



НОВЫЕ

ISSN 1683-4518

ОГНЕУПОРЫ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

*С Новым
Годом!*

12

ДЕКАБРЬ 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

БЕЛЯКОВ А. В.	ПЕРЕПЕЛИЦЫН В. А.	ANEZIRIS CHRISTOS G. (ГЕРМАНИЯ)
БОРЗОВ Д. Н.	ПИВИНСКИЙ Ю. Е.	ANTONOVICH VALENTIN (ЛИТВА)
ВЕРЕЩАГИН В. И.	СОКОВ В. Н.	EMAD M. M. EWAIS (ЕГИПЕТ)
ВОРОНИНА О. Б.	СОКОЛОВ В. А.	GARTEN VICTORIA (ГЕРМАНИЯ)
ГОРБАНЕНКО В. М.	СОСКОВЕЦ О. Н.	JACEK SZCZERBA (ПОЛЬША)
ГОРОХОВСКИЙ А. М.	СТОЛИН А. М.	MARTYNENKO VALERY (УКРАИНА)
ДАВЫДОВ С. Я.	СУВОРОВ С. А.	PISCHEK STEFAN PAUL (АВСТРИЯ)
ДОРОГАНОВ В. А.	ТАРАСОВСКИЙ В. П.	RASCHMAN PAVEL (СЛОВАКИЯ)
ЗЕМЛЯНОЙ К. Г.	ФИЛОНОВ М. Р.	SMIRNOV ALEXEY N. (УКРАИНА)
КУЗНЕЦОВ Д. В.	ШЕВЧИК А. П.	STONYS RIMVYDAS (ЛИТВА)
ЛЕБЕДЕВ Ю. Н.	ШЕШУКОВ О. Ю.	WOHRMEYER CHRISTOPH (ГЕРМАНИЯ)
ЛУКИН Е. С.	ЮРКОВ А. Л.	
МОЖЖЕРИН В. А.		

Научные редакторы *Г. Г. Гаврик, Е. В. Костицына*
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) 955-01-82
E-mail: ogneupor@imet.ru, ognemet@mis.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 международные базы цитирования Web of Science (раздел Science Citation Index Expanded) и Scopus.

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 30.12.20. Формат 60×84 1/8.
Бумага мелованная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,50.
Заказ

ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ

Соколов В. А., Горбаненко М. А., Лисафин А. Б., Гаспарян М. Д. Выбор плавильного агрегата для производства плавленного диоксида циркония.....3

Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Костюк П. А. Новые разработки по пневматической доставке вяжущих и инертных добавок строительных материалов.....10

ТЕПЛОТЕХНИКА

Нижегородов А. И., Гаврилин А. Н., Мойзес Б. Б., Исмаилов Г. М. Модульно-спусковая печь с распределением скоростей локальных потоков сыпучих сред по тепловым зонам...16

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Пивинский Ю. Е., Дороганов В. А., Дороганов Е. А., Дякин П. В. Синергетический эффект совместных добавок глины и комплексного органоминерального разжижителя (КОМП) в технологии керамобетонов (Обзорная статья)....24

Иванов Д. А. Применение критериев термостойкости для оценки устойчивости к разрушению при воздействии термических напряжений алюмооксидной керамики и кермета $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}$...29

Добросмыслов С. С., Симуниев М. М., Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Задов В. Е., Нагибин Г. Е., Хартов С. В. Исследование влияния наноразмерного волокна оксида алюминия на термостойкость огнеупорного бетона.....38

Стонис Р., Ягнятинскис А., Милайшкене Ю., Шкамат Е., Антонович В., Корякин А., Кудзма А. Использование акустического метода измерения коэффициента поглощения звука для прогнозирования долговечности (термостойкости) жаростойких бетонов.....43

Таганова А. А., Бойченко Е. А., Киселев Н. В., Хайдаров Б. Б., Колесников Е. А., Юдин А. Г., Викулова М. А., Горшков Н. В., Кузнецов Д. В., Бурмистров И. Н. Синтез и исследование состава полых микросфер состава NiO и NiO/Ni для термоэлектрохимических преобразователей энергии низкопотенциальных температурных градиентов тепловых агрегатов в электричество.....49

Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ -керамики....54

ЭКОЛОГИЯ

Гольцов А. Б., Логачев К. И., Овсянников Ю. Г., Киреев В. М. Численное моделирование воздушных течений в загрузочном желобе аспирационного укрытия с многоступенчатым рециркуляционным воздушным затвором....61

ИНФОРМАЦИЯ И ХРОНИКА

Статьи, опубликованные в журнале «Новые огнеупоры» в 2020 г.69

Abstracts.....75

MANUFACTURING AND EQUIPMENT

Sokolov V. A., Gorbanenko M. A., Lisafin A. B., Gasparyan M. D. The selection of melting unit for production of fused zirconia.....3

Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Valiev N. G., Kostiyk P. A. New developments in pneumatic delivery of binders and inert additives for building materials.....10

HEAT ENGINEERING

Nizhegorodov A. I., Gavrilin A. N., Moyses B. B., Ismailov G. M. Modular-trigger electric furnace with distribution of local flow rates of bulk media over thermal zones.....16

SCIENTIFIC RESEARCH AND DEVELOPMENT

Pivinskii Yu. E., Doroganov V. A., Doroganov E. A., Dyakin P. V. Synergistic effect of combined additions of clay and a complex organomineral thinner (COMT) in the technology of ceramic concrete (Review article).....24

Ivanov D. A. Application of the thermal shock resistance criteria for evaluating the fracture resistance under thermal stress of alumina ceramics and $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}$ cermet.....29

Dobrosmyslov S. S., Simunin M. M., Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Zadov V. E., Nagibin G. E., Khartov S. V. Investigation of the effect of nanoscale alumina fiber on the heat resistance of refractory concrete.....38

Stonys R., Jagniatinskis A., Malaiškieņ J., Škamat J., Antonovič V., Koryakins A., Kudžma A. Using the acoustic method for measuring the sound absorption coefficient to predict the durability (heat resistance) of heat-resistant concretes.....43

Taganova A. A., Boychenko E. A., Kiselev N. V., Khaidarov B. B., Kolesnikov E. A., Yudin A. G., Vikulova M. A., Gorshkov N. V., Kuznetsov D. V., Burmistrov I. N. Synthesis and study of the composition of hollow microspheres of composition NiO and NiO / Ni for thermoelectrochemical energy converters of low-potential temperature gradients of thermal aggregates into electricity.....49

Kuzin V. V., Grigor'ev S. N., Volosova M. A. Force analysis of stress-strain state of surface layer of ground $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$ ceramics.....54

ECOLOGY

Gol'tsov A. B., Logachev K. I., Ovsyannikov Yu. G., Kireev V. M. Numerical simulation of air flows in the loading chute of an aspiration shelter with a multistage recirculating air seal.....61

INFORMATION

Guige index of the articles published in the journal «Novye огнеупоры» in 2020.....69

Abstracts.....75

Д. т. н. **В. А. Соколов**¹ (✉), **М. А. Горбаненко**², к. т. н. **А. Б. Лисафин**²,
д. т. н. **М. Д. Гаспарян**³

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ООО «Технокерамика», Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 546.831-31:621.365.5

ВЫБОР ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВЛЕНОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Приведены данные по получению плавленного и плавленного стабилизированного диоксида циркония из бадделеита и синтетического диоксида циркония в индукционных, плазменных и электродуговых печах. Обсуждены результаты и показаны перспективы карботермического получения диоксида циркония из циркона в электродуговой печи. Показано положительное влияние окислительного режима плавления в электродуговой печи на качество и процесс получения плавленного продукта. Приведены данные по получению плавленного диоксида циркония из циркона в плазменных печах.

Ключевые слова: плавленный диоксид циркония (ПДЦ), плавленный стабилизированный диоксид циркония (ПСДЦ), бадделеит, циркон, индукционная печь, плазменная печь, электродуговая печь, окислительная плавка, карботермия.

Диоксид циркония является наиболее широко используемым химическим соединением циркония, который в виде природного (бадделеита) и синтетического находит широкое применение в разных отраслях промышленности, главным образом для производства огнеупоров, технической керамики, абразивов. В последнее десятилетие значительно увеличилось применение диоксида циркония для производства материалов для электроники, кислородных сенсоров, пигментов для керамики, катализаторов и др. Крупной отраслью потребления диоксида циркония является атомная промышленность для получения ядерно-чистого металлического циркония (www.chmz.net).

Наряду с природным и синтетическим диоксидом циркония большой спрос имеют также его структурные модификации (моноклинная и кубическая, стабилизированная оксидами кальция или иттрия) в плавном виде. Так, по экспертным оценкам, мировое производство плавного диоксида циркония (ПДЦ) более 50 тыс. т; при этом доля стабилизированных марок не превышает 20 %.

Потребность России в ПДЦ из-за отсутствия собственного производства полностью осуществляется за счет импортных поставок. При этом потребителями ПДЦ являются предприятия стратегиче-

ски важных отраслей промышленности (атомной, авиационной, ракетно-космической, металлургической и др.). Поэтому создание отечественного крупнотоннажного производства ПДЦ является не только актуальной задачей, но и необходимой на случай возникновения непредвиденных внешне-экономических и внешнеполитических ситуаций. Исследования по получению ПДЦ достаточно широко проводились в СССР [1, 2] и продолжаются в России [3, 4]. Систематические комплексные исследования по разработке рациональных способов получения ПДЦ проводятся в НИТУ МИСиС [5–7], а также начиная с 2010 г. в ООО «Технокерамика» (г. Обнинск Калужской обл.).

Выбор метода плавления является определяющим для производства ПДЦ. При этом необходимо учитывать, что ПДЦ при использовании разных методов плавления можно получить либо в литой форме (отливка), либо в диспергированной (гранулы). Форма получения ПДЦ определяет его дальнейшее использование. Так, примером получения диоксида циркония в форме отливки являются плавнелитые огнеупоры с содержанием более 90 % ZrO_2 , которые являются конечным товарным продуктом. Плавный гранулированный диоксид циркония, кроме использования в качестве теплоизоляционного материала, является сырьевым полуфабрикатом для дальнейшей переработки и т. д.

Рассмотрение применяемых методов нагрева при получении ПДЦ позволит рационально с учетом требований к его качеству и объему производства определить вид плавильного агрегата. Основным методом плавления при получении



В. А. Соколов
E-mail: sokolov235@yandex.ru

ПДЦ переплавом синтетического диоксида циркония или бадделеитового концентрата является индукционная и электродуговая плавка.

Индукционная плавка основана на методе прямого ВЧ-нагрева и плавления оксидных материалов в холодном тигле. На рис. 1 показана схема холодного тигля периодического действия. Технологический процесс включает стартовый нагрев шихты (в данном случае порошкообразного ZrO_2 с добавками) до температуры плавления, наращивание первоначального объема расплава до заданного с последующей его кристаллизацией [8, 9].

Плавильно-кристаллизационные индукционные устройства периодического действия типа холодных тиглей применяют для синтеза моно-

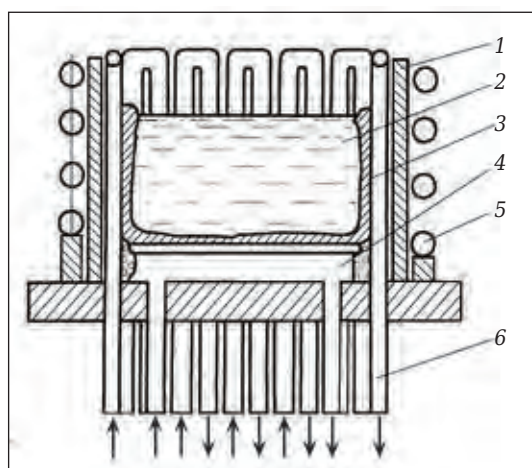


Рис. 1. Холодный тигель для плавления тугоплавких оксидных материалов: 1 — тигель; 2 — расплав; 3 — гарнисаж; 4 — индуктор; 5 — охлаждаемое дно; 6 — водоохлаждаемые трубки

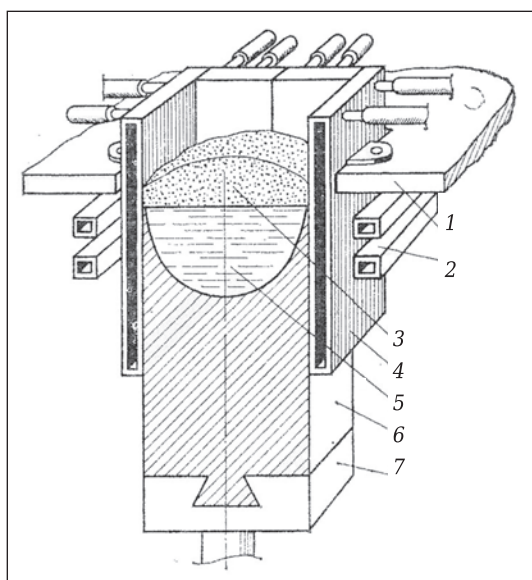


Рис. 2. Схема индукционного плавильно-кристаллизационного устройства с шахтой прямоугольного сечения: 1 — монтажная плита; 2 — индуктор; 3 — шихта; 4 — водоохлаждаемая секция плавильной шахты; 5 — ванна расплава; 6 — наплавленный блок; 7 — подвижной под

кристаллов ZrO_2 с разными добавками, для создания порошков термобарьерных защитных покрытий в авиакосмической промышленности, а также в ювелирной промышленности (фианиты) [10]. Требованиям к производству плавленных оксидных материалов наиболее полно отвечает индукционная непрерывно-последовательная наплавка слитков при использовании проходных плавильно-кристаллизационных устройств с перемещающимся подом (рис. 2).

Особенностями этого процесса являются непрерывное расплавление исходной шихты на поверхности ванны расплава и постоянная кристаллизация расплава в донной части ванны. Полученный слиток перемещается вниз из зоны плавления с помощью подвижного пода, на котором он закреплен. Удельные затраты электроплавки в данном случае значительно меньше, чем при плавке в холодных тиглях.

По технологии индукционной плавки в холодном тигле порошковый ПСДЦ — плавленный стабилизированный диоксид циркония (оксидом кальция или иттрия) производит предприятие «Технокерамика». Порошок ПСДЦ (рис. 3) содержит CaO (4,6 %), SiO_2 ($\leq 0,3$ %), Fe_2O_3 ($\leq 0,1$ %). На предприятии организован выпуск порошков фракций крупнее 5, 3–5, 1–3, 0,5–1, 0,2–0,5 мм и 40–100 мкм, а также тонкомолотый порошок (мельче 45 мкм) со средними размерами частиц 5–10 мкм.

Применение установок индукционного нагрева является экономически оправданным при использовании сырья с высокими требованиями к его чистоте (пример с фианитами), позволяющего выпускать высокорентабельную продукцию. Такая плавка характеризуется меньшими потерями шихтовых материалов, что очень важно при использовании дорогостоящего сырья. Однако недостатками использования таких установок для получения большого объема ПДЦ являются низкая производительность и трудности с получением диспергированных материалов.

Электродуговая плавка, источником тепловой энергии которой является электрическая дуга,

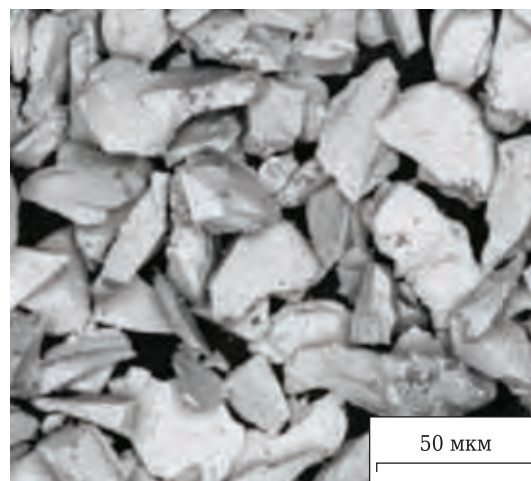


Рис. 3. Порошок ПСДЦ фракции 40–100 мкм

широко применяется в металлургии и производстве плавеных оксидных материалов [11, 12]. В результате концентрированного выделения энергии в малых объемах в электродуговых печах достигаются высокие температуры (2200–2700 °С), необходимые для плавки шихт на основе тугоплавких оксидов (ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO и др.). Электрическая дуга обеспечивает также высокую скорость нагрева, повышенную производительность установки и в большинстве случаев требуемую чистоту выплавляемого материала. Электродуговой плавкой получают отливки плавленоливых огнеупоров с содержанием ZrO_2 до 94 % (огнеупор ER 1195) [13]. Кроме того, достоинством электродуговой плавки является возможность получения плавленого материала в диспергированном виде.

Для плавки тугоплавких оксидов применяют трехфазные электродуговые печи с графитовыми электродами и водоохлаждаемым корпусом. Для печей, предусматривающих слив расплава в литейную форму и получение отливок, а также грануляцию расплава, имеется механизм наклона печи (рис. 4). Используют также электродуговые печи с плавкой «на блок»: шихта плавится в изложнице, расположенной в кожухе перемещающейся тележки. Остывание отливки происходит в изложнице (рис. 5).

При плавке «на блок» из шихты, состоящей из бадделеита и мела, в трехфазной электропечи мощностью 400 кВ·А (изложница диаметром 900 и высотой 1200 мм) за 3 ч наплавляли блок массой 680 кг [1]. Электрический режим плавки: ток 3500–4000 А, напряжение 82 В. Выход плавленого материала 68 %, непроплава 32 %. Плавленый материал характеризовался темной окраской вследствие частичного восстановления ZrO_2 , нарушением его стехиометрии и образованием карбидов. Для восстановления стехиометрии ZrO_2 плавленый материал подвергали окислительному обжигу при 1500 °С, а затем измельчали в щековой и валковой дробилках до получения размеров зерен менее 2 мм. Химический состав измельченного материала фракции 0,5–2 мм после рассева и магнитной сепарации, %: ZrO_2 94,3, CaO 5,5.

ПСДЦ, стабилизированный оксидом кальция, получали также в однофазной электропечи мощностью 300 кВ·А плавкой бадделеитового концентрата с известняком. Плавку выполняли «на блок» при напряжении 88 В и расходе электроэнергии 2900 кВт·ч/т [12, с. 173, 174]. Данные о получении ПСДЦ приведены также в статьях [14, 15]. При этом указано, что производительность плавки «на слив» в 2–3 раза выше, чем плавки «на блок».

Плавка диоксида циркония из-за повышенной температуры плавления (2700 °С) представляет значительную трудность и требует высоких энергозатрат. Создание новых электродуговых установок типов ЭДП-450 и ЭДП-600М позволило получать ПДЦ в режиме окислительного плавления [16, 17]. Так, в электродуговой печи ЭДП-450 мощностью 450 кВ·А плавкой диоксида циркония

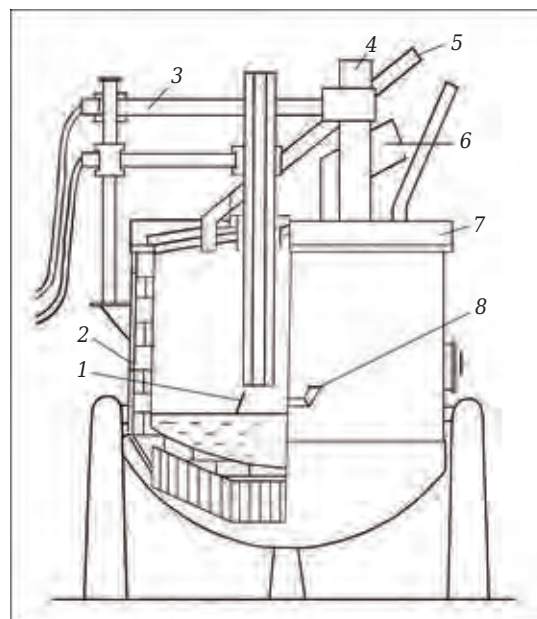


Рис. 4. Электродуговая печь для плавки «на слив»: 1 — дуга; 2 — корпус; 3 — электрододержатель; 4 — электрод; 5 — загрузка шихты; 6 — газоотвод; 7 — крышка; 8 — летка

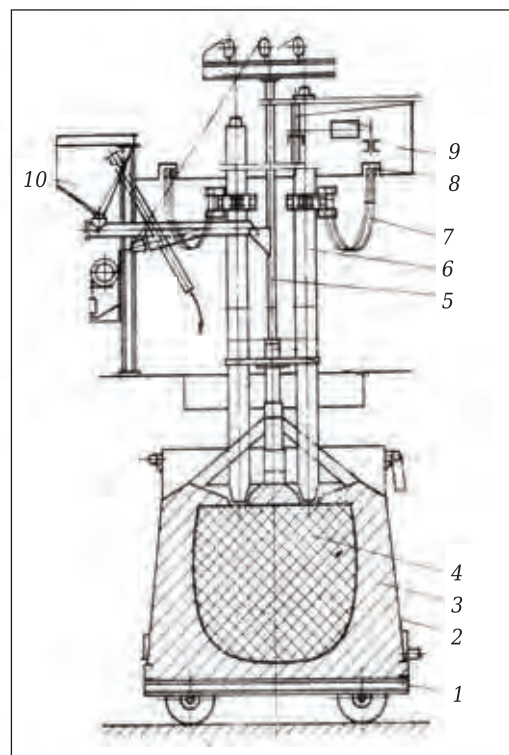


Рис. 5. Электродуговая печь для плавки «на блок»: 1 — тележка; 2 — кожух; 3 — изоляция; 4 — плавленый материал; 5 — труба для загрузки шихты; 6 — электроды; 7 — короткая сеть; 8 — подвод тока; 9 — кожух для удаления газов; 10 — бункер с шихтой

марки ЦрО-1 с карбонатом кальция квалификации ч. получали отливки массой до 32 кг (продолжительность плавки не более 60 мин). Состав кристаллической фазы полученного материала ВЦ-2, по данным рентгеноспектрального микро-

зондирования, %: ZrO_2 91,5–92,7, CaO 7,0–7,8, примеси 0,4 [18]. Структуру материала составляли кристаллы ZrO_2 кубической модификации размерами 0,15–0,35 мм, имеющие в плоскости шлифа полигональную изометрическую форму. Особенность этого материала — наличие опоясывающей кристаллической каймы шириной 0,002–0,003 мм вокруг зерен основной кристаллизации. Вероятно, это свидетельствует о присутствии небольших количеств ZrO_2 моноклинной модификации, на что указывают его слабые пики на рентгенограмме этого вещества. Однако высокую степень стабилизации ZrO_2 подтверждает график дилатометрических испытаний (рис. 6), на котором отсутствует петля гистерезиса, характерная для материалов бадделеитового состава. Следует отметить изменение окраски полученного материала от светло-серого до зеленоватого в результате специально подобранного режима окислительного плавления. В отличие от этого, по данным работы [1], при дуговой восстановительной плавке шихты на основе бадделеита и мела из-за нарушения стехиометрии ZrO_2 отливки приобретали окраску от темно-серой до черной. Поэтому для таких материалов был необходим дополнительный обжиг для восстановления стехиометрии ZrO_2 .

