.ru