Модернизированная установка ЭДП-600М с улучшенными энергетическими характеристика-

ми позволила реализовать окислительный режим плавления и получение перегретого жидкотекучего расплава с возможностью его максимального слива из печи. Поэтому систематические исследования получения ПСДЦ проводили в электродуговой печи ЭДП-600М со сдвигающимися графитовыми электродами диаметром 100 мм. В качестве сырьевых материалов использовали бадделеитовый порошок марки ПБ-0 с содержанием ZrO_2 98,5 % и мел (ГОСТ 8253). После расплавления шихты расплав некоторое время выдерживали в печи, а затем сливали в графитовую форму с получением отливок массой до 50 кг. Была проведена также серия плавок с получением гранул и агрегатов ПСДЦ размерами от 1 до 10 мм (рис. 7).

По данным петрографического анализа, ПСДЦ имеет полнокристаллическую структуру из достаточно крупных кристаллов ZrO_2 . Отливки характеризуются более крупными кристаллами (0,40–0,60 мм) по сравнению с гранулами (0,20–0,40 мм). Кристаллическая фаза гранулированного ПСДЦ, по данным рентгеноспектрального микрозондирования, содержит 91,5–92,4 % ZrO_2 и 7,6–8,5 % CaO . Результаты рентгенофазового анализа подтвердили, что единственным кристаллическим соединением всех плавящихся отливок и гранул является ZrO_2 кубической модификации.

Приведенные примеры использования индукционного и электродугового нагрева свидетельствуют о возможности получения ПДЦ и ПСДЦ путем переплава достаточно дорогого порошкового сырья — бадделеита или синтетического ZrO_2 . Синтетический ZrO_2 , получаемый длительным и сложным гидрометаллургическим способом, является высокочистым и мелкозернистым порошком, который наиболее рационально использовать в производстве конструкционной и электронной керамики. Для производства большинства типов огнеупоров и технической керамики этот вид сырья является достаточно дорогим, что сдерживает их эффективное развитие. Поэтому для снижения затрат на сырье разрабатываются способы получения ПДЦ моноклинной и кубической модификации из цирконового материала, стоимость которого на порядок ниже, чем синтетического ZrO_2 . К основному способу получения ZrO_2 из циркона, имеющему практическую реализацию, относится электродуговая, плазменная и плазменно-индукционная плавка.

Основой плазменной и плазменно-индукционной плавки является диссоциация циркона, вводимого в зону высокой температуры (7000–9000 °С) плазменного реактора, в котором он диссоциирует на ZrO_2 и SiO_2 с последующим удалением SiO_2 гидрометаллургическим способом. Принципиальная аппаратурная схема опытно-промышленного производства получения ПДЦ из цирконового песка в плазменной печи показана на рис. 8 [19–21].

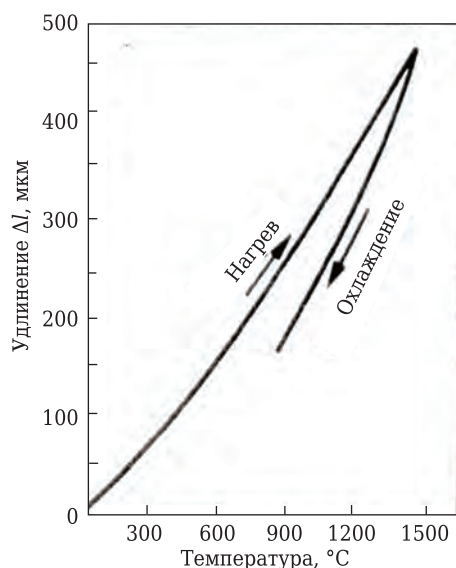


Рис. 6. Дилатометрическая кривая ПСДЦ ВЦ-2



Рис. 7. Гранулированный ПСДЦ

Цирконовый песок, измельченный до крупности 200 мкм, равномерно подается в плазменный разряд, создаваемый дуговым плазмотроном. За доли секунды пребывания в плазме происходят расплавление и практически полное (99 %) разложение циркона на оксиды:



После охлаждения и затвердевания продукт содержит сферические частицы моноклинного ZrO_2 , покрытого слоем аморфного кремнезема; последний вследствие повышенной реакционной способности избирательно выщелачивают 50 %-ным раствором едкого натра при 120 °С. После двухстадийного противоточного выщелачивания получают ZrO_2 с содержанием SiO_2 менее 1 % и раствор силиката натрия, являющийся полезным побочным продуктом. Диоксид циркония состоит из частиц, представляющих собой полые сферы диаметром 0,1–0,2 мкм. В зависимости от требований потребителя к продукту процесс можно сократить, применяя только одно выщелачивание. По данным [19], могут быть получены три вида продукта, содержащие 70 % ZrO_2 и 30 % SiO_2 , 96 % ZrO_2 и 4 % SiO_2 или 99 % ZrO_2 и 0,5 % SiO_2 . Другие примеры получения ПДЦ из циркона методом плазменного разложения приведены в публикациях [22–24]. Серьезными недостатками дуговых плазмотронов являются невозможность длительной непрерывной работы при мощности более 300 кВт, значительная эрозия электродов, использование аргона в качестве плазмообразующего газа.

Применение высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазменных установок для получения ПДЦ представляется более эффективным по сравнению с дуговой плазменной техникой [4]. В

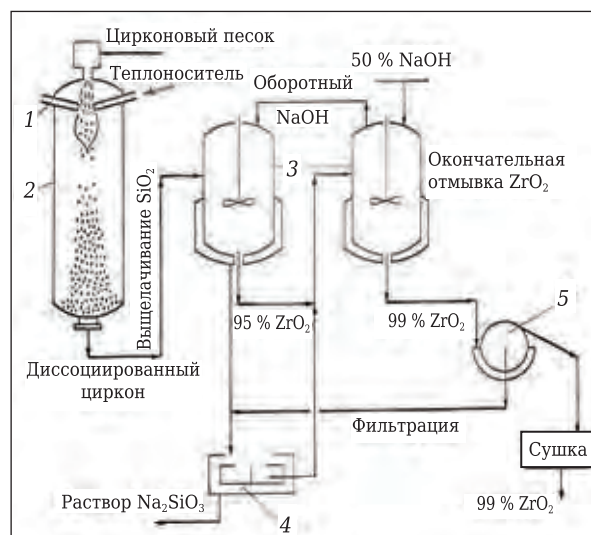


Рис. 8. Аппаратурная схема получения ПДЦ термическим разложением циркона в плазменном реакторе: 1 — плазмотрон; 2 — плазменный реактор; 3 — реактор-выщелачиватель; 4 — центрифуга; 5 — вакуум-фильтр

опытной ВЧИ-плазменной установке мощностью 1 МВ·А предприятия «Технокерамика» проведены эксперименты по термическому разложению циркона в воздушной плазме (рис. 9) [25]. На рис. 10 показана частица циркона после плазменной обработки, представляющая собой сферу, состоящую из матрицы диоксида циркония, пространство которой заполнено аморфным диоксидом кремния, обладающим повышенной реакционной способностью, что ускоряет процесс извлечения чистого диоксида циркония. Кроме того, проведены работы по обработке продуктов разложения цирконового концентрата, полученных в воздушной плазме, с последующим фтораммонийным

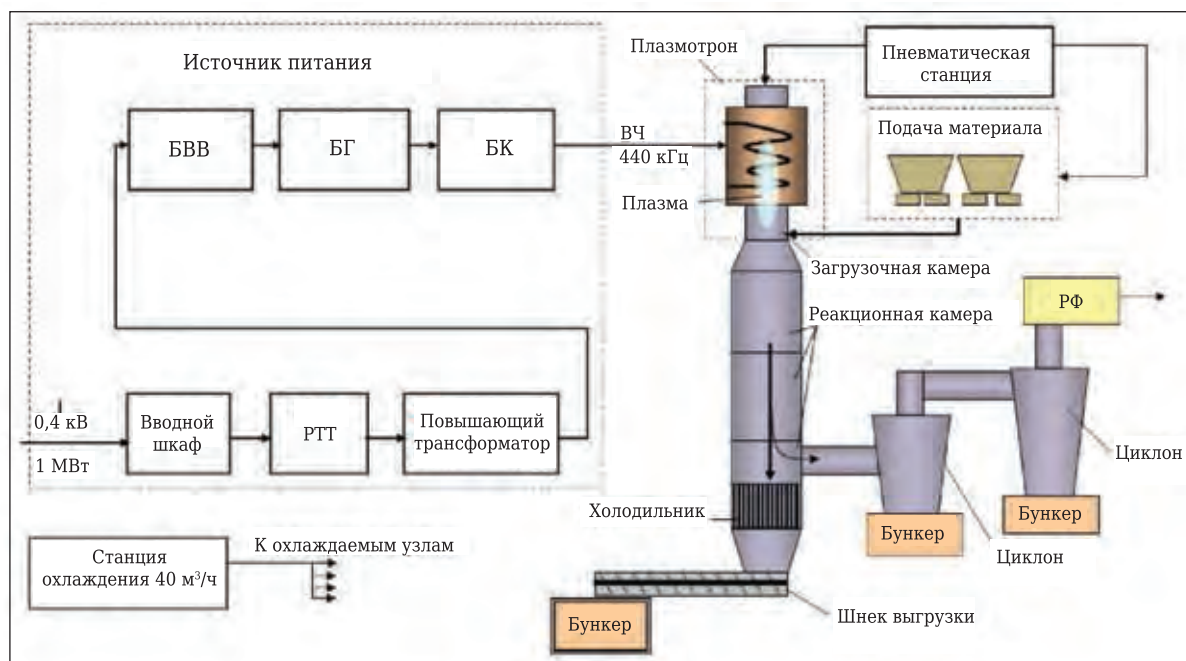


Рис. 9. Схема ВЧИ-плазменной установки

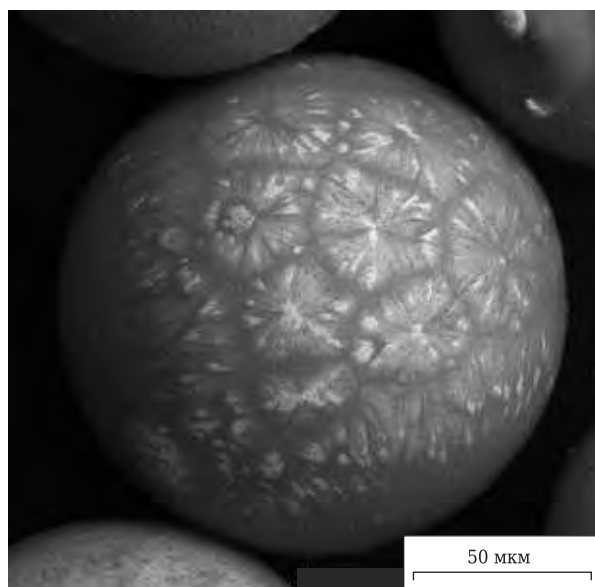


Рис. 10. Частица ZrO_2 после обработки циркона в струе ВЧИ-воздушной плазмы

извлечением и получением материала с содержанием ZrO_2 99,9 %. По технологии получения ZrO_2 фтораммонийной обработкой плазмодиссоциированного циркона, разработанной на предприятии «Технокерамика» совместно с Томским политехническим университетом, выпущены опытно-промышленные партии продукции ZrO_2 .

Электродуговая плавка получения ПДЦ методом карботермического разложения циркона основана на разложении циркона при высоких температурах на оксиды по реакции (1) и восстановлении выделенного SiO_2 до летучего монооксида SiO [26]:

$$SiO_2 + C \rightarrow SiO \uparrow + CO. \quad (2)$$

Монооксид кремния улетучивается из рабочей зоны печи и в дальнейшем окисляется до SiO_2 , частицы которого улавливаются в пылеуловителях. Для реализации карботермического разложения использовали электродуговые печи с плавкой «на блок» (см. рис. 3) и «на слив» (см. рис. 4). Для получения ПСДЦ из циркона (65–67 % ZrO_2) использовали восстановительную плавку «на блок», в процессе которой содержание SiO_2 снижалось от 33 до 0,5–0,9 % [12, с. 172, 173]. Шихта включала циркон, железные опилки и металлургический кокс. Выплавленный продукт измельчали, отмагничивали и прокаливали при 1400–1450 °С для разложения карбидов. Состав ПСДЦ, %: ZrO_2 94–95, CaO 4–5.

Реализация карботермического разложения циркона в электродуговой установке ЭДП-450 позволила на первом этапе снизить количество SiO_2 в цирконе почти в 3 раза и получить сырьевые полуфабрикаты с содержанием ZrO_2 более 80 %. При использовании окислительного режима плавления и литейного кокса в качестве углеродистого восстановителя был получен плавленый

продукт в виде агломератов размерами 10–15 мм [27]. Высокое содержание остаточного кремнезема в плавленом продукте объясняется значительным уносом и горением кокса в период загрузки в печь, что приводило к снижению его восстановительной функции. Достижение более высокой степени обескремнивания требует соответствующей коррекции технологии (изменение режима и условий плавки, повышение эффективности восстановителя, компактирование шихты и др.).

Следует отметить, что хотя по получению ПДЦ и ПСДЦ проводилось достаточно много исследований, их опытно-промышленная проверка в нашей стране не была завершена из-за ликвидации опытно-промышленной экспериментальной базы вследствие экономической ситуации в 90-е годы прошлого века. При выборе плавильного агрегата для промышленного производства ПДЦ и ПСДЦ необходимо учитывать многолетнюю практику применения электродуговых печей для получения плавленных оксидных материалов [11, 12]. За основу такого оборудования могут быть приняты электродуговые печи типов ДС-05, ДСПМ-1,5 и ОКБ 2126А [16], модернизированные в соответствии с требованиями к получаемому плавленому продукту и с масштабом производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты проведенного анализа плавильных агрегатов свидетельствуют, что для создания опытно-промышленного производства ПДЦ и ПСДЦ из бадделеитового концентрата или синтетического ZrO_2 наиболее рационально использовать электродуговую печь с возможностью проводить режим окислительного плавления. Создание пилотной электродуговой установки на базе печи ДС-0,5 позволит выпускать в год методом переплава до 1000 т плавленного гранулированного ZrO_2 моноклинной модификации или ZrO_2 , стабилизированного оксидами кальция или иттрия. Такая продукция предназначена в первую очередь для основных потребителей — предприятий по производству огнеупоров, абразивов, керамики и пигментов. Для получения конструкционной и электронной керамики, кислородных сенсоров с повышенными требованиями к чистоте сырья возможно использование индукционных и плазменных установок с учетом экономической целесообразности.

2. Для получения ПДЦ и ПСДЦ из цирконового сырья возможны два варианта: электродуговой карботермический и плазменный с использованием гидрометаллургии. Применение электродуговой печи для карботермии циркона позволит организовать достаточно крупное производство (несколько тысяч тонн в год) ПДЦ или ПСДЦ. Однако это потребует специального плавильного оборудования, которое кроме высокой температуры процесса должно обеспечивать удаление боль-

ших количеств монооксида кремния; при этом необходима грануляция расплава при литье.

3. Использование плазменных установок позволит организовать среднетоннажное производство с выпуском отдельных партий ПДЦ и ПСДЦ. Выпускаемый при этом ZrO_2 обладает повышенной чистотой и имеет размер частиц, пригодный для использования в разных отраслях без дополнительного дробления и измельчения.

Библиографический список

1. **Karaulov, A. G.** Fusing baddeleyite in an electric arc furnace / A. G. Karaulov, A. D. Malyuk, V. G. Druzhinin, A. V. Oistrakh // *Refractories*. — 1983. — Vol. 24, № 2. — P. 208–210.

Карaulов, А. Г. Освоение плавки бадделейта в электродуговой печи / А. Г. Карaulов, А. Д. Малюк, В. Г. Дружинин [и др.] // *Огнеупоры*. — 1983. — № 4. — С. 34–36.

2. **Карaulов, А. Г.** Опыт плавки бадделейта в электродуговых печах ОКБ 955Н / А. Г. Карaulов, Т. Е. Сударкина, Я. Г. Гапонов [и др.] // *Огнеупоры*. — 1983. — № 6. — С. 21–24.

3. **Sokolov, V. A.** Preparation of fused stabilized zirconium dioxide / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 119–121.

Соколов, В. А. О получении плавного стабилизированного диоксида циркония / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 3. — С. 75–78.

4. **Лисафин, А. Б.** Разработка и исследование высокочастотной индукционной плазменной установки мощностью 1 МВА для новой технологии получения диоксида циркония из цирконового концентрата : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017.

5. **Соколов, В. А.** Разработка рациональных методов получения диоксида циркония : тез. докл. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов (7–8 апреля 2016 г., Москва) / В. А. Соколов, С. В. Махов, Е. В. Богатырева // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 3. — С. 26, 27.

6. **Соколов, В. А.** Разработка экологически безопасного получения диоксида циркония из цирконового концентрата / В. А. Соколов, Е. В. Богатырева, С. В. Махов // *Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование»*, Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2018 г. — С. 302–304.

7. **Соколов, В. А.** О получении плавного стабилизированного диоксида циркония : тез. докл. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов (3–4 апреля 2014 г., Москва) / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 3. — С. 24.

8. **Александров, В. И.** Плавнение тугоплавких диэлектриков методом прямого ВЧ нагрева в «холодном» контейнере / В. И. Александров, В. В. Осико, В. М. Татаринцев [и др.] // *Неорганические материалы*. — 1973. — Т. 9, № 2. — С. 236–238.

9. **Petrov, Yu. B.** Induction melting of refractory oxide materials in cold crucibles / Yu. B. Petrov, A. V. Shkul'kov, I. V. Shurygina // *Refractories*. — 1980. — Vol. 21. — P. 536–541.

Петров, Ю. Б. Индукционная плавка в холодных тиглях окисных огнеупорных материалов / Ю. Б. Петров, А. В. Шкульков, И. В. Шурьгина // *Огнеупоры*. — 1980. — № 10. — С. 41–56.

10. **Кравчук, Д. И.** Особенности производства методом гарнисажа фианитов / Д. И. Кравчук, В. И. Кравчук // *Молодой ученый*. — 2015. — № 10 (90). — С. 236–239.

11. **Попов, О. Н.** Производство и применение плавного диоксида циркония / О. Н. Попов, П. Т. Рыбалкин, В. А. Соколов, С. Д. Иванов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.

12. **Соколов, А. Н.** Плавные огнеупорные оксиды / А. Н. Соколов, У. Б. Ашимов, А. В. Болотов [и др.]. — М. : Металлургия, 1988. — 232 с.

13. Каталог SEPR Group. Refractory Products for Glass Furnaces. Fused cast refractories. Fused cast products. — 64 p.

14. **Kuznetsov, G. I.** Fused refractories: New developments and prospects / G. I. Kuznetsov, E. S. Borisovskii // *Refractories*. — 1994. — Vol. 35. — P. 389–391.

Кузнецов, Г. И. Плавные огнеупоры: новые разработки и перспективы использования / Г. И. Кузнецов, Е. С. Борисовский // *Огнеупоры*. — 1994. — № 12. — С. 2–4.

15. **Перепелицын, В. А.** Производство плавного диоксида циркония в ОАО «Первоуральский динасовый завод» / В. А. Перепелицын, А. М. Гороховский, А. В. Федорцева [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 7. — С. 25–29.

16. **Sokolov, V. A.** Arc melting plant synthesizing and producing fusion-cast / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, P. P. Mamochkin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2009. — Vol. 50, № 3. — P. 185–188.

Соколов, В. А. Дуговые плавильные установки для синтеза и производства плавного диоксида циркония / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, П. П. Мамочкин // *Новые огнеупоры*. — 2009. — № 6. — С. 15–18.

17. **Гаспарян, М. Д.** Опыт-промышленная установка ЭДП-600М для плавки тугоплавких оксидных материалов : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» / М. Д. Гаспарян, В. А. Соколов. — М. : ИТЕП, НИТУ «МИСиС», 2012. — С. 117, 118.

18. **Sokolov, V. A.** Fuson-cast refractories in high-zirconia region of the ZrO_2 - SiO_2 -CaO system / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2005. — Vol. 46, № 3. — P. 197–200.

Соколов, В. А. Получение плавного диоксида циркония в высокоциркониевой области системы ZrO_2 - SiO_2 -CaO / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2005. — № 3. — С. 37–40.

19. **Thorpe, M. L.** Electric-arc furnace turns zircon sand to zirconia / M. L. Thorpe, P. H. Wilks // *Chem. Eng. (New York)*. — 1971. — Vol. 78, № 26. — P. 117–119.

20. **Зеликман, А. Н.** Металлургия тугоплавких редких металлов / А. Н. Зеликман. — М. : Металлургия, 1986. — 440 с.

21. **Туманов, Ю. Н.** Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю. Н. Туманов. — М. : Физматлит, 2010. — 968 с.

22. **Wilks, P. H.** Arc-plasma dissociation of zircon / P. H. Wilks // *Chem. Eng. (New York)*. — 1975. — Vol. 82, № 24. — P. 56, 57.

23. **Barnett, G.** Zircon to zirconia from sand to high performance ceramics / G. Barnett, M. Houchin, D. Jenkins // *Mineralogy-Petrology Symposium*, Sidney, 6–8 February 1989. — Parkville, 1989. — P. 107–110.

24. **Evans, F. M.** The influence of quench rates on the microstructure and properties of plasma-dissociated zircon / F. M. Evans, J. P. Williamson // *J. Mater. Sci.* — 1979. — Vol. 14, № 3. — P. 680–686.

25. **Фарнасов, Г. А.** Диссоциация циркона после обработки в воздушной высокочастотной индукционной плазме / Г. А. Фарнасов, А. Б. Лисафин // *Физика и химия обработки материалов*. — 2015. — № 2. — С. 29–34.

26. **Соколов, В. А.** Разложение циркона плавкой в электродуговой печи / В. А. Соколов // *Цветные металлы*. — 2006. — № 7. — С. 59–63.

27. **Sokolov, V. A.** Melting zircon in electric-arc furnace — a method for preparing refractory materials and green semifinished products / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 191–193.

Соколов, В. А. Плавка циркона в электродуговой печи — метод получения огнеупорных материалов и сырьевых полуфабрикатов / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 5. — С. 8–10. ■

Получено 24.11.20

© В. А. Соколов, М. А. Горбаненко, А. Б. Лисафин, М. Д. Гаспарян, 2020 г.

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. х. н. Р. А. Апакашев, д. т. н. Н. Г. Валиев,
П. А. Костюк

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

УДК 621.867.81/85.001.895

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ПО ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ДОСТАВКЕ ВЯЖУЩИХ И ИНЕРТНЫХ ДОБАВОК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Даны основные характеристики, назначение и применение в горных выработках вяжущих строительных материалов. Доставка вяжущих материалов и заполнителей в горные выработки производится мягкими контейнерами, разгрузку мягких контейнеров осуществляют с использованием камерных пневматических разгрузателей. Разработан пневматический разгрузатель для растаривания и подачи материала к месту назначения, включая его подъем. Поперечные вставки в виде решеток предложено установить подвижно по высоте с возможностью изменения расстояния между ними в процессе перенастройки подъемника, не превышающего некоторой величины. Предложено подъемное устройство для увеличения производительности и эффективности работы пневмотранспорта за счет уменьшения или исключения завала нижней части трубопровода.

Ключевые слова: вяжущие строительные материалы, пневматический разгрузатель, мягкие контейнеры, камерный питатель, поперечные вставки, лепестки.

Для крепления подземных выработок основными вяжущими строительными материалами служат цемент и известь. Цемент с песком используется в соотношении 1:3 при обычных условиях и 1:1 при значительном горном давлении. Прочность затвердевшего раствора зависит от водоцементного соотношения В/Ц. Необходимое количество воды в растворе определяется опытным путем. При этом учитывается обводненность выработок.

Для горной крепи применяют только гидравлические вяжущие материалы, чаще всего портландцемент. В качестве вяжущих материалов применяют также гипсоцемент и синтетические смолы. В зависимости от соотношения смешиваемых количеств воды и цемента, оцениваемого по В/Ц, цементный раствор обладает различными вяжущими свойствами. Марка цемента означает предел прочности при сжатии в десятых долях мегапаскаля образца, изготовленного из одной части цемента и трех весовых частей песка при В/Ц = 1/2,5.

Наиболее широко при креплении выработок в горном деле используют получаемый обжигом до спекания смеси известняка и глины силикатный цемент — портландцемент марок 300, 400, 500 и 600. В присутствии агрессивных вод вместо

портландцемента применяют глиноземистый, пуццолановый, шлаковый и другие цементы. Рассмотренные виды цементов при твердении дают усадку, в результате чего в цементном камне появляются микротрещины. Имеются цементы, не дающие усадки при твердении: безусадочный и расширяющийся. Период схватывания обычного портландцемента после смешения с водой составляет от 45 мин до 12 ч. Для сокращения времени схватывания к цементу добавляют 1,5–5 % хлористого кальция, хлористого натрия и др. (http://www.tinref.ru/000_uchebniki/01790gornoe_delo/002_vasuchkov_gorn_delo/018.htm).

При креплении капитальных выработок используют бетон, содержащий вяжущее, мелкий и крупный заполнитель и воду. В качестве мелкого заполнителя используют песок без глинистых частиц, в качестве крупного — прочный гравий или щебень. При закладке песками нижний предел крупности закладочного материала ограничивается фракцией мельче 0,1 мм пылевато-глинистых частиц, содержание которой не должно превышать 30 %. Песок, гравий и щебень называют инертными добавками. Назначение инертных добавок — получить большой объем при том же количестве более дорогого материала (цемента). Состав бетона определяют по содержанию весовых частей цемента, песка (А) и крупного заполнителя (Б) 1:А:Б, а также по В/Ц. При расходе на 1 м³ бетона менее 200 кг цемента бетон называют тощим, при расходе цемента 200–250 кг — средним, более 250 кг — жирным. Для крепи горных выработок применяют в основном средние и жирные бетоны



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

плотностью 2200–2300 кг/м³. Для горных выработок применяют тяжелый и облегченный бетоны плотностью в сухом состоянии соответственно 2200–2500 и 1800–2200 кг/м³.

Расчетную прочность бетон набирает на 28-й день твердения. Нормальные условия твердения бетона: температура 15–20 °С и относительная влажность воздуха 90–100 %. Для придания пластических свойств в бетонную смесь вводят добавки-классификаторы, которые одновременно снижают количество необходимой воды на 7–15 % и уменьшают на 8–10 % расход цемента. В шахтном строительстве используют марки бетона от 100 до 600 с интервалом через каждые 100 единиц.

Процесс укладки бетона хорошо поддается механизации на основе использования бетоноукладчиков. При укладке бетон принимает практически любую заданную форму. Высокая прочность, монолитность, хорошее сцепление с окружающими породами делают бетон одним из основных материалов для крепления капитальных горных выработок и камер. Для интенсификации возведения бетонных крепей и снижения расхода крепежных материалов применяют *торкрет-бетон* и *набрызг-бетон*. *Торкрет-бетон* — смесь из цемента из расчета 750 кг на 1 м³ водоцементного раствора, песчано-гравийного заполнителя с зернами крупностью до 5 мм и воды. Торкрет-бетон укладывают на укрепляемую поверхность выработки слоями толщиной 2–3 см каждый под давлением сжатого воздуха 0,2–0,3 МПа. Набрызг-бетон — смесь из цемента, взятого из расчета 400–450 кг на 1 м³ водоцементного раствора, гравийного заполнителя с частицами крупностью до 25 мм и добавок, ускоряющих отверждение (фтористый натрий и др.), в количестве 2–5 % от массы цемента и воды. Набрызг-бетон укладывают на поверхность выработки слоями общей толщиной 2–8 см.

Набрызг-бетон получил распространение в горном деле и подземном строительстве как один из основных материалов для крепления и гидроизоляции выработок, ремонта тоннельных обделок. Применяется в широком диапазоне горно-геологических условий в виде самостоятельной конструкции (в скальных и плотных глинистых грунтах с коэффициентом крепости $f > 4$), а также в сочетании с анкерами или арками с покрытием непосредственно по породе или по сетке, используемой в качестве затяжки (при $f = 2 \div 4$).

Набрызг-бетон или торкрет-бетон не являются относительно новым изобретением. Они известны более восьмидесяти лет. Первые работы с применением набрызг-бетона были выполнены в США в Аллентауне еще в 1907 г. компанией Cement-Gun. Первое устройство для напыления сухих материалов при новых строительных работах было изобретено в Пенсильва-

нии в 1907 г. Карлом Этаном, который нуждался в машине для набрызга строительного раствора на металлический каркас для сооружения динозавров. Его компания Cement-Gun защитила интересы торговой марки Gunitе для используемой ими строительной смеси. Этот раствор содержал мелкий инертный заполнитель и весьма высокое количество цемента.

Особенности набрызг-бетона, такие как метод его нанесения при креплении горных выработок, специальные материалы, оборудование, сделали его важным и необходимым инструментом для современного подземного строительства. В России набрызг-бетон впервые был применен в 1916 г. Создание в 1942 г. в Швейцарии машин для нанесения смеси с наполнителем крупностью до 30 мм и разработка эффективных ускорителей схватывания и твердения смеси способствовали широкому использованию набрызг-бетона для возведения как временной, так и постоянной крепи подземных выработок. Для торкретирования применяют высокомарочные цементы, в частности портландцемент и шлакопортландцемент по ГОСТ 10178, сульфатостойкий цемент по ГОСТ 22266, белый портландцемент по ГОСТ 965, цветной портландцемент по ГОСТ 15825. В ходе многократных производственных испытаний было выявлено, что предпочтительно использовать бездобавочные цементы с повышенным содержанием алюминатов, что приводит к быстрому набору прочности при смешивании с бесщелочными ускорителями твердения последнего поколения АФА (<http://docs.cntd.ru/document/1200080791>).

Железобетон — единый искусственный металлокаменный материал, состоящий из бетона и металлической арматуры. В качестве арматурных элементов используют круглую сталь гладкого или периодического профиля и арматурные канаты. Расчетную нагрузку железобетон может воспринимать после набора бетоном заданной прочности. Железобетонную крепь изготавливают либо непосредственно в шахте (монолитная крепь), либо на заводе железобетонных изделий (сборная крепь). Для придания железобетонным элементам крепи повышенной прочности металлическую арматуру предварительно подвергают растяжению, а затем заливают бетоном. Железобетонные крепи воспринимают не только сжимающие напряжения, но и растягивающие (<http://stroy-server.ru/notes/svyazuyushchie-dlya-ukrepleniya-gruntov>).

Железобетон применяют для повышения прочности крепи, работающей на изгиб или растяжение. Для железобетонной крепи металлическую арматуру заделывают внутрь бетона. Конструкция арматуры соответствует конструкции железобетонной крепи. Наибольший размер щебня не должен превышать 0,75 наименьшего расстояния между прутьями арматуры.

Наиболее распространен метод укрепления грунта с помощью портландцемента и шлакопортландцемента с добавками, регулирующими процесс твердения цементогрунта (хлористый кальций, известь, соли щелочных металлов, поверхностно-активные вещества). Основные процессы, происходящие при формировании цементогрунта, зависят от взаимодействия цемента с глинистыми частицами грунта. Взаимодействие вызывается растворением кремнезема и глинозема из частиц глины и аморфного компонента в среде с высоким pH, образованного в результате выделения гидратирующимся цементом высокореактивного $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Растворившиеся компоненты с ионами кальция могут образовывать дополнительный цементирующий материал, который скрепляет между собой частицы глины. Для цементации грунтов применяют цементные, цементно-песчаные, цементно-глинопесчаные и цементно-глинистые растворы. В ряде случаев требуется повышение проницаемости частиц цемента в грунт, для этого производят помол цемента (мокрый или сухой) или воздушное сепарирование крупных частиц (<http://crdtech.ru/index.php/technology/item1/50-2012-04-30-12-21-40>).

Так называемый безвзрывной разрушающий реагент предназначен для тихого разрушения подлежащих сносу фундаментов, бетонных стен, опор. Может быть использован при добыче мрамора, гранита и др. Реагент состоит из извести и наполнителя. После ввода его в шпур и плотной закупорки реагент приводится в контакт с водой. Через 10–16 ч давление в шпуре достигает 300 кгс/см^2 , что достаточно для образования трещин в теле разрушаемого объекта. При бурении нефтяных скважин в состав промыочно-бурового раствора добавляют до 0,5 % гидратной извести, особенно при тяжелых условиях работ. При этом удается нейтрализовать вредное воздействие некоторых солей и ускорить буровые работы.

Имеется технология подавления взрывоопасности угольной пыли в шахтах. Для этой цели в атмосферу шахт вводят известковую пыль, которая, осаживаясь на угольной пыли, делает ее взрывобезопасной.

Экономия и повышение эффективности использования энергетических ресурсов входят в число восьми приоритетных направлений политики Российской Федерации, утвержденных Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». Основными потребителями ТЭР являются промышленные предприятия. Реализация технологического процесса во многих отраслях промышленности требует перемещения большого объема сыпучих

материалов. При этом на долю пневмотранспорта приходится около 30 % объема всех работ по транспортировке сыпучих грузов. Системы пневмотранспорта имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными средствами транспортировки сыпучих материалов: компактность, высокие гигиенические показатели, способность одновременно с транспортированием материала изменять его состояние, простота обслуживания. Однако системы пневмотранспорта обладают самыми высокими затратами энергии на тонну перемещаемого материала. В некоторых случаях этот показатель превышает энергетические затраты традиционных видов транспорта в 10–15 раз. Высокое удельное энергопотребление часто связано с ошибками на этапе проектирования установок, поскольку существующие инженерные методики расчета пневмотранспортных установок (ПТУ) не учитывают специфику разных отраслей промышленности, что приводит к снижению энергетической эффективности ПТУ. Поэтому в настоящее время актуальной является проблема повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта при транспортировке сыпучих материалов.

Доставка вяжущих материалов в горные выработки производится мягкими контейнерами. Разгрузку мягких контейнеров осуществляют с использованием камерных пневморазгрузчиков. Одной из сложных проблем использования мягких контейнеров для пылевидных и порошковых материалов — их опорожнение. Существует ряд механических устройств (в том числе, например, устройство распаковки сыпучих продуктов из мягких контейнеров с донными клапанами фирмы «РМК-Т») для опорожнения мягких мешков.

Авторы [1–9] разработали пневматический разгрузатель (растариватель, пневморастариватель) пылеобразных насыпных грузов из гибкой тары. Разгрузатель включает процессы растаривания и подачи материала к месту назначения, включая подъем материала.

Техническим результатом разработки [8] является такое конструктивное исполнение камерного питателя, которое обеспечивает прием заполненной сыпучим материалом гибкой тары разных типоразмеров по высоте и извлечение порожней тары из приемной камеры под воздействием сжатого воздуха.

Камерный питатель (растариватель) пневмотранспортной установки [9] содержит приемную камеру 1 (рис. 1) с шарнирно смонтированной на ней крышкой 2. В приемную камеру 1 помещена гибкая (мягкая) емкость (тара) 3 с сыпучим материалом в закрытом состоянии. Разгрузочный трубопровод 4 смонтирован на крышке 2. Нагнетательный трубопровод 5 содержит патрубков 6 с нагнетательным соплом 7 с возмож-

ностью свободного перемещения вдоль него. Лезвие ножевого устройства 8 направлено вниз для разрезания верхней части гибкой тары 3.

Для отвода излишка воздуха по воздуховоду 9 дно 10 приемной камеры 1 снабжено патрубком 11. Для удаления гибкой тары 3 из камерного питателя приемная камера 1 снабжена диском 12 с юбкой 13. Установка диска 12 на определенном расстоянии от дна 10 камеры 1 обеспечивается винтовым устройством 14. Замкнутое пространство 15 приемной камеры 1 сообщается с разгрузочным трубопроводом 4 через вентиль 16 и с нагнетательным трубопроводом 5 посредством вентиля 17 воздуховода. Вентиль 18 транспортного трубопровода предназначен для перекрытия и подачи сжатого воздуха к нагнетательному соплу 7. Диск 12 имеет возможность свободного перемещения по вертикали до стопорного устройства 19. Диск 12 снабжен отверстием 20, перекрытым обратным клапаном 21.

При открытой крышке 2 тара 3, заполненная сыпучим материалом, в закрытом состоянии опускается в приемную камеру 1. При падении гибкой тары 3 в замкнутом пространстве между ее дном и диском 12 образуется излишек воздуха. Этот излишек воздуха через отверстие 20 обратного клапана 21 диска 12 отводится по патрубку 11 трубопровода 9 (пунктирная стрелка) через вентиль 16 в транспортный трубопровод 4. Крышка 2 закрывается. Патрубок 6 под действием собственного веса свободно перемещается вдоль нагнетательного трубопровода 5 вниз. Ножевое устройство 8 с усилием веса крышки 2 и патрубка 6 разрезает верхнюю часть гибкой тары. После открытия вентиля 18 при закрытых вентилях 16 и 17 воздух (сплошная стрелка) подается через патрубок 6 и нагнетательное сопло 7 внутрь гибкой тары 3. Верхние слои сыпучего материала в гибкой таре 3 аэрируются, приобретая текучесть, и вытесняются сжатым воздухом в транспортный трубопровод 4. Во время подачи сжатого воздуха в полость гибкой тары 3 ее стенки прижимаются к стенкам приемной камеры 1. После опорожнения тары 3 вентиль 18 закрывают, и подача сжатого воздуха через нагнетательное сопло 7 прекращается. Крышку 2 открывают при закрытых вентилях 17 и 18. В процессе подъема крышки 2 патрубок 6 с ножевым устройством 8 и нагнетательным соплом 7 опускается в полость нагнетательного трубопровода 5 (рис. 2).

При закрытых вентилях 16 и 18 подают сжатый воздух (сплошная стрелка) через открытый вентиль 17 в замкнутое пространство 15. Под действием сжатого воздуха диск 12 поднимается до стопорного устройства 19, поднимая при этом опорожненную гибкую тару 3 до верхнего положения для ее съема из камеры 1. Юбка 13 является направляющей, противодействуя

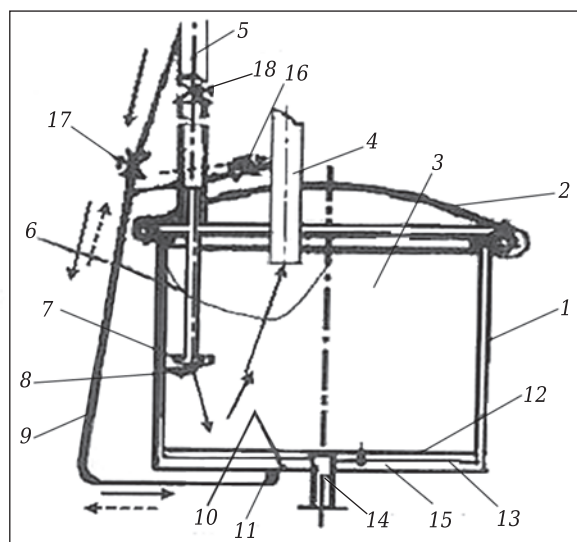


Рис. 1. Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки

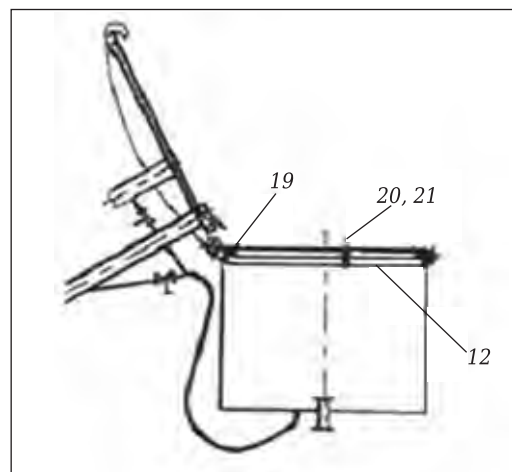


Рис. 2. Камерный питатель в разгрузочном состоянии

любому перекосу движущегося вверх диска 12. Установка диска 12 на определенном расстоянии от дна 10 камеры 1 обеспечивается установкой винтового устройства 14. При этом осуществляется разгрузка гибкой тары, различной по высоте.

Изучение процессов приема загруженной и извлечения опорожненной гибкой тары из камерного питателя на опытно-промышленной установке позволили сделать следующее заключение. Наличие диска 12 с юбкой 13, отверстия 20 с обратным клапаном 21 и стопорного устройства 19 (см. рис. 2) движения диска по высоте в предлагаемом устройстве упрощает не только процесс извлечения опорожненной тары 3 из камерного питателя, но и ее приема заполненной сыпучим материалом. Наличие винтообразного устройства 14 позволяет принимать заполненную сыпучим материалом гибкую тару 3 с различной высотой.

В известных устройствах [10–12] затруднительна ориентированная переустановка поперечных перфорированных вставок в заданном положении по высоте в зависимости от технико-экономических параметров подъемника, что приводит к уменьшению надежности его работы и увеличению расхода энергозатрат.

Авторы разработки [13] предложили поперечные вставки в виде решеток установить подвижно по высоте. Заданная высота должна быть выполнена с возможностью изменения расстояния $H_{\text{пер}}$ между ними в процессе перенастройки подъемного устройства, не превышающего величины, определяемой по зависимости

$$H_{\text{пер}} < H_0(1 + 9,52 \cdot 10^{-7} \left(\frac{W}{W_{\text{кр}}} - 1 \right)^{1,93}),$$

Расстояние $H_{\text{пер}}$ устанавливается с учетом изменения физико-механических свойств сыпучих материалов и гидродинамики несущей среды. При этом расстояние между поперечными перфорированными вставками не должно превышать 5 диаметров транспортного трубопровода.

Практика показала, что в вертикальных транспортных трубопроводах [10–12] при нарушении оптимального режима пневмоподъема происходит завал нижней части трубопровода, для ликвидации которого требуются энергозатраты. Это приводит к снижению производительности и уменьшению эффективности работы пневмотранспорта. Технический результат

разработки — увеличение производительности и эффективности работы пневмотранспорта за счет уменьшения или исключения завала нижней части трубопровода.

Авторы настоящей статьи предлагают устройство (рис. 3) для пневматического транспортирования сыпучих материалов, которое содержит смесительную камеру 1 с вертикальным транспортным трубопроводом 2. В нижней части смесительной камеры установлены патрубки 3 для подвода сжатого воздуха и газораспределительная пористая перегородка 4. В транспортном трубопроводе 2 рассредоточенно по его длине вмонтированы поперечные вставки 5. Поперечные вставки содержат кольца 6. На эти кольца 6 установлены шарнирно сегменты (лепестки) 7. Лепестки 7 размещены внахлест одного края с возможностью обеспечения их подвижности относительно друг друга и поперек трубопровода 2. При этом высота h лепестков 7 не должна превышать размера радиуса поперечного сечения транспортного трубопровода 2. Под воздействием движущейся материалогазовой смеси на лепестки 7 обеспечивается перекрытие и раскрытие поперечного сечения вертикального трубопровода 2. Под кольцами 6 на внутренней стенке 8 трубопровода установлен упорный элемент 9.

Сыпучий материал непрерывно подается в смесительную камеру 1. Через патрубок 3 подается сжатый воздух под газораспределительную пористую перегородку 4. Над ней сжатым воздухом аэрируется сыпучий материал до создания псевдоожиженного слоя. В таком виде сыпучий материал под действием избыточного давления в смесительной камере 1 и постоянного подпора материала в подпитывающей части 10 подается и движется по вертикальному трубопроводу. В транспортном режиме под действием материаловоздушной среды лепестки 7 расположены в поднятом состоянии и не препятствуют продвижению потока сыпучего материала. При нарушении транспортного режима подъема лепестки 7 под действием материаловоздушной среды в обратную сторону (вниз) резко опускаются и перекрывают поперечное сечение трубопровода. Упорный элемент 9 препятствует загибу лепестков вниз. Таким образом, лепестки 7 под действием материаловоздушной среды перекрывают или раскрывают поперечное сечение вертикального трубопровода 2.

Таким образом, выполнен анализ характеристик, назначения и применения в горных выработках вяжущих строительных материалов. Доставка вяжущих материалов и заполнителей в горные выработки производится мягкими контейнерами. Разработан пневматический разгрузатель для растаривания и подачи материала к месту назначения, включая подъем материала. Поперечные вставки в виде решеток предло-

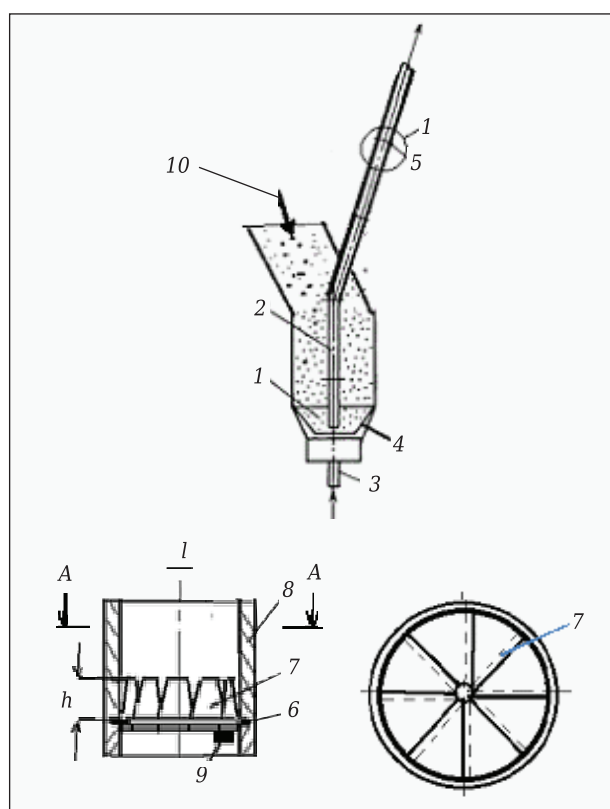


Рис. 3. Устройство для подъема материалогазовой смеси

жено устанавливать подвижно по высоте с возможностью изменения расстояния между ними в процессе перенастройки подъемного устройства, не превышающего некоторой величины.

Движение диска по высоте в предлагаемом устройстве упрощает не только процесс извлечения опорожненной тары из камерного питателя, но и ее приема заполненной сыпучим материалом.

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Сёмин. — М. : Изд. Фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.
3. **Давыдов, С. Я.** Транспортное и складское оборудование с пневморазгрузкой / С. Я. Давыдов, Ф. Л. Капустин, И. Д. Кашеев, С. Н. Селезнева // Новые огнеупоры. — 2010. — № 6. — С. 21–27.
4. **Давыдов, С. Я.** Исследования по растариванию гибкой тары / С. Я. Давыдов, Ф. Л. Капустин, И. Д. Кашеев, А. Г. Устинова // Новые огнеупоры. — 2007. — № 4. — С. 24–26.
5. **Пат. 2261214 Российская Федерация.** Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки / Давыдов С. Я., Кашеев И. Д., Капустин Ф. Л. — № 2003123474; заявл. 23.07.03; опубл. 10.02.05, Бюл. № 27.
6. **Пат. 2323151 Российская Федерация.** Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки / Давыдов С. Я., Капустин С. Я. — № 2006111682; заявл. 10.04.06; опубл. 27.04.08, Бюл. № 12.
7. **Пат. 2540889 Российская Федерация.** Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г., Симисинов Д. И. — № 2013115811; заявл. 08.04.13; опубл. 10.02.15, Бюл. № 4.
8. **Пат. 2537368 Российская Федерация.** Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г., Симисинов Д. И., Потапов В. Я., Костюк П. А. — № 2013125215; заявл. 30.05.13; опубл. 10.01.15, Бюл. № 1.
9. **Пат. 155128 Российская Федерация.** Камерный питатель нагнетательной пневмотранспортной установки / Давыдов С. Я., Филатов М. С. — № 2014151993; заявл. 22.12.14; опубл. 20.09.15, Бюл. № 26.
10. **Урбан, Я.** Пневматический транспорт / Я. Урбан. — М. : Машиностроение, 1967. — 256 с.
11. **Давыдов, С. Я.** Повышение эффективности транспорта глиноземной пыли / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашеев, А. А. Рукомойкин // Новые огнеупоры. — 2004. — № 5. — С. 9–12.
12. Расчеты аппаратов кипящего слоя : справочник ; под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. — Л. : Химия, 1986. — 91 с.
13. **Пат. 201015 Российская Федерация.** Устройство для подъема сыпучих материалов в транспортном трубопроводе / Тырцева К. Е., Давыдов С. Я., Гревцев Н. В., Горбунов А. В., Олейникова Л. Н., Горбунов А. А., Рахимова В. Т. — № 2020114057; заявл. 03.04.20; опубл. 23.11.20, Бюл. № 33. ■

Получено 18.12.20

© С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев,
Н. Г. Валиев, П. А. Костюк, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



27–29 января 2021 г.
Токио, Япония

Основные разделы выставки:

- + Функциональные материалы (био- и стройматериалы, бумага, ткань, нетканые технические материалы, полимеры, органические и неорганические материалы, гибридные материалы, материалы для вакуумного напыления и поверхностных покрытий, сверхтонкие изоляторы и проводники, краски, покрытия, добавки, наполнители, смолы и др.)
- + Нанотехнологии и оборудование для изготовления функциональных материалов
- + Технологии использования электромагнитных полей

www.worldexpo.pro

Д. т. н. А. И. Нижегородов¹ (✉), к. т. н. А. Н. Гаврилин², к. т. н. Б. Б. Мойзес²,
к. т. н. Г. М. Исмаилов³

¹ ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет», г. Томск, Россия

УДК 62-868; 67-05; 66-041

МОДУЛЬНО-СПУСКОВАЯ ПЕЧЬ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ СКОРОСТЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТОКОВ СЫПУЧИХ СРЕД ПО ТЕПЛОВЫМ ЗОНАМ

Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований температурных зон в рабочем пространстве модулей электрической спусковой печи. Выполнено распределение локальных потоков сыпучей среды по этим зонам в зависимости от их нагрева для повышения производительности и уменьшения энергоемкости рабочего процесса. Модернизирована модульно-спусковая печь с пластинчатыми ускорителями локальных потоков сыпучей среды, размещенными в ее модулях, к ней адаптирован барабанный дозатор с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами на барабане. На основе анализа падающих, эффективных и результирующих потоков в рабочих пространствах модулей методами алгебры лучистых потоков установлены причины формирования неоднородного теплового поля на огнеупорных поверхностях модулей обжига. Проведен анализ экспериментальных данных, подтверждающий выводы аналитического исследования, определена ширина каждой тепловой зоны. На примере вермикулита путем сопоставления поглощаемых им тепловых мощностей определены минимально достаточное время движения его частиц в каждой тепловой зоне и средние локальные скорости движения частиц в указанных зонах. Показан нелинейный характер распределения средних локальных скоростей потоков вермикулита по температурным зонам. Определены локальные производительности и полная производительность печи, равная 0,95 м³/с, которая на 27 % превышает производительность опытно-промышленной печи-аналога при равном потреблении электроэнергии.

Ключевые слова: модульно-спусковая электропечь, температурные зоны, пластинчатый ускоритель, тепловая мощность, средние локальные скорости, локальная производительность.

ВВЕДЕНИЕ

Электрические модульно-спусковые печи характеризуются тем, что движение термообрабатываемых сыпучих сред в них происходит под действием сил тяжести частиц. Поэтому с механической точки зрения они подобны гравитационным спускам, в которых скорость движения компонентов среды определяется углом наклона модулей, силами трения и некоторым незначительным встречным сопротивлением воздуха.

Движение потока сыпучей среды в таких печных агрегатах (вермикулита, сунгулит-вермикулитовых конгломератов, поросиликатов и др.) можно регулировать только управлением подачи сырья дозатором [1], что является

серьезным недостатком. Однако они лишены подвижных узлов и деталей, например подовых платформ [2], колебания которых в условиях высоких температур, запыленности и других неблагоприятных факторов нестабильны, что сказывается на режиме вибротранспортирования частиц среды в тепловом поле нагревателей, производительности, качестве вспучивания (вермикулита), расходе электроэнергии и других характеристиках рабочего процесса.

В самых первых модульно-спусковых электропечах в начале их освоения (2003–2006 гг.) было замечено, что распределение температур на нагревательных элементах и на огнеупорной поверхности модулей из шамотного кирпича, по которой и происходит движение частиц термообрабатываемой среды, является существенно неоднородным. Измерения температур термомпарами в работающих печах на разных участках показали, что в их центральных зонах температура огнеупорного основания достигала 700 °С и



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

выше, а в боковых 430–480 °С. Если термообработке подвергался вермикулит, то на выходе из печи в центральной зоне нижнего модуля готовый продукт был полностью вспученным и имел наименьшую плотность, но был перегретым и частично пережженным, особенно мелкие частицы, а в краевых зонах он недовспучивался, из-за чего приходилось увеличивать температуру нагревателей. Та же закономерность наблюдалась и в печах с подвижным подом [2], и управлять ею до сих пор не представлялось возможным.

Цель работы — исследование температурных зон в рабочем пространстве модульно-спусковых печей для распределения по зонам локальных разноскоростных потоков сыпучих сред и повышения таким путем производительности печей.

ОСНОВНЫЕ ИННОВАЦИИ

Устранение описанного недостатка и исправление связанных с ним характеристик рабочего процесса печного агрегата базируется на двух технических решениях, принципиально не изменяющих конструктивную структуру печи и практически не усложняющих ее.

Первое — это использование пластинчатых ускорителей движения сыпучей среды в рабочем пространстве модулей по зонам распределения температур: в зонах с повышенными температурами нагревателей и огнеупорного основания средние скорости потоков больше, чем в зонах с относительно низкими температурами. Средние локальные скорости определяют время прохождения частиц среды по модулям печи или время их термообработки. Поэтому частицы, например, вермикулита, движущиеся в более горячих зонах за меньшее время получают и поглощают ту же необходимую для полноценного вспучивания тепловую энергию и не подвергнутся пережогу. Теплота в центральных горячих зонах не будет избыточной, а это значит, что энергоэффективность печи возрастет. При переходе от центральных горячих зон к краевым зонам модулей, где температуры ниже, средние скорости локальных потоков частиц также должны быть ниже, а время на теплопоглощение должно быть несколько большим и достаточным для качественного вспучивания.

Второе техническое решение — это измененная конструкция барабана дозатора. Для обеспечения повышенной локальной (по зонам нагрева) производительности барабан выполнен с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами на его поверхности, причем наибольшую глубину имеют пазы, находящиеся над центральной пластиной верхнего ускорителя верхнего модуля, то есть над зоной, где частицы среды движутся с максимальной средней локальной скоростью и где подача исходного сырья максимальна.

Чем дальше от центральной зоны расположены пазы барабана дозатора, тем меньше их глубина. Самые крайние пазы имеют такую глубину, которая в барабанах дозаторов печей, не снабженных ускорителями, выдержана по всей поверхности барабана.

УСТРОЙСТВО И РАБОТА МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Печь содержит барабанный дозатор, по лотку 1 которого материал поступает на пластинчатый ускоритель частиц, закрепленный в верхней части модуля 2. Такие же ускорители установлены и на других модулях 3 и 4. Модули размещены в корпусе 5 под углом 45° к горизонту и содержат нагреватели 6 с крышками из керамовермикулитовых плит 7 (рис. 1–3), окантованными металлом 8. Стержневой нагреватель 6 выполнен в виде змеевика из нихрома и закреплен под крышкой зацепами 9 на серьгах и крепежных головках 10 (см. рис. 1 и 2) на расстоянии a от поверхности крышки. Сами серьги удерживаются в отверстиях 11 плит 7 за счет плоских зацепов 12. Крепежные головки обеспечивают контакт с нагревателем за счет резьбовых соединений 13 (см. рис. 2). Между нагревателями и огнеупорными основаниями модулей имеется зазор z (см. рис. 2), одинаковый по всей длине l . В верхней части каждого модуля установлен

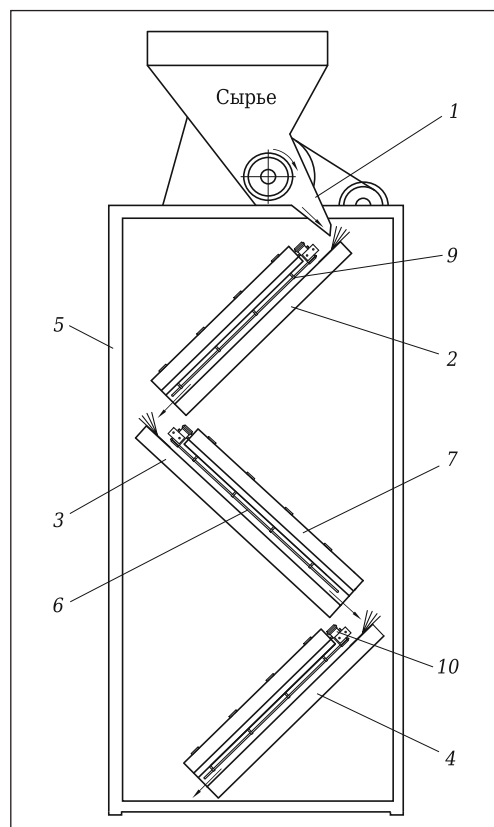


Рис. 1. Модульно-спусковая печь с пластинчатыми ускорителями сыпучей среды

пластинчатый ускоритель (см. рис. 1–3), состоящий из базовой пластины 14 (см. рис. 2), упора 15 с боковыми стенками 16 и набора жестко закрепленных пластин 17, 18 и 19 (см. рис. 2 и 3) с разными углами наклона α_2 , α_3 и α_4 .

Барабан дозатора выполнен с продольными ступенчато-переменными по глубине пазами 20, 21, 22 и 23 (см. рис. 3 и 4), при этом наиболь-

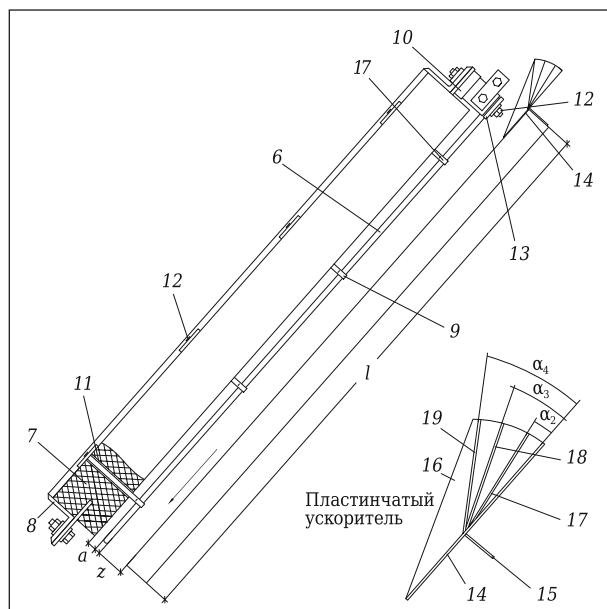


Рис. 2. Модуль (вид сбоку) и пластинчатый ускоритель (увеличено)

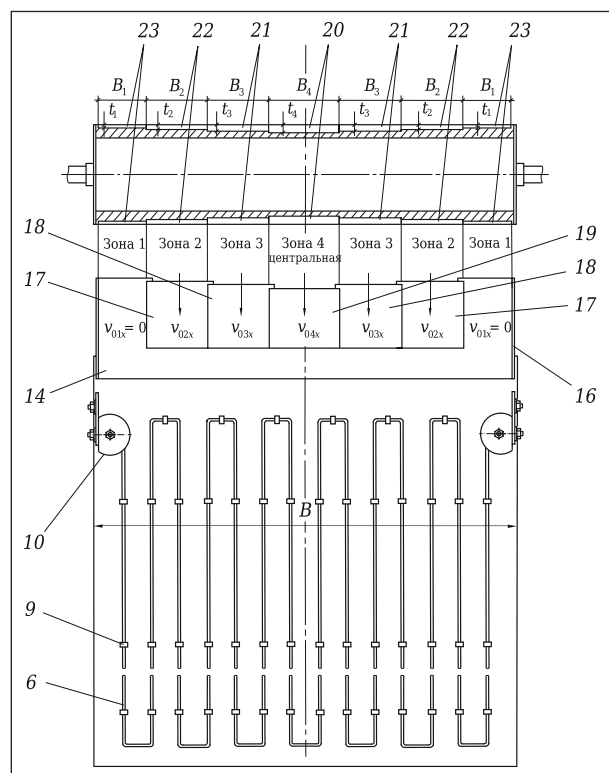


Рис. 3. Электрический нагреватель, огнеупорное основание модуля, пластинчатый ускоритель частиц сыпучей среды и продольный разрез барабана-дозатора

шая глубина t_4 у пазов 20, находящихся над центральной пластиной 19 пластинчатого ускорителя. Соседние пазы барабана 21, находящиеся над пластинами 18, имеют меньшую глубину t_3 . Соседние с ними пазы 22, находящиеся над пластинами 17, имеют еще меньшую глубину t_2 , а самые крайние пазы 23 характеризуются минимальной глубиной t_1 (см. рис. 3 и 4).

Число пластин ускорителя частиц сыпучей среды и соответствующее им количество пазов на барабане может быть другим, в зависимости от общей ширины модуля B . Кроме того, ширина пазов барабана B_1 , B_2 , B_3 , B_4 и соответствующая им ширина пластин также может быть разной в зависимости от общей ширины B и в зависимости от распределения температур по зонам № 1, 2, 3 и т. д.

В разогретой печи сырье, например вермикулитовый концентрат, по лотку дозатора поступает на ускоритель верхнего модуля и далее на его поверхность, по которой движется в тепловом поле нагревателя 6. Частично вспученный в нем вермикулит пересыпается на ускоритель ниже расположенного модуля 3, где также подвергается тепловому воздействию, а затем пересыпается на ускоритель нижнего модуля 4, из которого выходит уже готовый продукт. Продолжительность всего процесса в такой печи при длине модулей 950 мм, как показали измерения на опытно-промышленной печи, составляет примерно 3 с [3].

Частицы, попадающие на пластины 19 (см. рис. 2 и 3), находящиеся в центральной зоне № 4, должны получать наибольшую начальную скорость вдоль огнеупорных поверхностей v_{04x} из-за большего угла наклона α_4 , поэтому средняя локальная в этих зонах модулей скорость их движения должна быть больше, чем была бы, если бы пластинчатые ускорители отсутствовали. Из-за увеличения средней скорости частиц будет увеличена и локальная производительность в центральных зонах № 4, а время прохождения частиц по ним сократится.

В зонах № 3 модулей печи температура ниже, чем в самых нагретых зонах № 4, но суще-

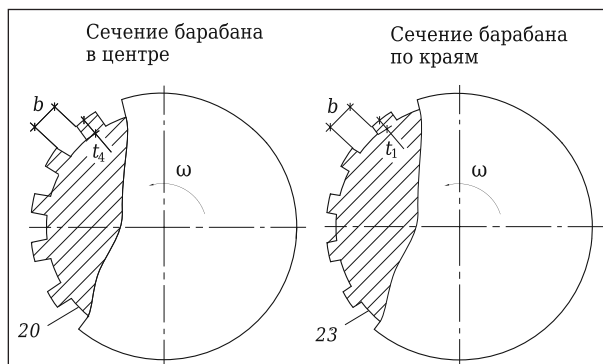


Рис. 4. Сечения барабана-дозатора в центральной части и по краям

ственно больше, чем в зонах № 2 и № 1. Поэтому здесь частицы, попадающие на пластины 18 (см. рис. 3 и 4) должны получать относительно меньшую начальную скорость v_{03x} из-за несколько меньшего угла наклона α_3 . Средняя локальная скорость движения частиц вермикулита по зонам № 3 ниже, чем в зонах № 4, но больше, чем была бы, если бы печь не была оснащена ускорителями. Из-за увеличения средней скорости частиц в зонах № 3 локальная производительность в этих зонах будет пропорциональна средней скорости движения, а время прохождения частиц по ним сократится. И так далее: средние локальные скорости от центра к периферии огнеупорных поверхностей модулей должны становиться все меньше.

Благодаря разному наклону пластин ускорителей можно обеспечить такое распределение средних локальных скоростей по температурным зонам модулей печи, что в более нагретых зонах вермикулит поглотит достаточное количество теплоты за меньшее время, но выйдет из печи качественно вспученным. Если рационально распределить средние локальные скорости движения частиц по зонам, локальная производительность печи должна возрасти, что приведет к повышению ее производительности в целом и уменьшит удельную энергоемкость термообработки материала.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН

Потоки падающих и эффективных излучений соответствующих поверхностей определяются по формулам алгебры лучистых потоков [4], Вт:

$$Q_{ni} = \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki}, \quad (1)$$

$$Q_{\varepsilon i} = \rho_i \sum_{k=1}^j Q_{\varepsilon k} \varphi_{ki} + Q_{ci}, \quad (2)$$

где ρ_i — отражательная способность i -той поверхности; φ_{ki} — средний угловой коэффициент излучения, учитывающий долю эффективного излучения других поверхностей, достигающего

данной поверхности; $Q_{\varepsilon k}$ — эффективный поток с поверхности k , падающий на поверхность i ; Q_{ci} — поток собственного излучения.

Мощность падающего от нагревателей на огнеупорное основание теплового излучения для условной рабочей камеры, расположенной в центральной зоне (камера 0, рис. 5), определяется по выражению, Вт:

$$Q_{п3} = Q_3 \varphi_{13} + Q_{34} \varphi_{43} + 2Q_{\varepsilon 3} \varphi_{с3} + 2Q_{\varepsilon 3B} \varphi_{B3} + 2Q_{\varepsilon 3A} \varphi_{A3}, \quad (3)$$

при этом двойки, входящие в члены равенства означают, что три соседние рабочие камеры с двух сторон (слева и справа) добавляют свою тепловую мощность. Влияние четвертых, пятых и остальных камер не учитывается, так как уже 4-я камера имеет угловой коэффициент почти на два порядка меньше углового коэффициента φ_{A3} .

Для крайней пристеночной камеры 3, расположенной в зоне № 1 (см. рис. 3, 5 и 6), выражение мощности падающего теплового потока (3) изменится, так как в нее тепловое излучение приходит от трех соседних камер только с одной стороны:



Рис. 6. Экспериментальные значения температур на огнеупорной поверхности и стержнях нагревателя среднего модуля опытной печи

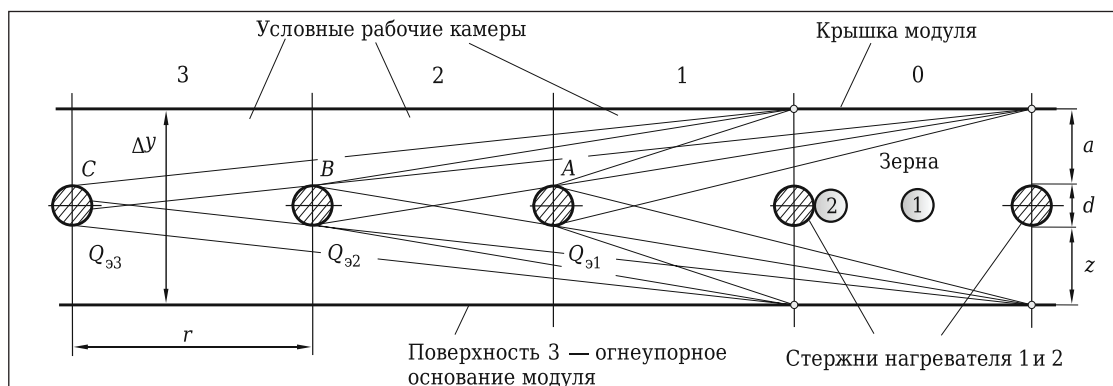


Рис. 5. Схема к расчету угловых коэффициентов лучистых потоков, тепловых мощностей и температур

$$Q_{п3} = Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + Q_{э\phi_{C3}} + Q_{э\phi_{B3}} + Q_{э\phi_{A3}}. \quad (4)$$

Тогда формулы мощности эффективных потоков с огнеупорных поверхностей 3 (см. рис. 5) будут иметь вид:

– для нулевой камеры, расположенной в центральной зоне модуля:

$$Q_{э3} = 2\rho_3 Q_{э\phi_{13}} + \rho_3 Q_{э\phi_{43}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{C3}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{B3}} + 2\rho_3 Q_{э\phi_{A3}}, \quad (5)$$

где ρ_3 — отражательная способность шамотного кирпича, образующего огнеупорную поверхность модулей печи;

– для пристеночной камеры в зоне № 1:

$$Q_{э3} = \rho_3 Q_{э\phi_{13}} + \rho_3 Q_{э\phi_{43}} + \rho_3 Q_{э\phi_{C3}} + \rho_3 Q_{э\phi_{B3}} + \rho_3 Q_{э\phi_{A3}}. \quad (6)$$

Так как все стержни-нагреватели модулей имеют диаметр d , то и мощности лучистых потоков от них равны:

$$Q_{э} = Q_{эC} = Q_{эB} = Q_{эA} = \varepsilon_n \sigma T^4 f (1 + \rho_n \phi_{12}), \quad (7)$$

где σT^4 можно выразить через параметры трехфазной электрической сети — силу тока I и напряжение U :

$$\sigma T^4 = 3 \frac{I \cdot U}{f}, \quad (8)$$

где f — суммарная площадь поверхностей всех проволочных нагревателей печи, определяемая по выражению, m^2 , $f = 3\pi d n (2l + 2l_0 + r)$; 3 — количество модулей в печи; d — диаметр нихромовых стержней нагревателей (5,05 мм); πd — периметр сечения стержня; n — количество пар стержней в одном нагревателе (10 шт.); l — длина огнеупорной поверхности (0,95 м); l_0 — длина консолей нагревателей (0,02 м); r — расстояние между осями стержней (0,05 м). Все размеры даны для опытной электропечи с верхней нагревательной системой. При этих значениях площадь равна 0,966 m^2 .

Формулу (7) теперь можно представить в виде:

$$Q_{э} = Q_{эC} = Q_{эB} = Q_{эA} = 3IU\varepsilon_n (1 + \rho_n \phi_{12}),$$

где ε_n — степень черноты нихрома, равная 0,96; ρ_n — отражательная способность нихрома (0,04) [5]; ϕ_{12} — угловой коэффициент от одного нагревателя к другому (соседнему), равный 0,032. При $I = 185$ (85) А, напряжения $U = 220$ В.

Результирующие потоки определяются разностью [4] $Q_{p3} = Q_{п3} - Q_{э3}$ и формулы результирующих потоков с поверхности 3 (см. рис. 5), примут вид:

– для нулевой камеры, расположенной в центральной зоне модуля:

$$Q_{p3} = (1 - \rho_3)(2Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + 2Q_{э\phi_{C3}} + 2Q_{э\phi_{B3}} + 2Q_{э\phi_{A3}}), \quad (9)$$

– для пристеночной камеры в зоне № 1:

$$Q_{p3} = (1 - \rho_3)(Q_{э\phi_{13}} + Q_{э\phi_{43}} + Q_{э\phi_{C3}} + Q_{э\phi_{B3}} + Q_{э\phi_{A3}}). \quad (10)$$

Если учесть, что член $Q_{э\phi_{43}}$ — это отраженное поверхностью крышки модуля тепловое излучение и оно несущественно влияет на температуры всех зон огнеупорных оснований, то им в дальнейших расчетах можно пренебречь, так как основные потоки тепловой мощности создают электрические нагреватели.

Соотнеся выражения (9) и (10), то есть мощности результирующих потоков на поверхностях 3 центральной и пристеночной камер (см. рис. 5) при $\rho_3 = 0,35$ [5], размерах $z = 5$ мм, $a = 24,95$ мм и $\Delta y = 35$ мм и угловых коэффициентах, определенных по правилу натянутых нитей [6] и равных $\phi_{13} = 0,271$, $\phi_{A3} = 0,024$, $\phi_{B3} = 0,0077$ и $\phi_{C3} = 0,0031$, получим отношение 2,0004, а сами мощности Q_{p3} равны соответственно в камере 0 — 21436 Вт и в камере 1 — 10716 Вт.

Тенденцию к снижению мощности результирующих потоков в камерах 2 и 1 относительно нулевой камеры покажут соответствующие отношения выражений (9) и (10). Это значит, что мощности результирующих лучистых потоков при переходе от центральной зоны модулей к периферии неизменно снижаются, а следовательно, снижаются и температуры.

Аналитическое исследование мощностей падающих, эффективных и результирующих лучистых потоков и сама схема (см. рис. 5) объясняют причину неоднородного распределения температур на огнеупорных поверхностях модулей.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 6 показана схема распределения температур на огнеупорной поверхности модуля и температур стержней нагревателя среднего модуля опытной печи с верхней нагревательной системой, полученных экспериментальным путем. Здесь же выделены зоны примерно равных температур стержней нагревателя.

Температура на поверхности огнеупорного основания изменяется не только по ширине модуля по зонам, но также и по его длине l . Например, по осевой линии температура изменяется снизу вверх от 695 до 697 °С, проходя через максимум 712 °С. Это связано с тем, что на температуру огнеупорной поверхности из шамотного кирпича влияет встречная к движению вермикулита воздушная тяга, вызванная разностью плотностей воздуха в верхней и нижней частях модулей. Но в работе [7] показано, что доля отраженных от поверхностей основания и крышки модуля потоков в общей мощности теплового излучения, падающего на термообрабатываемую среду с учетом излучения нагревательных элементов, составляет менее 10 %. Поэтому изменение температуры на огнеупорных поверхностях модулей малосущественно, и при выделении

температурных зон следует ориентироваться на нагрев стержней нагревателя, которые хотя и в меньшей степени, но тоже имеют тенденцию к уменьшению от центра к краям (см. рис. 6).

Центральная зона № 4 самая широкая, так как охватывает шесть стержней с равной температурой (746 °С). Зона № 3 уже зоны № 4 и охватывает четыре стержня с относительно близкой температурой, но таких зон две, так как вторая находится справа от оси симметрии модуля (на рис. 6 не показана). Зоны № 2 и № 1 почти одинаковы по ширине, и их тоже по две. Тенденция распределения температуры стержней нагревателя соответствует распределению температуры на огнеупорной поверхности, но перепад здесь менее значительный.

Исходя их пропорций на рис. 6 с учетом ширины модулей опытно-промышленной печи, принятой в качестве аналога ($B = 0,95$ м), определим ширину каждой зоны (см. рис. 3): $B_4 = 0,21$ м, $B_3 = 0,15$ м, $B_2 = 0,12$ м и $B_1 = 0,10$ м.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ

Чтобы установить, как должна распределяться средняя скорость движения частиц термообрабатываемых сыпучих сред по зонам модулей, нужно знать количество поглощенной ими тепловой энергии для завершения химико-минералогических процессов, которые делают конечный продукт кондиционным. Для каждого материала эта скорость и поглощенная энергия будут иметь свои значения. Проведем расчет для наиболее изученного минерала вермикулита.

В работе [8] рассматривали перенос теплоты на поток вермикулита и поглощение им тепловой энергии Q_n с учетом степени черноты ε_n (0,768) и отражательной способности вспучивающегося минерала, и было получено выражение, Вт:

$$Q_n = 0,67\alpha_n\sigma T^4 f\varepsilon_n(1 + \rho_n\varphi_{12})(2\varphi_{1B} + \varphi_{2B}),$$

где α_n — поглощательная способность вермикулита или степень черноты ε_n ; σ — постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К); T — температура на поверхности стержней нагревателей печи, К; f — суммарная площадь поверхностей всех стержней нагревателей, м²; ε_n — степень черноты нихрома (0,96); ρ_n — его отражательная способность (0,04) [5]; φ_{12} — угловой коэффициент для лучистых потоков от одного стержня нагревателя к другому (см. рис. 5); φ_{1B} — угловой коэффициент стержней нагревателей слева и справа относительно вермикулитового зерна 1, расположенного между ними (см. рис. 5); φ_{2B} — угловой коэффициент нагревателей слева и справа относительно вермикулитового зерна 2, расположенного в контакте со стержнем.

Приведенная формула отражает зависимость тепловой мощности, поглощенной вермикулитом, минимально достаточной для полноценного вспучивания за время его движения по модулям печи, соответствует выражению, полученному в работе [8], и не учитывает влияние отраженных от огнеупорного основания и крышки лучистых потоков.

Поглощенная тепловая энергия, достаточная для качественного вспучивания вермикулита, должна быть одинакова для любой из зон и равна, Дж:

$$E_n = Q_{n1}t = Q_{n2}t_2 = Q_{n3}t_3 = Q_{n4}t_4, \quad (11)$$

где t — среднее локальное время движения вермикулита в первой зоне, равное времени обжига в печи, не снабженной пластинчатыми ускорителями; t_2 , t_3 и t_4 — среднее локальное время движения вермикулита в зонах с пластинчатыми ускорителями 2, 3 и 4 (см. рис. 3).

Значение энергии E_n в данном случае вычислять не нужно, так как необходимое среднее локальное время движения в зонах можно найти из пропорций, взятых из равенства (11):

$$t_2 = Q_{n1}t / Q_{n2},$$

$$t_3 = Q_{n1}t / Q_{n3},$$

$$t_4 = Q_{n1}t / Q_{n4}.$$

Определим средние значения температур стержней нагревателей по зонам (см. рис. 6). В зоне № 4 $T = 746 + 273 = 1029$ К, в зоне № 3 $T = (728 + 739 + 743 + 746)/4 + 273 = 1019$ К, в зоне № 2 $T = (707 + 720)/2 + 273 = 986$ К и в зоне № 1 $T = (637 + 691)/2 + 273 = 937$ К.

Подставив полученные значения температуры в формулу (11) и вычисляя отношения Q_{n1} / Q_{n2} , Q_{n1} / Q_{n3} , Q_{n1} / Q_{n4} , получим:

$$t_2 = tQ_{n1} / Q_{n2} = 0,81t, \quad (12)$$

$$t_3 = tQ_{n1} / Q_{n3} = 0,74t, \quad (13)$$

$$t_4 = tQ_{n1} / Q_{n4} = 0,71t. \quad (14)$$

Из соотношений (12)–(14) следует, что время прохождения частиц потока по зонам 2, 3 и 4 в модулях должно быть меньше на 19, 26 и 29 %, чем в первой зоне соответственно.

Полное время прохождения вермикулита по модулям опытно-промышленной печи равно 2,74 с [3]. Если угол $\alpha = 0$ (см. рис. 2), то среднее время движения по одному модулю будет равно 0,913 с, а при длине l огнеупорной поверхности модуля 0,95 м средняя скорость будет равна 1,04 м/с. Указанные значения $t = 0,913$ с и $v_{cp} = 1,04$ м/с соответствуют зонам № 1 (см. рис. 3) для печи с пластинчатыми ускорителями.

Следовательно, для зон № 1, № 2, № 3 и № 4 среднее время движения локальных потоков должно составлять $t_1 = 0,913$ с, $t_2 = 0,74$ с, $t_3 = 0,68$ с и $t_4 = 0,64$ с соответственно. Отношение l/t дает значения средних локальных скоростей

потоков частиц сыпучей среды в соответствующих зонах: $v_{ср1} = 1,04$ м/с, $v_{ср2} = 1,28$ м/с, $v_{ср3} = 1,40$ м/с и $v_{ср4} = 1,48$ м/с.

Так как частицы на границах зон взаимодействуют друг с другом, то эпюра распределения скоростей по ширине модулей имеет вид, подобный эпюре скоростей при течении жидкости в турбулентном режиме (рис. 7).

Достигнуть такого нелинейного распределения скоростей потоков сыпучей среды в рабочем пространстве модулей печи можно заданием углов наклона пластин ускорителей α_2 , α_3 и α_4 , так именно они влияют на начальные скорости частиц v_{02x} , v_{03x} и v_{04x} .

На рис. 8 показана векторная схема, иллюстрирующая изменение начальной скорости на пластинах ускорителя 17, 18 и 19 (см. рис. 2 и 3). Чем больше угол α , тем больше и начальная скорость v_{0x} их движения по огнеупорной поверхности в направлении x .

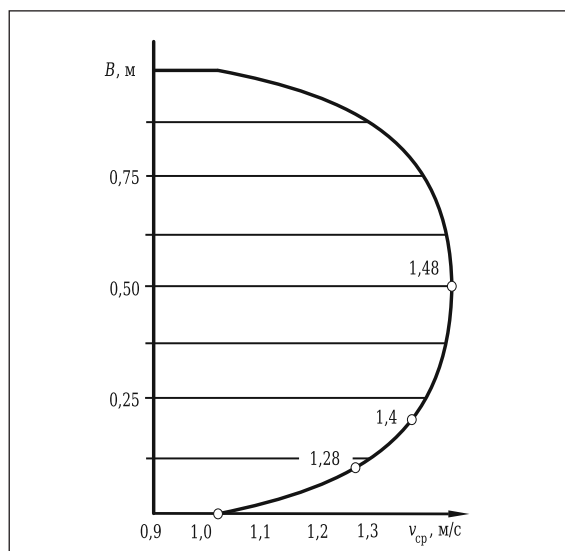


Рис. 7. Распределение локальных скоростей потоков частиц

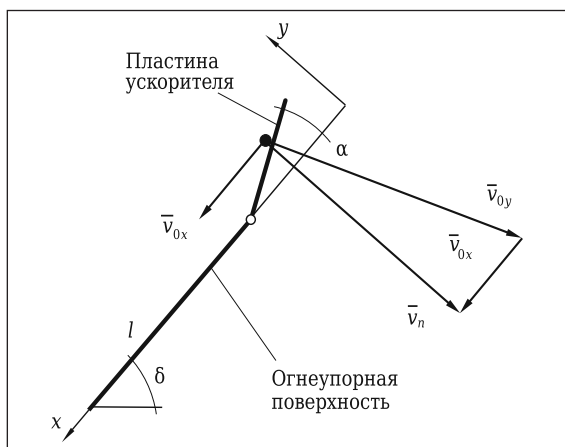


Рис. 8. Образование начальной скорости частицы на пластине ускорителя

Уравнение движения частицы по поверхности модуля без учета сопротивления движению частицы от воздуха:

$$m\ddot{x} = mg \cdot \sin \delta - mgf \cdot \cos \delta,$$

где m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; δ — угол наклона модулей к горизонту; f — приведенный коэффициент трения скольжения-качения, определенный экспериментально и приведенный в работе [3], $f = 0,51$; $\ddot{x}$ — координата частицы на поверхности модуля, м.

Решение этого уравнения тривиально [9], поэтому выражение для описания скорости будет иметь вид, м/с:

$$v_x = g(\sin \delta - f \cdot \cos \delta)t + v_{0x}, \quad (15)$$

где v_x — локальная конечная скорость частицы в зоне, соответствующей своему времени движения, $t_1 = 0,913$ с, $t_2 = 0,74$ с, $t_3 = 0,68$ с и $t_4 = 0,64$ с; v_{0x} — начальная скорость на соответствующей пластине ускорителя с углом наклона α_1 , α_2 , α_3 или α_4 .

Средняя скорость в каждой зоне может быть найдена по формуле:

$$v_{ср} = (v_x + v_{0x}) / 2. \quad (16)$$

Совместное решение выражений (15) и (16) дает уравнение:

$$v_{0x} = v_{ср} - \frac{1}{2}gt(\sin \delta - f \cdot \cos \delta).$$

Так как значения t и $v_{ср}$ известны, определим начальные скорости при угле наклона модулей к горизонту $\delta = 45^\circ$: в зоне № 1 $v_{01x} = 0$, в зоне № 2 $v_{02x} = 0,024$ м/с, в зоне № 3 $v_{03x} = 0,246$ м/с, в зоне № 4 $v_{04x} = 0,4$ м/с.

Полученные значения начальных скоростей, обеспечиваются соответствующими углами наклона пластин ускорителя при настройке опытного образца печи.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ПОЛНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЕЙ ПЕЧИ

При ширине модулей $B = 95$ см (как у опытно-промышленной печи [3]) производительность без пластинчатых ускорителей на вермикуловом концентрате, например марки КВК-4 (4 — условное число, отражающее крупность концентрата), составляет $0,75$ м³/ч. Тогда приведенная к единице ширины часовая производительность $\Pi_{пр}$ будет равна $0,75/95 = 0,0079$ м³/(см·ч).

Так как локальные средние скорости по зонам № 2, № 3 и № 4 увеличиваются относительно первой зоны на 23, 35 и 42 % соответственно, то локальные производительности с учетом ширины зон ($B_4 = 21$ см, $B_3 = 15$ см, $B_2 = 12$ см и $B_1 = 10$ см), будут равны, м³/ч: в четвертой зоне $\Pi_4 = 0,0079 \cdot 21 \cdot 1,42 = 0,24$, в двух третьих зонах $\Pi_3 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 15 \cdot 1,35 = 0,32$, в двух вторых зонах

$P_2 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 12 \cdot 1,23 = 0,23$, в двух первых зонах
 $P_1 = 2 \cdot 0,0079 \cdot 10 \cdot 1,0 = 0,16$. Полная производительность печи P будет равна $0,24 + 0,32 + 0,23 + 0,16 = 0,95 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Увеличение производительности печи за счет более быстрого движения потоков вермикулита в наиболее раскаленных зонах модулей составляет $0,95 \text{ м}^3/\text{ч}$, а это на 27 % больше, чем у опытно-промышленной печи, взятой за аналог. При этом расход электроэнергии не возрастает, а следовательно, и удельная энергоемкость процесса вспучивания увеличится на те же 27 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизирована электрическая модульно-спусковая печь с повышенной производительностью и уменьшенной удельной энергоемкостью термообработки.

Аналитическое исследование падающих, эффективных и результирующих потоков нагревателей и огнеупорного основания модулей выявило причину неоднородности теплового поля на поверхностях модулей обжига, которая заключается в неравном распределении результирующих потоков по зонам — в центре и на периферии модулей. Проведенный анализ экспериментальных данных подтвердил выводы аналитического исследования и показал, как

можно определить ширину выделенных тепловых зон с примерно равными температурами.

Определены необходимое и достаточное время движения вермикулита в каждой тепловой зоне и средние локальные скорости его движения в указанных зонах. Получена эпюра распределения средних локальных скоростей потоков вермикулита, указывающая на его нелинейный характер.

Определены локальные (по зонам) производительности и полная производительность печи, равная $0,95 \text{ м}^3/\text{с}$, которая на 27 % превышает производительность опытно-промышленной печи-аналога при равном потреблении электроэнергии.

Незначительная модернизация печи, практически не усложняющая ее конструкцию, позволила за счет двух инновационных технических решений получить новый печной агрегат, отличающийся большей производительностью и энергоэффективностью.

Подход к распределению локальных средних скоростей потоков сыпучей среды, основанный на равенстве поглощаемой материалом тепловой энергии, может быть применен и для оптимизации конструкции еще более энергоэффективных электрических печей с подвижными подовыми платформами.

Библиографический список

1. **Nizhegorodov, A. I.** Theory and practical use of modular-pouring electric furnaces for firing vermiculite / A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 361–365.
2. **Nizhegorodov, A. I.** Application and production technology of thermal activation products of serpentine minerals from industrial waste / A. I. Nizhegorodov, A. N. Gavrilin, B. B. Moyzes // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering.* — 2018. — Vol. 329, № 5. — P. 67–75.
3. **Нижегородов, А. И.** Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов / А. И. Нижегородов, А. В. Звездин. — Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2015. — 250 с.
4. **Телегин, А. С.** Теплоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 455 с.
5. **Кутателадзе, С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справочное пособие / С. С. Кутателадзе. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 367 с.
6. **Крейт, Ф.** Основы теплопереноса / Ф. Крейт, У. Блэк ; пер. с англ. — М. : Мир, 1983. — 512 с.
7. **Нижегородов, А. И.** Моделирование переноса лучистой энергии на сыпучую среду в электропечах с верхним положением излучающих элементов / А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2020. — № 2. — С. 10–14.
8. **Zvezdin, A. V.** Analytical model of absorption-reflection properties of vermiculite under thermal radiation conditions / A. V. Zvezdin, T. B. Bryanskikh, A. I. Nizhegorodov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 19–24.
9. **Звездин, А. В.** Аналитическая модель поглотительно-отражательной способности вермикулита в условиях теплового излучения / А. В. Звездин, Т. Б. Брянских, А. И. Нижегородов // *Новые огнеупоры.* — 2017. — № 1. — С. 15–20.
9. **Лойцянский, Л. Г.** Курс теоретической механики. Т. 2 : Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. — М. : Наука, 1983. — 640 с. ■

Получено 31.10.20

© А. И. Нижегородов, А. Н. Гаврилин,
 Б. Б. Мойзес, Г. М. Исмаилов, 2020 г.

Д. т. н. Ю. Е. Пивинский¹ (✉), к. т. н. В. А. Дороганов²,
к. т. н. Е. А. Дороганов², П. В. Дякин¹

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

² ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия

УДК 666.762.1:666.792.32

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ СОВМЕСТНЫХ ДОБАВОК ГЛИНЫ И КОМПЛЕКСНОГО ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО РАЗЖИЖИТЕЛЯ (КОМР) В ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМОБЕТОНОВ (Обзорная статья)

Обнаружена исключительная эффективность сочетания добавок глины совместно с введением разжижающих добавок комплексного органоминерального состава (КОМР). Применительно к прессованным высокоглиноземистым керамобетонам при давлении прессования 30 МПа достигнуты значения исходной пористости 14–15 %. В зависимости от состава масс и содержания добавок глины при сопоставительной их влажности в процессе статического прессования пористость материала с добавкой КОМР примерно равна пористости материала без добавки под давлением прессования в 3–6 раз ниже давления на материал с добавкой.

Ключевые слова: ВКВС, комплексный органоминеральный разжижитель (КОМР), керамобетон, реологические свойства.

В области производства и применения новых огнеупорных бетонов в настоящее время доминирует тенденция применения не столько виброналивных, сколько саморастекающихся или литых [1–4]. В связи с этим особое внимание уделяют разработке и освоению новых видов дефлокулянтов, которые характеризуются, как правило, сложным (композиционным) составом и существенно большей эффективностью по сравнению с традиционными.

Применительно к производству многих типов неформованных огнеупоров весьма перспективными и широко востребованными (в том числе и в РФ) являются производимые фирмой Almatiss (Германия) диспергирующие (дефлокулирующие) глиноземы семейства ADS и ADW [1, 5–7]. Они многофункциональны по своему назначению и характеризуются сложным (композиционным) органо-минеральным составом в отличие от традиционных разжижающих добавок, состоящих из небольшого количества химических веществ — фосфатов, лимонной кислоты, цитрата натрия органических добавок и т. д. Для таких дефлоку-

лянтов характерен синергетический разжижающий эффект, состоящий в том, что суммарный эффект влияния превосходит эффект влияния каждого из имеющихся в системе компонентов. При этом для них характерен электростерический механизм стабилизации, в котором эффективно совмещаются как электростатический, так и стерический [1, 7–10].

Эффективное сочетание двух разнородных добавок разжижителей было обнаружено при получении и исследовании смешанных ВКВС в системе электрокорунд – высокодисперсное кварцевое стекло [11]. Если в процессе измельчения ВКВС оптимальное значение pH регулировали добавкой жидкого стекла, то в процессе стабилизации дополнительно вводили небольшую по массе (менее 0,01 %) добавку лимонной кислоты. При этом пористость отливки была понижена с 20 до 17,5 %, а ее предел прочности при изгибе повышен от 2,6 до 4,6 МПа. Применительно к этой системе значительный эффект был обнаружен и при введении в состав ВКВС 1 %-ной добавки высокодисперсной часов-ярской глины (содержание частиц менее 1 мкм >70 %), что способствовало повышению седиментационной устойчивости ВКВС, понижению пористости отливки на 1,5 % и увеличению на 40–50 % прочности материала после обжига [12].

Применительно к технологии высокоглиноземистых ВКВС и многочисленных материалов на их основе разработан и детально



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

исследован [1, 7, 8, 13, 14] комплексный органо-минеральный разжижитель КОМР (патент 2238921 РФ фирмы «Керамбет-Огнеупор»). Он получен при помощи оптимального сочетания триполифосфата натрия (ТПФ), традиционно применяемого в технологии высокоглиноземистых керамобетонов [1], и органического пластификатора СБ-3 или СБ-5, синтезированного на основе кубовых остатков резорциновых смол и весьма эффективного модификатора для цементных бетонов. Основные закономерности и механизм разжижения ВКВС добавками КОМР сформулированы в работах [14, 15].

В технологии прессованных высокоглиноземистых керамобетонов или набивных (вибропневмотрамбованных) масс с целью оптимизации процесса применяют не только разжижение исходных ВКВС, но и пластификацию масс на их основе. В этом отношении весьма эффективными оказались КОМР, которые в сочетании с добавками традиционно применяемой для этой цели огнеупорной глины усиливают эффект пластификации. В работах [16, 17] исследовали ВКВС на основе высокоглиноземистого шамота ($75,5\% \text{ Al}_2\text{O}_3$), характеризующуюся при $C_V = 0,71$ дилатантными свойствами (значения $\eta_{\text{эфф}}$ при значениях $\dot{\epsilon} = 1$ и $400 \text{ с}^{-1} \approx 1,8$ и $10 \text{ Па}\cdot\text{с}$ соответственно (рис. 1). После введения 3 % огнеупорной глины влажностью 50 % при значении $C_V = 0,69$ ВКВС характеризовалась ярко выраженной тиксотропией ($\eta_{\text{эфф}}$ при $\dot{\epsilon} \approx 1 \text{ с}^{-1}$ около $30 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

Эффективность совместного введения в состав ВКВС как глины, так и КОМР подтверждается экспериментальными данными (рис. 1). Максимальное различие между реологическими свойствами сравниваемых суспензий характерно для участка тиксотропного течения (значения $\dot{\epsilon}$ до 9 с^{-1}), а в области $\dot{\epsilon} < 3 \text{ с}^{-1}$ вязкость суспензии без введения КОМР (см. рис. 1, а, кривая 1) в 90–150 раз превышает $\eta_{\text{эфф}}$ для ВКВС с добавкой КОМР (см. рис. 1, б, кривая 1). По мере повышения $\dot{\epsilon}$ показатели соотношения вязкости понижаются в области $\dot{\epsilon} > 400 \text{ с}^{-1}$ и достигают 2,5–3,0. Если для суспензий без введения КОМР характерен чисто тиксотропный характер течения (см. рис. 1, а), то для суспензии с разжижающей добавкой — тиксотропно-дилатантный (см. рис. 1, б). Минимальная вязкость ее достигается при $\dot{\epsilon} = 20\text{--}30 \text{ с}^{-1}$. При этом следует отметить, что показатели вязкости для ВКВС, содержащих глину и КОМР (см. рис. 1, б, кривые 2–4), даже при максимальных значениях скорости сдвига многократно ниже показателей вязкости смешанных суспензий без КОМР при тех же значениях $\dot{\epsilon}$ (см. рис. 1, а, кривые 2–4). Разжижающий эффект комплексной органо-минеральной добавки для смешанных суспензий в системе высокоглиноземистый шамот – огнеупорная глина несравненно выше, чем для исходной ВКВС высокоглиноземистого шамота. Для исходной ВКВС введение КОМР при

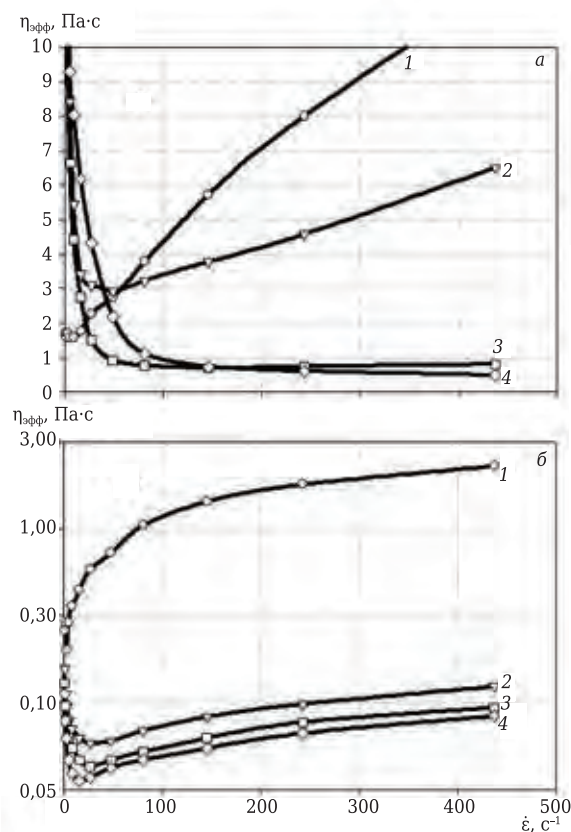


Рис. 1. Сопоставительная оценка зависимости эффективной вязкости $\eta_{\text{эфф}}$ от скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ для исходной ВКВС (1) и с добавками ЛТ-0: 2 — 1 %; 3 — 3 %; 4 — 5 % (а) и дополнительной оптимальной добавкой КОМР (б)

$\dot{\epsilon} = 1\text{--}9 \text{ с}^{-1}$ приводит к 4–7-кратному уменьшению вязкости, для смешанной суспензии это соотношение составляет от 80 до 150, т. е. примерно в 20 раз больше.

Как и в случае ВКВС боксита [15], эффект введения КОМР обусловлен тем, что в литейной системе достигается повышение объемной доли кинетически свободной жидкости $C_{\text{вк}}$ за счет эквивалентного уменьшения кинетически связанной жидкости C_{ws} . Последнее обуславливает резкое уменьшение вязкости суспензии (при неизменной влажности) и понижение пористости отливки, формируемой в пористой форме.

Известно, что пористость отливок, формируемых методом литья в пористых формах, в основном определяется исходной концентрацией суспензии и вязкостью при низких значениях скорости или напряжения сдвига. С учетом того, что введение добавок глины сопровождается как понижением объемной концентрации суспензии, так и значительным ростом вязкости (тиксотропия), пористость отливок возрастает. В процессах же прессования или вибропневмотрамбования керамобетонов, при которых достигается минимальная вязкость разрушенной тиксотропной структуры матричной системы исходных пластифицированных формовочных систем, достигается большая степень уплотнения (меньшая

пористость), чем в случае систем, не содержащих глину. При этом значительный дополнительный эффект достигается сочетанием добавок глины и КОМР (рис. 2) [16]. Исходная пористость отливки при введении добавок глины (см. рис. 1, б, кривая 1) существенно (на 4,5 %) повышается уже при 1 %-ном содержании глины, а при 5 %-ном — увеличивается до 26 % (общее увеличение 9 %). Введение оптимальной (0,02 мас. %) добавки КОМР применительно к исходному (без добавки глины) составу сопровождается понижением

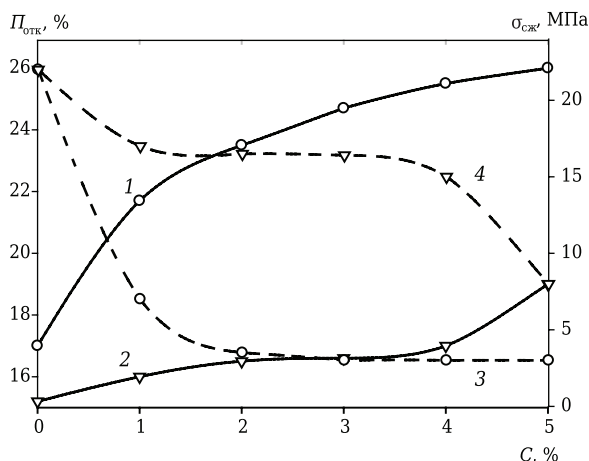


Рис. 2. Влияние содержания огнеупорной глины C в ВКВС высокоглиноземистого шамота на $P_{отк}$ (1, 2) и $\sigma_{сж}$ (3, 4) отливок, полученных из ВКВС без добавки (1, 3) и с оптимальным содержанием КОМР (2, 4)

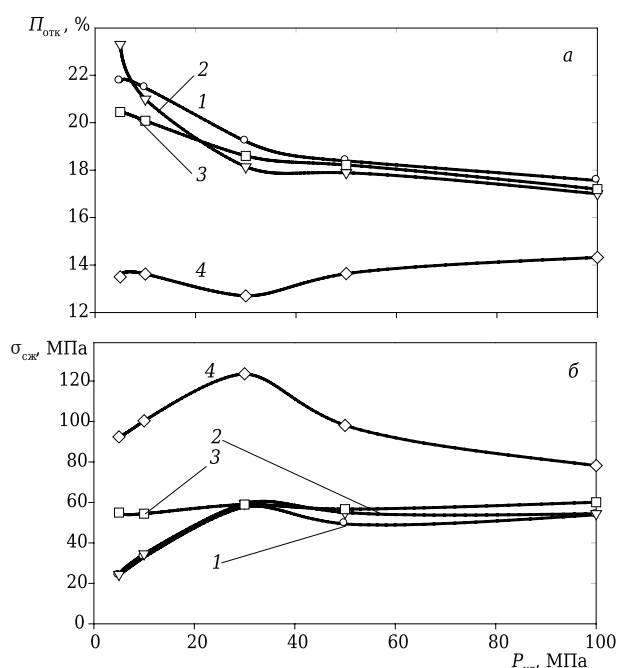


Рис. 3. Влияние удельного $P_{уд}$ на $P_{отк}$ (а) и $\sigma_{сж}$ (б) обожженных при 1300 °С образцов керамобетонов с содержанием матричной системы 40 % с разным составом последней: 1 — исходная ВКВС; 2 — с добавкой 2 % огнеупорной глины; 3 — с добавкой 0,02 % КОМР; 4 — с добавкой 2 % огнеупорной глины и 0,02 % КОМР

пористости отливок от 17 до 15 % (см. рис. 2, кривая 1). Вплоть до 3 %-ного содержания глины открытая пористость $P_{отк}$ не превышает 16,5 %, а при 5 %-ном — 19 % (см. рис. 2, кривая 2). Разница в $P_{отк}$ между кривыми 1 и 2 возрастает при введении 3 %-ной добавки глины и достигает 8 % (46 отн. %). В свою очередь, предел прочности при сжатии высушенных отливок $\sigma_{сж}$ определяется их пористостью (см. рис. 2, кривые 3 и 4). Максимальная разница в $\sigma_{сж}$ между сравниваемыми системами также соответствует 3 %-ной добавке глины. При этом $\sigma_{сж}$ отливок на основе суспензии с добавкой КОМР (см. рис. 2, кривая 4) почти в 6 раз выше, чем без нее (см. рис. 2, кривая 3).

В работе [17] была поставлена практическая задача — установить, какими параметрами должны обладать исходные формовочные системы применительно к процессу прессования для того, чтобы при относительно низких давлениях достигнуть повышенной степени уплотнения. При этом ставилась и дополнительная задача — достижение названных результатов при условии минимального содержания добавки глины.

В качестве исходной была использована ВКВС на основе высокоглиноземистого шамота [16]. В качестве огнеупорного заполнителя был использован тот же высокоглиноземистый плотноспеченный шамот производства Семилукского огнеупорного завода. Содержание матричной системы варьировалось в пределах 30–40 %, а заполнителя с $d_{max} = 5$ мм — от 60 до 70 %. Зерновое распределение выбирали с учетом достижения максимальной плотности упаковки [1, 15].

Минимальная пористость прессовок при низких (30 МПа) давлениях достигнута при использовании исходных масс, содержащих 40 % матричной системы при их влажности 5,5–6 %.

На рис. 3 показано влияние удельного давления прессования $P_{уд}$ на $P_{отк}$ и $\sigma_{сж}$ образцов пластичных масс, термообработанных при 1300 °С. При этом изучены массы с сопоставимым зерновым составом, но различающиеся содержанием одной или нескольких добавок. Последний фактор в данном случае является определяющим. $P_{отк}$ в области низких (5–10 МПа) давлений прессования понижается в следующем порядке: масса с добавкой 2 % огнеупорной глины (рис. 3, а, кривая 2) → исходная ВКВС без добавок (см. рис. 3, а, кривая 1) → масса с добавкой 0,02 % КОМР (см. рис. 3, а, кривая 3) → масса с совмещенной добавкой (глина + КОМР, см. рис. 3, а, кривая 4). Для массы, пластифицированной глиной (см. рис. 3, а, кривая 2) при $P_{уд} > 20$ МПа достигается несколько меньшее значение пористости, чем для исходной (см. рис. 3, а, кривая 1) и с добавкой КОМР (кривая 2). Для массы, соответствующей кривой 4 (см. рис. 3, а), минимальная $P_{отк}$ и максимальный $\sigma_{сж}$ достигаются при $P_{уд} = 30$ МПа. Обусловлено это тем, что при принятой влажности это давление является критическим, соответствующим пере-

ходу трехфазной дисперсной системы в двухфазную. Объемная доля жидкости в системе при этом соответствует пористости прессовки [17]. Для масс другого состава (см. рис. 3, а, кривые 1–3) отмечается обычная закономерность уплотнения. В случае применения масс такого же состава с пониженным содержанием матричной системы тв (массовой доли вяжущего) $P_{отк}$ оказалась заметно ниже: 18,7 и 16 % при $m_b = 30$ и 35 % ($P_{уд} = 10$ МПа).

Столь низкая (см. рис. 3, а, кривая 4) пористость прессовки (14–15 % после сушки при 110 °С) при прессовании масс с использованием ВКВС не получали даже с применением $P_{уд}$ до 200–500 МПа. Благодаря этому массы характеризуются повышенной механической прочностью как в исходном, так и в термообработанном состоянии. При пониженном $P_{уд}$ показатели $\sigma_{сж}$ для кривой 4 (см. рис. 3, б) в 2–3 раза выше, чем для кривых 1–3 (см. рис. 3, б). Следовательно, массы оптимального состава будут характеризоваться более тонкокапиллярной структурой, а соответственно, и повышенной стойкостью в службе.

Библиографический список

1. **Пивинский, Ю. Е.** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении : избр. тр. Т. 3 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Политехника, 2012. — 682 с.
2. **Skuratov, M. A.** Cast (self-flow) ceramic castables. 4. Spreadability of molding systems and some properties of mullite-silicon carbide ceramic castables / M. A. Skuratov, Yu. E. Pivinskii // *Refract. Ind. Ceram.* — 2001. — Vol. 42, № 1/2. — P. 23–29.
3. **Скуратов, М. А.** Литые (саморастекающиеся) керамобетоны. 4. Растекаемость формовочных систем и некоторые свойства муллитокарбидкремниевых керамобетонов / М. А. Скуратов, Ю. Е. Пивинский // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2001. — № 1. — С. 25–31.
3. **Luz, A. P.** Refractory castable engineering / A. P. Luz, A. J. M. Brulio, V. C. Pandolfelli. — Baden-Baden : GolierVerlag GmbH, Germany, 2015. — 734 p.
4. **Пивинский, Ю. Е.** Неформованные огнеупоры. Т. 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. — М. : Теплоэнергетик, 2003. — 448 с.
5. **Pivinskii, Yu. E.** Dispersing (deflocculating) aluminas / Yu. E. Pivinskii, Pavel V. Dyakin, Petr V. Dyakin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 3. — P. 201–209.
- Пивинский, Ю. Е. Диспергирующие (дефлокулирующие) глиноземы / Ю. Е. Пивинский, Павел В. Дякин, Петр В. Дякин // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 3. — С. 29–38.
6. **Pivinskii, Yu. E.** The selective thinning effect of dispersing aluminas / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 4. — P. 246–249.
- Пивинский, Ю. Е. О селективном характере разжижающего эффекта диспергирующих глиноземов / Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 5. — С. 17–21.
7. **Pivinskii, Yu. E.** A study and comparative assessment of the thinning effect in deflocculants. Part 1. Bauxite-based highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение комплексной органо-минеральной разжижающей добавки совместно с пластифицирующей добавкой огнеупорной глины в ВКВС высокоглиноземистого состава приводит к резкому изменению их реотехнологических свойств. Применение таких ВКВС в составе пластичных масс (в композиции с огнеупорным полифракционным огнеупорным заполнителем) позволяет уже при низких давлениях прессования (30 МПа) получить материал с исходной пористостью 14–15 %, характеризующийся повышенной механической прочностью. Полученные пластичные массы могут производиться как в виде набивных масс, так и в виде уплотненных брикетов или заготовок (для локального ремонта). Еще более перспективными такие массы могут оказаться в производстве прессованных огнеупоров повышенной плотности.

Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ имени В. Г. Шухова.

/ Yu. E. Pivinskii, Pavel V. Dyakin, Petr V. Dyakin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 5. — P. 343–352.

Пивинский, Ю. Е. Изучение и сопоставительная оценка разжижающего эффекта дефлокулянтов. 1. ВКВС на основе боксита / Ю. Е. Пивинский, Павел В. Дякин, Петр В. Дякин // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 7. — С. 27–36.

8. **Pivinskii, Yu. E.** Thinning, plastifying and strengthening additives as effective modifiers in HCBS and ceramic concrete technology / Yu. E. Pivinskii // *Refract. Ind. Ceram.* — 2012. — Vol. 52, № 1. — P. 419–423.

Пивинский, Ю. Е. Разжижающие, пластифицирующие и упрочняющие добавки как эффективные модификаторы в технологии ВКВС и керамобетонов / Ю. Е. Пивинский // *Новые огнеупоры.* — 2011. — № 12. — С. 11–16.

9. **Пивинский, Ю. Е.** Зависимость технологических параметров высококонцентрированных керамических и стекольных вяжущих суспензий сложных составов от химической природы твердой фазы / В. И. Онищук, В. А. Дороганов, Е. В. Коробанова [и др.] // *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* — 2016. — № 9. — С. 175–182.

10. **Неверова, Е. В.** Исследование искусственных керамических вяжущих на основе силикатных материалов для производства керамики / Е. В. Неверова, В. А. Дороганов, С. Станкович // *Строительные материалы и изделия.* — 2018. — Т. 1, № 3. — С. 11–16.

11. **Pivinskii, Yu. E.** Preparation and properties of corundum HCBS and ceramic concretes. Part 1. Mixed HCBS in the system electrocorundum — very fine quartz glass / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2010. — Vol. 51, № 1. — P. 25–31.

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

12. **Pivinskii, Yu. E.** Preparation and properties of corundum HCBS and ceramic concretes. Part 1. Mixed HCBS in the system electrocorundum — very fine quartz glass / Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2010. — Vol. 51, № 1. — P. 25–31.

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

13. **Pivinskii, Yu. E.** Thinning, plastifying and strengthening additives as effective modifiers in HCBS and ceramic concrete technology / Yu. E. Pivinskii // *Refract. Ind. Ceram.* — 2012. — Vol. 53, № 1. — P. 12–18.

Пивинский, Ю. Е. Разжижающие, пластифицирующие и упрочняющие добавки как эффективные модификаторы в технологии ВКВС и керамобетонов / Ю. Е. Пивинский // *Новые огнеупоры.* — 2012. — № 1. — С. 16–23.

14. **Pivinskii, Yu. E.** Effect of thinning on properties of high-alumina castables / Yu. E. Pivinskii, D. A. Dobrodon, Yu. N. Ermak [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 2. — P. 78–83.

Пивинский, Ю. Е. О влиянии разжижающих добавок на свойства высокоглиноземистых керамобетонов / Ю. Е. Пивинский, Д. А. Добродон, Ю. Н. Ермак [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2003. — № 6. — С. 27–33.

15. **Пивинский, Ю. Е.** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. Т. 2 / Ю. Е. Пивинский. — СПб. : Стройиздат, 2003. — 688 с.

16. **Doroganov, V. A.** Thinning and plasticization of HCBS (highly concentrated ceramic binding suspension) based on high-alumina chamotte / V. A. Doroganov, Yu. E. Pivinskii, A. V. Cherevatova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 3. — P. 172–176.

Дороганов, В. А. О разжижении и пластификации ВКВС на основе высокоглиноземистого шамота / В. А. Дороганов, Ю. Е. Пивинский, А. В. Череватова // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 2. — С. 25–29.

17. **Doroganov, V. A.** Structure-mechanical properties of plasticized mixes based on highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS) of high-alumina chamotte / V. A. Doroganov, Yu. E. Pivinskii // *Refract. Ind. Ceram.* — 2005. — Vol. 46, № 2. — P. 120–126.

Дороганов, В. А. Структурно-механические свойства пластифицированных масс на основе ВКВС высокоглиноземистого шамота / В. А. Дороганов, Ю. Е. Пивинский // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 12. — С. 62–68. ■

Получено 06.09.20

© Ю. Е. Пивинский, В. А. Дороганов,
Е. А. Дороганов, П. В. Дякин, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

35th Assembly
European Advanced Materials Congress
22 - 24 March 2021 | Stockholm, Sweden

JOIN US IN THE
CITY OF NOBEL
STOCKHOLM, SWEDEN

<https://www.advancedmaterialscongress.org/oct20/>

Д. Т. Н. Д. А. Иванов (✉)

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

УДК 666.762.091

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ К РАЗРУШЕНИЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ И КЕРМЕТА $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}$

Изучена термостойкость алюмооксидной керамики с мелкокристаллической (размер кристаллов 5–40 мкм) и слоисто-гранульной структурой, а также кермета $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}_{(40 \text{ об. } \%)}$. Слоисто-гранульная керамика состоит из хаотично ориентированных слоистых гранул, включающих чередующиеся плотные мелкокристаллические слои и пористые слои из корундовых микробаллонов. Структура кермета представлена двумя взаимопроникающими непрерывными каркасами, образованными зернами Cr и $t\text{-ZrO}_2$. Для оценки термостойкости, помимо известных критериев R_0 и R_1 , предложено использовать новые критерии R_0^* , R_1^* и кинетическую характеристику разрушения γ_F/γ_L . Данные критерии сравнивали с показателями термостойкости по количеству теплосмен до разрушения образцов N и по методике «локального термоудара», определяющей относительную потерю трещиностойкости образца после однократного термоцикла R_T . Лучшими показателями термостойкости обладает слоисто-гранульная Al_2O_3 -керамика благодаря дискретному и высокоэнергоемкому механизму разрушения. Использование Cr в составе кермета позволило значительно повысить его термостойкость по сравнению с термостойкостью керамической составляющей за счет присутствия теплопроводного металлического компонента. Показано, что применение новых критериев R_0^* и R_1^* позволяло достоверно прогнозировать термостойкость исследуемых материалов по показателям N и R_T .

Ключевые слова: кермет, термоциклирование, критерии термостойкости, трещиностойкость, работа разрушения, механизм разрушения, алюмооксидная керамика, частично стабилизированный диоксид циркония, слоисто-гранульная структура.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка специальных керамических и керметных изделий для использования в условиях воздействия термических напряжений в процессе высокотемпературной эксплуатации требует предварительной оценки их устойчивости к разрушению вследствие термоудара [1–3]. Этот аспект является чрезвычайно важным, особенно при разработке крупногабаритных изделий, определение термостойкости которых путем их непосредственного термоциклирования в условиях реальных температурных перепадов является трудоемким и затратным.

В этом случае для прогнозирования термостойкости разрабатываемых изделий принято использовать известные критерии, которые могут определять устойчивость к инициированию и развитию

трещины в результате термоудара в соответствии с теорией двух стадий процесса разрушения [4, 5].

Критерии R_0 , R_1 и R_2 (соотношения (1)–(3)) используются для характеристики стадии инициирования термического разрушения, а критерии R_3 и R_4 (соотношения (4), (5)) — для оценки стадии его развития:

$$R_0 = \sigma \cdot (1 - \nu) / E \cdot \alpha, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$R_1 = R_0 \cdot \lambda, \text{ Вт/м}, \quad (2)$$

$$R_2 = R_0 \cdot a, \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/с}, \quad (3)$$

$$R_3 = E / \sigma^2 \cdot (1 - \nu), \text{ МПа}^{-1}, \quad (4)$$

$$R_4 = u \cdot R_3, \text{ МПа}^{-1}, \quad (5)$$

где σ — предел прочности при изгибе; ν — коэффициент Пуассона; E — модуль нормальной упругости; α — ТКЛР; λ — коэффициент теплопроводности; a — температуропроводность; u — параметр, характеризующий поверхностную энергию.

Применение указанных критериев предполагает игнорирование влияния фактора формы и объема изделия на показатели термостойкости, тем не менее позволяет с определенной степенью достоверности выбирать оптимальные составы



Д. А. Иванов

E-mail: dali_888@mail.ru

для изготовления термостойких материалов. При этом учет влияния фактора формы и объема изделия на его термостойкость требует использования критерия Био, что существенно усложняет расчет [6]. Показано, что для более точного прогнозирования термостойкости керамики следует учитывать температурную зависимость свойств, входящих в состав вышеприведенных критериев [7, 8], а также условия ее термического нагружения [9–11].

Недостатком критериев, привлекаемых для описания стадии развития разрушения (соотношения (4), (5)), является отсутствие в их составе параметра, учитывающего продолжительность процесса распространения трещины при термическом нагружении, которая определяется особенностями структуры материала. К таким его структурным особенностям обычно относят специфику распределения по размерам зерен и пор, их геометрическую форму и наличие специально созданной микротрещиноватой структуры [12, 13]. Этот недостаток может быть устранен благодаря использованию критерия

$$\gamma_F/\gamma_I, \quad (6)$$

где γ_F — эффективная удельная работа разрушения; γ_I — удельная работа разрушения на стадии неконтролируемого роста трещины [14, 15].

Для получения данного критерия изучают диаграмму деформирования путем изгиба сосредоточенной нагрузкой (поперечный изгиб) надрезанного призматического образца при постоянной скорости нагружения в координатах нагрузка P — прогиб δ (рис. 1). Надрез обычно создают путем прорезания образца алмазным кругом толщиной 0,1 мм. Параметр $\gamma_F = U/2S$, где U — работа разрушения, оцениваемая по площади графика $P - \delta$ ($abcd$); S — поверхность разрушения. Параметр γ_I оценивается по части площади графика $P - \delta$ (Obc) либо может быть рассчитан как $\gamma_I = K_{lc}^2 \cdot (1 - \nu^2)/2E$ [16].

Величину отношения γ_F/γ_I можно рассматривать как кинетическую характеристику разру-

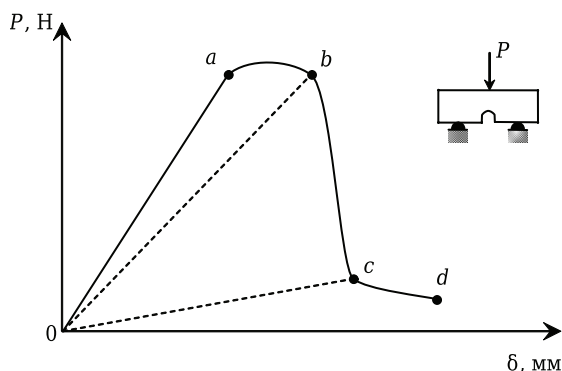


Рис. 1. Диаграмма деформирования надрезанного призматического образца: Oa — участок линейно-упругого деформирования; ab — участок контролируемого (докритического) роста трещины; bc — участок неконтролируемого роста трещины (скачок трещины); cd — участок контролируемого роста трещины до разрушения d

шения: чем она выше, тем медленнее будет развиваться трещина вследствие термоудара.

Следует отметить, что в описанном испытании проявления участка докритического роста трещины (ab) чаще всего не наблюдается (из практики известно, что такой участок при комнатной температуре может демонстрировать керамика с микротрещиноватой структурой либо со структурой, содержащей $t\text{-ZrO}_2$).

В настоящей работе исследована термостойкость алюмооксидной керамики с различными типами структуры и кермета $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}$ с привлечением критериев термостойкости, которые сравнивали с реальными показателями термической стойкости этих материалов по количеству теплосмен до разрушения образцов и по методике локального термоудара [17].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения термостойкости изготавливали образцы алюмооксидной керамики с мелкокристаллической и со слоисто-гранульной структурой.

Мелкокристаллическую алюмооксидную керамику получали спеканием в вакууме при 1750°C (1 ч) сырых образцов из дисперсного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5 \text{ мас. \% MgO}$ с размерами частиц 1–5 мкм.

Слоисто-гранульную алюмооксидную керамику получали прессованием шихты из слоистых кубических гранул (3 мм), состоящих из чередующихся слоев (100–150 мкм) дисперсного порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5 \text{ мас. \% MgO}$ и корундовых микробаллонов диаметром 20–100 мкм с толщиной стенки 5–15 мкм, изготовленных методом плазменной сфероидизации (внешние слои в гранулах выполнены из дисперсного алюмооксидного порошка). В основе данной технологии лежит литье пленок из органосуспензии на движущуюся ленту-подложку [18]. Спекание слоисто-гранульных образцов проводили также в вакууме (1750°C , 1 ч). После спекания слои из дисперсного алюмооксидного порошка и слои из корундовых микробаллонов представляли собой чередующиеся плотные и пористые слои в объеме хаотично ориентированных гранул.

Вид структуры спеченной мелкокристаллической керамики фиксировали с поверхности шлифа после термического травления (рис. 2, a), а вид структуры слоисто-гранульной керамики — с поверхности шлифа спеченного материала (рис. 3, a), съемку производили с помощью оптического микроскопа Axio Observer A1m (Германия). Фрактограммы с поверхности изломов образцов получали на растровом электронном микроскопе Hitachi TM-3000 (Япония)

Для получения кермета $t\text{-ZrO}_2\text{-Cr}$ в качестве керамической составляющей использовали частично стабилизированный порошок $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (3,5 мол. %) тетрагональной модификации, полученный методом химического осаждения. Удельная поверхность этого порошка, измеренная по мето-

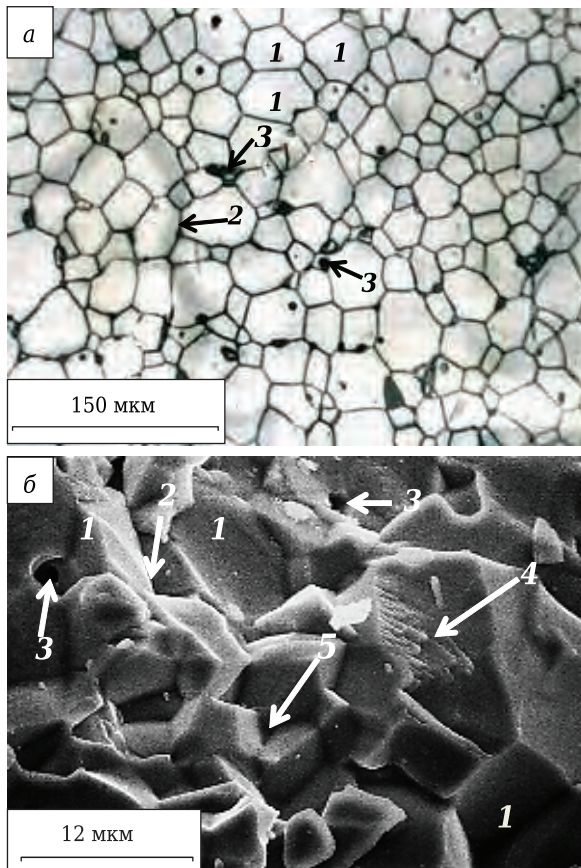


Рис. 2. Структура мелкокристаллической алюмооксидной керамики: а — поверхность шлифа спеченного материала после термического травления; б — фактограмма поверхности излома образца после механического испытания; 1 — кристаллы, 2 — межкристаллитные границы, 3 — поры, 4 — транскристаллитный излом, 5 — межкристаллитный излом

ду БЭТ на приборе Tristar Micromeritics (США), составляла 27 м²/г. В качестве металлической составляющей использовали порошок металлического хрома с размерами частиц 5–10 мкм, содержание которого в кермете составляло 40 об. %. Спекание образцов кермета проводили в вакууме при 1500 °С в течение 1 ч.

Для оценки термостойкости материалов использовали критерии термостойкости, характеризующие стадию инициирования термического разрушения: R_0 (1) и R_1 (2). Кроме того, использовали видоизмененные критерии (1) и (2), в которых величина σ заменена на σ_n , а также в их состав вводили множитель $\beta = \sigma_n/\sigma$. Таким образом, получали новые критерии (7) и (8):

$$R_0^* = \sigma_n \beta / E \cdot \alpha = \sigma_n^2 / E \cdot \alpha \cdot \sigma, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

$$R_1^* = R_0^* \lambda, \text{ Вт/м}, \quad (8)$$

где σ_n — предел прочности при изгибе образца, содержащего тонкий надрез с радиусом кривизны вершины ~ 8 мкм, созданный по методике [19] (в работе [20] показано, что такой тонкий надрез адекватно моделирует трещину).

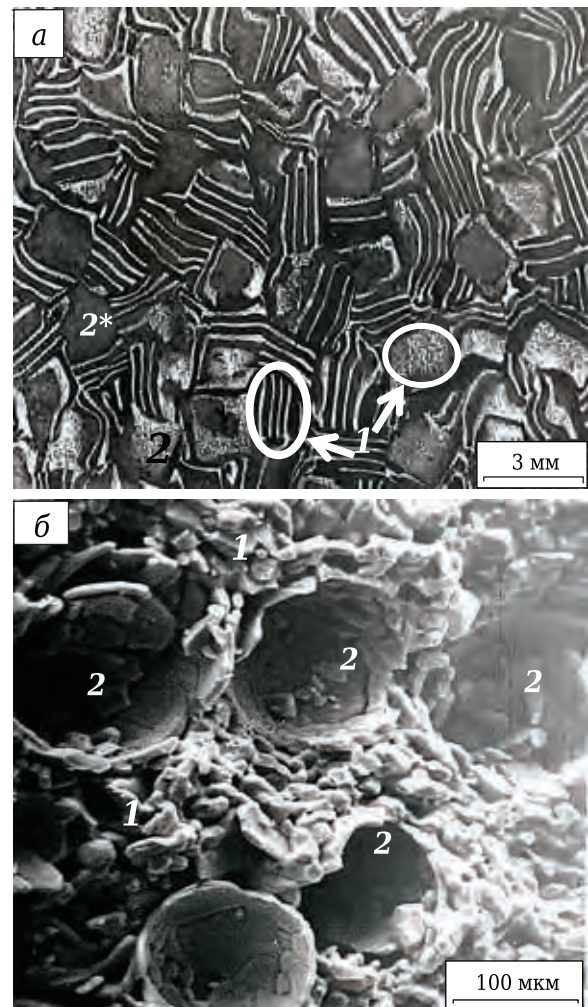


Рис. 3. Структура слоисто-гранульной алюмооксидной керамики: а — поверхность шлифа спеченного материала, 1 — хаотично ориентированные слоистые гранулы, состоящие из чередующихся плотных слоев (темные слои из порошка $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,5 \text{ мас. \% MgO}$) и пористых слоев (светлые слои из корундовых микробаллонов), 2 — внешние пористые слои в грануле, 2* — внешние плотные слои в грануле; б — фактограмма поверхности излома образца после механического испытания, 1 — разрушенные плотные слои, 2 — разрушенные корундовые микробаллоны в пористых слоях

Замена σ на σ_n в выражениях (7) и (8) заключается в том, что в условиях термоудара разрушение инициируется на некотором структурном дефекте (микротрещина, микропора, зерно, межзеренная граница, инородное включение), который рассматривается как критический концентратор напряжений. В этом случае такая замена делает возможным при проведении механического испытания надрезанного образца получить представление о разрушении материала при термическом нагружении, поскольку надрез моделирует структурный дефект — концентратор напряжений, контролирующий разрушение при термоударе.

Подстановка в эти критерии множителя β — показателя нечувствительности структуры мате-

риала к надрезу [17] позволит учитывать способность его структуры к релаксации термических напряжений за счет протекания различных процессов диссипации энергии упругой деформации, запасаемой изделием при термоударе.

В используемых критериях (1), (2), (7), (8) для упрощения расчета коэффициент Пуассона не учитывали в связи с весьма малой и неизменной деформируемостью керамики в широком температурном интервале, что считается допустимым [5]. В этих критериях использовали модуль упругости E_d , измеренный динамическим методом [21], величины α и λ в интервале 20–1000 °C выбирали на основании справочных данных [22–24] (для кермета показатели α и λ рассчитывали по закону аддитивности).

Для оценки термостойкости алюмооксидной керамики на стадии развития разрушения использовали критерий γ_F/γ_I (6). Для его получения регистрировали диаграммы деформирования (рис. 4) при поперечном изгибе призматических образцов размерами 8×10×50 мм с тонким надрезом, выполненным на половину высоты, при скорости нагружения $8 \cdot 10^{-6}$ м/с на испытательной машине Instron 5581 (Великобритания). По результатам этих испытаний также рассчитывали трещиностойкость K_{Ic} образцов по максимальной нагрузке, соответствующей старту трещины из вершины надреза.

Прочность при поперечном изгибе опреде-

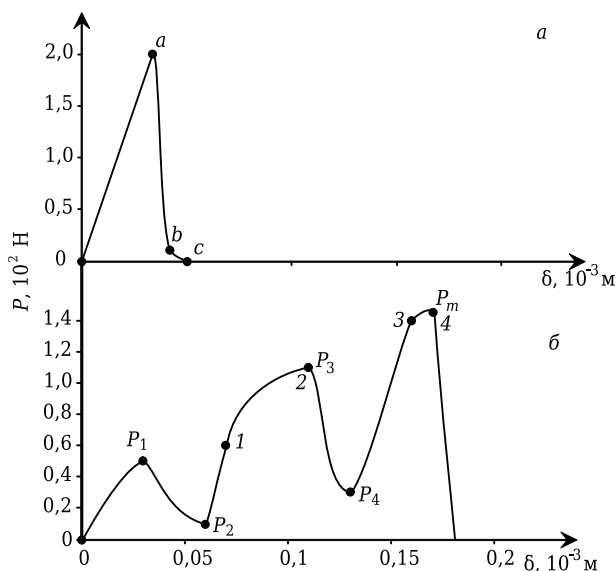


Рис. 4. Диаграмма деформирования P (нагрузка) – δ (прогиб) надрезанного алюмооксидного призматического образца с мелкокристаллической (а) и со слоистой-гранульной (б) структурой

ляли на призматических образцах при скорости перемещения таверсы нагружающего устройства 0,15 мм/мин.

Полученные расчетные критерии сравнивали с показателями термостойкости исследуемых материалов по общепринятой методике, фиксируя количество теплосмен (850 °C – вода) до разрушения образцов, и по методике локального термоудара (нагрев образца при 850 °C – охлаждение струей воды 20 °C, подаваемой в вершину надреза горячего образца). В данном случае показателем термостойкости служила характеристика R_T – относительная потеря трещиностойкости образца, %, после однократного термоцикла [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении критериальной оценки термостойкости керамических материалов очень важным является определение особенностей их разрушения при механических испытаниях, поскольку характеристика прочности входит в состав используемых критериев, кроме того, могут быть выявлены общие закономерности развития трещины при механическом и термическом нагружении.

Для мелкокристаллической алюмооксидной керамики (размер кристаллов 5–40 мкм) (см. рис. 2, а) характерен как транскристаллитный, так и межкристаллитный тип излома (см. рис. 2, б) в результате механического испытания.

В первом случае наблюдается скол в плоскости кристалла (4), а во втором случае – разрушение происходило за счет сдвига и вырыва кристаллов по межкристаллитной границе (5). Однако, в целом, транскристаллитный излом превалировал над межкристаллитным благодаря значительному диффузионному сращиванию кристаллов по их границам при выбранных температурно-временных параметрах процесса спекания. Доминирование транскристаллитного излома достигается вследствие равнопрочности кристаллов и межкристаллитных границ.

Для мелкокристаллической алюмооксидной керамики наблюдаются высокие показатели физико-механических свойств (табл. 1). В то же время параметр γ_F незначительно превышает параметр γ_I , поскольку на диаграмме деформирования этого материала (см. рис. 4, а) отсутствовала стадия докритического роста трещины, а после скачка трещины (участок ab) наблюдается непродолжительная стадия контролируемого развития трещины (участок bc) вплоть до окончательного разрушения с.

Таблица 1. Физико-механические свойства алюмооксидной керамики

Тип структуры Al_2O_3 -керамики	ρ , г/см ³	E_d , МПа	σ , МПа	σ_n , МПа	$\beta = \sigma_n/\sigma$, отн. ед.	γ_F , Дж/м ²	γ_I , Дж/м ²	γ_F/γ_I , отн. ед.
Мелко-кристаллическая	3,98	$3,5 \cdot 10^5$	200	61	0,305	13	12,8	1,02
Слоисто-гранульная	3,20	$2,0 \cdot 10^5$	120	108	0,9	250	17,0	14,7

Вследствие этого кинетическая характеристика разрушения γ_F/γ_I для этого материала чрезвычайно мала (1,02 отн. ед.), а его разрушение сопровождается моментальным выделением энергии упругой деформации, запасенной в объеме образца на стадии его линейно-упругого деформирования (участок 0a). Также для этого материала наблюдается низкий показатель параметра β (0,305 отн. ед.) вследствие высокой чувствительности его структуры к концентратору напряжения — надрезу.

В основе идеи создания слоисто-гранульной структуры алюмооксидной керамики (см. рис. 3, а) лежит использование технологического подхода, позволяющего конструировать специальную структуру материала, состоящую из хаотично ориентированных слоистых гранул, включающих чередующиеся плотные и пористые слои. Плотные слои образуют несущий каркас, воспринимающий нагрузку, а пористые слои выполняют функцию специально организованных слабых звеньев, по которым предполагается развитие трещины после инициирования разрушения в несущем каркасе. Благодаря хаотичной ориентации слоистых гранул открывается возможность вовлекать в разрушение значительный объем материала, усложняя траекторию трещины и тем самым повышая сопротивление ее развитию под воздействием термических или механических напряжений.

Для слоисто-гранульной керамики наблюдается снижение плотности (до 3,2 г/см³) и прочности (до 120 МПа) по сравнению с мелкокристаллической керамикой (см. табл. 1), но при этом достигаются повышенные нечувствительность структуры к концентратору напряжений — надрезу ($\beta = 0,9$ отн. ед.) и кинетическая характеристика разрушения γ_F/γ_I (14,7 отн. ед.) благодаря значительному параметру γ_F .

Высокое значение этого параметра обеспечивается за счет проявления дискретного характера разрушения, сопровождающегося скачками нагрузки ($P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_m$) на диаграмме деформирования (см. рис. 4, б). Механизм такого дискретного разрушения может быть представлен так (рис. 5, а): инициирование разрушения происходит из вершины надреза (точка 1) под воздействием растягивающих напряжений σ_p при достижении предельной нагрузки P_1 (см. рис. 4, б). Далее следует скачок образовавшейся магистральной трещины M_1 по пористому слою из микробаллонов и ее остановка вследствие ветвления с образованием определенного количества ветвей, например V_1, V_2, V_3 (на диаграмме деформирования наблюдается скачок нагрузки $P_1 - P_2$). Остановка трещины M_1 объясняется изменением угла ориентации ее фронта по отношению к направлению действия σ_p в момент ветвления (рис. 5, б). При этом снижение этого угла ($\alpha_3 < \alpha_2 < \alpha_1$) приводит к повышению сопротивления развитию разрушения.

В этом случае проявляется известный эффект углового распределения напряжений по вершинам образовавшихся ветвей трещины, приводя-

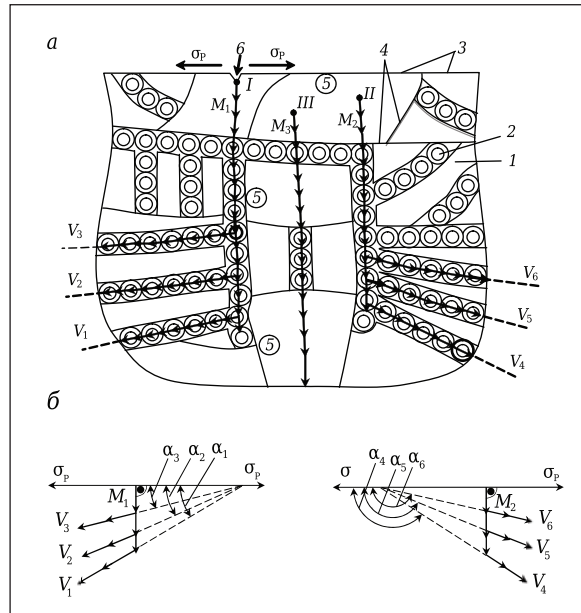


Рис. 5. Схематическое представление разрушения слоисто-гранульного алюмооксидного образца при испытании на трещиностойкость. а: 1, 2 — чередующиеся плотные алюмооксидные слои и пористые алюмооксидные слои из микробаллонов в хаотично ориентированных слоистых гранулах (3); 4 — межгранульные границы; 5 — внешние плотные слои в гранулах; 6 — надрез; I–III — точки инициирования магистральных трещин M_1, M_2 и M_3 ; $\sigma_p \rightarrow$ — направление действия растягивающих напряжений в поверхностном слое образца, $\rightarrow \rightarrow \rightarrow$ — траектория трещины, V_1-V_3 — ветви магистральной трещины M_1 ; V_4-V_6 — ветви магистральной трещины M_2 . б — изменение угла между направлением действия растягивающих напряжений σ_p и направлением распространения ветвей V_1-V_3 трещины M_1 ($\alpha_1 - \alpha_3 < 90^\circ$), а также между направлением действия σ_p и направлением распространения ветвей V_4-V_6 трещины M_2 ($\alpha_4 - \alpha_6 > 90^\circ$)

щий к значительному резкому сбросу энергии упругой деформации, запасенной образцом при его нагружении [25]. Вследствие этого исчерпывается движущая сила процесса развития трещины.

Следует также отметить, что распространение трещины по пористым слоям в структуре слоисто-гранульной керамики приводит к разрушению микробаллонов путем их раскрытия (см. рис. 3, б). На этот процесс также затрачивается энергия трещины.

При продолжении нагружения образца наблюдается возрастание нагрузки (участок $P_2 - P_3$) (см. рис. 4, б), а при нагрузке P_3 имеет место второй акт разрушения в результате инициирования магистральной трещины M_2 из точки 2 в поверхностном слое образца (см. рис. 5, а), где действуют максимальные растягивающие напряжения при поперечном изгибе [26]. Тогда происходит скачок трещины M_2 , сопровождающийся ее ветвлением с образованием ветвей V_4, V_5, V_6 (см. рис. 5, б) (на диаграмме деформирования наблюдается второй скачок нагрузки $P_3 - P_4$).

Ветвление трещины M_2 , так же как и в случае трещины M_1 , служит причиной ее остановки

вследствие проявления эффекта углового распределения напряжений. В рассматриваемом случае увеличение угла $\alpha_4 < \alpha_5 < \alpha_6$ приводит к повышению сопротивления развитию разрушения.

Дальнейшее нагружение образца сопровождается возрастанием нагрузки (участок $P_4 - P_m$) вплоть до максимального ее значения P_m , при котором реализуется третий и окончательный акт разрушения вследствие инициирования магистральной трещины M_3 из точки 3 в зоне действия максимальных растягивающих напряжений (см. рис. 5, а).

В этом случае выраженного ветвления трещины M_3 не проявлялось и распространение ее фронта происходило с незначительным отклонением от направления действия σ_p , в итоге фиксировали окончательное разрушение вследствие неконтролируемого распространения трещины (скачок нагрузки от P_m до нуля на диаграмме деформирования) (см. рис. 4, б).

При анализе этой диаграммы деформирования важно также отметить проявление нелинейных участков 1–2 и 3–4 при нагружении на возрастающих кривых $P_2 - P_3$ и $P_4 - P_m$. Их можно рассматривать как докритическую стадию роста трещины, проявляющуюся за счет локального разрушения сдвигом части микробаллонов под воздействием касательных напряжений, также возникающих при поперечном изгибе [26].

Диаграммы деформирования изучаемой слоисто-гранульной алюмооксидной керамики статистически могут отличаться по количеству актов дискретного разрушения и по максимальным значениям нагрузок, предшествующих скачку трещин (представленная в данной работе диаграмма деформирования является одной из возможных, отражающих общие закономерности разрушения).

Установленные закономерности разрушения при механическом нагружении алюмооксидной керамики обоих структурных типов правильно описывают особенности поведения этих материалов при термоударе.

Для мелкокристаллической Al_2O_3 -керамики характерны наименьшие показатели механических свойств ($\beta = \sigma_n / \sigma$, γ_F / γ_I) (см. табл. 1) по сравнению со слоисто-гранульной керамикой и, соответственно, самые низкие значения термостойкости по методике локального термоудара и по количеству теплосмен до разрушения (табл. 2). При этом

прогнозирование термостойкости этой керамики по критерию R_0 нельзя считать однозначно корректным: значение данного расчетного критерия (67,2 °C) близко и сопоставимо со значением R_0 (70,5 °C) для слоисто-гранульной керамики.

В то же время использование критерия R_0^* нивелирует повышенный показатель R_0 и делает адекватным соответствие R_0^* реальным показателям термостойкости мелкокристаллической керамики по применяемым методикам (см. табл. 2). Для данной керамики наблюдался смешанный транс-кристаллитный / межкристаллитный тип излома вследствие термоциклирования, как и при механическом нагружении (см. рис. 2, б).

Слоисто-гранульная Al_2O_3 -керамика имеет лучшие показатели механических свойств (β и γ_F / γ_I) и термостойкости (см. табл. 1, 2) благодаря ее особой структуре, обеспечивающей энергоемкий, дискретный характер разрушения, сопровождающийся многократным ветвлением трещины, как при механическом нагружении, так и при термоциклировании. Ярко выраженный рельеф поверхности излома этой керамики после термоциклирования свидетельствует о вовлечении в разрушение значительного объема материала при распространении трещины вследствие термического нагружения (рис. 6).

Получение кермета $t-ZrO_2$ -Cr направлено на повышение термостойкости его керамической составляющей ($t-ZrO_2$), которая обычно демонстрирует высокую прочность благодаря эффекту трансформационного упрочнения (вследствие $t \rightarrow m$ -перехода), но отличается крайне низким сопротивлением разрушению при воздействии термических напряжений [17].

Установлено (рис. 7), что при содержании металлического хрома в количестве 40 об. % структура кермета представлена двумя взаимопроницаемыми непрерывными каркасами, образованными из зерен Cr и частично стабилизированного диоксида циркония $t-ZrO_2$.

В этом случае керамический каркас должен обеспечивать материалу достаточно высокую прочность, а металлический каркас — значительную теплопроводность для быстрого устранения температурного градиента, возникающего при термоударе.

Содержание хрома в составе кермета приводило к повышению его плотности и модуля нормальной упругости по сравнению с керамической составляющей $t-ZrO_2$ (табл. 3). При этом значения

Таблица 2. Показатели термостойкости алюмооксидной керамики

Тип структуры Al_2O_3 -керамики	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	K_{Ic}^T , МПа·м ^{1/2}	$R_T = (1 - K_{Ic}^T / K_{Ic}) \cdot 100$, %	N^* , количество теплосмен (850 °C–вода) до разрушения	$R_0 = \sigma / \alpha \cdot E$, °C	$R_0^* = \sigma_n / \beta / \alpha \cdot E$, °C
Мелкокристаллическая	3,0	1,5	50	4–5	67,2	6,25
Слоисто-гранульная	2,6	2,3	11,6	65–70	70,5	57,1

* N определяли на цилиндрических образцах диаметром 30 и высотой 7 мм путем сбрасывания горячих образцов в воду (20 °C).

σ и σ_n для кермета ниже, чем для $t\text{-ZrO}_2$. Понижение этих прочностных характеристик связано с инициированием разрушения по границе раздела зерен $t\text{-ZrO}_2$ и Cr, между которыми реализуется механический тип связи [18]. В этом случае эффект трансформационного упрочнения в полной мере не проявлялся, его проявление становилось возможным только в тонком поверхностном слое керамического каркаса на границе раздела $t\text{-ZrO}_2/\text{Cr}$.

Следует отметить повышение параметра β для кермета по сравнению с $t\text{-ZrO}_2$, что объясняется возможной релаксацией напряжений у вершины надреза благодаря проявлению некоторой микропластичности хрома.

Установлено, что полученная двухкаркасная структура материала позволила достичь заметно-

го увеличения его термостойкости по сравнению с керамической составляющей (табл. 4). При этом необходимо учитывать, что разрушение данного кермета не только лимитировалось действующими термическими напряжениями, но также определялось термоусталостным эффектом из-за отличия ТКЛР составляющих фаз керметной пары и постепенным окислением хрома в процессе термоциклирования на воздухе.

Прогнозирование термостойкости кермета и его керамической составляющей с использованием критерия R_0 нельзя признать достоверным (рис. 8, а), поскольку, согласно данному критерию, максимальной термостойкостью обладает керамика из частично стабилизированного диоксида циркония $t\text{-ZrO}_2$, для нее $R_0 = 3,5 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$, а термостойкость кермета значительно меньше — $R_0 = 1,57 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Это противоречит показателям термостойкости этих материалов по методике локального термоудара и по количеству теплоуловителей до разрушения (см. табл. 4).

Использование критерия R_0^* делает прогноз более достоверным: для керамики $R_0^* = 0,49 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$, а для кермета $R_0^* = 0,56 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (наблюдаются сопоставимые значения критериев термостойкости кермета и керамики, можно говорить только о незначительном превышении критерия термостойкости кермета по сравнению с керамикой). Это связано с игнорированием вклада теплопроводности металлической составляющей кермета при расчете R_0^* .

Применение критериев R_1 и R_1^* позволяет достоверно оценить термостойкость исследуемых

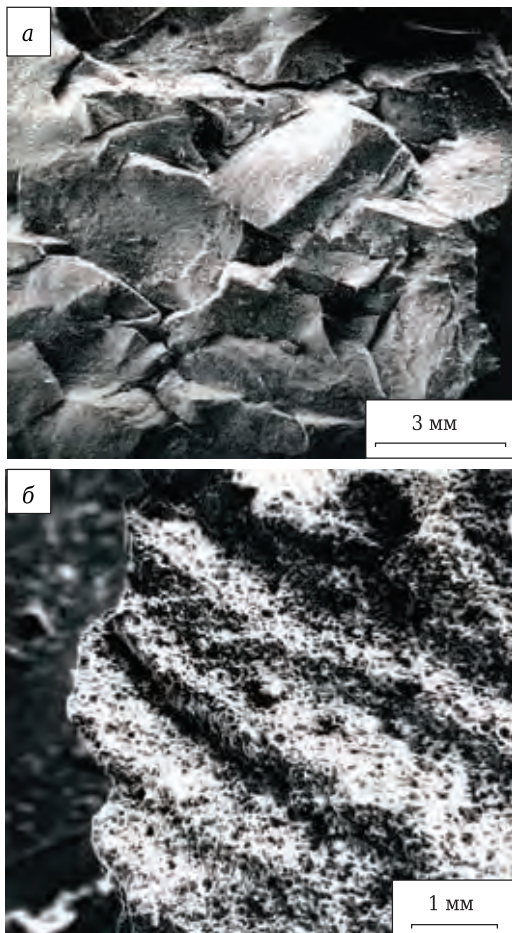


Рис. 6. Фрактограмма поверхности разрушения слоисто-гранульной керамики в результате термоциклирования: рельеф поверхности излома, образованный вследствие ветвления трещины по межслойным и межгранульным границам (а) и зафиксированный в результате пересечения трещиной слоев внутри гранул с образованием ступенек (б)

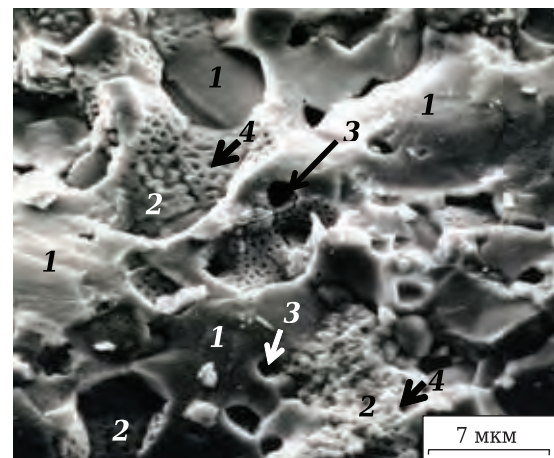


Рис. 7. Фрактограмма поверхности излома кермета $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (3,5 мол. %)–Cr(40 об. %) после механического испытания: 1 — непрерывный металлический каркас, образованный из зерен хрома; 2 — непрерывный керамический каркас из зерен $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ (3,5 мол. %); 3 — поры в металлическом каркасе; 4 — поры в керамическом каркасе

Таблица 3. Физико-механические свойства кермета и его керамической составляющей

Тип материала	ρ , г/см ³	E_d , МПа	σ , МПа	σ_n , МПа	$\beta = \sigma_n/\sigma$, отн. ед.
Керамика $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$ (3,5 мол. %) [17]	6,0	$1,7 \cdot 10^5$	715	270	0,377
Кермет $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$ (3,5 мол. %) – Cr (40 об. %)	6,4	$2,0 \cdot 10^5$	300	180	0,60

материалов с учетом вклада теплопроводности металлической фазы (рис. 8, б): термостойкость кермета выше термостойкости керамики, что совпадает с показателями данного свойства для этих материалов по известным методикам (см. табл. 4).

При этом снижение показателей критериев R_1^* по сравнению с критериями R_1 (для керамики от $7,0 \cdot 10^2$ до $0,98 \cdot 10^2$ Вт/м и для кермета от $43,9 \cdot 10^2$ до $15,8 \cdot 10^2$ Вт/м) обусловлено повышенной чувствительностью керамической фазы к надрезу. Этот аспект является важным, так как указывает на возможность инициирования разрушения при термоударе преимущественно на концентраторах

напряжений, содержащихся в объеме керамической фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована термостойкость алюмооксидной керамики с мелкокристаллической и слоисто-гранульной структурой, а также кермета $t\text{-ZrO}_2 - \text{Cr}_{(40 \text{ об. } \%)}$.

Помимо критериев R_0 и R_1 для оценки термостойкости предложено использовать новые критерии R_0^* и R_1^* , полученные на основе указанных выше критериев путем замены в них параметра σ на σ_n и введением в их состав коэффициента $\beta = \sigma_n/\sigma$. Замена σ на σ_n позволяла получить представление о разрушении материала при термическом нагружении, так как полагали, что надрез моделирует структурный дефект — концентратор напряжений, контролирующий разрушение вследствие термоудара, а коэффициент β учитывает способность его структуры к релаксации термических напряжений. Кроме того, использовали критерий γ_F/γ_I , определяющий кинетику развития термической трещины.

Расчетные критерии сравнивали с показателями термостойкости исследуемых материалов по количеству теплосмен (850°C — вода) до разрушения образцов N и по методике локального термоудара, определяющей относительную потерю трещиностойкости образца (R_T , %) после однократного термоцикла.

Показано, что значительной термостойкостью (по критериям R_0^* , γ_F/γ_I и по показателям N и R_T) обладает алюмооксидная керамика со слоисто-гранульной структурой благодаря дискретному и высокоэнергоёмкому механизму разрушения, сопровождающегося ветвлением магистральной трещины, при котором реализуется эффект углового распределения напряжений по вершинам образовавшихся ветвей трещины. Это приводит к сбросу энергии упругой деформации, в результате чего исчерпывается движущая сила процесса развития трещины.

Мелкокристаллическая алюмооксидная керамика имеет самые низкие значения термостойкости по показателям N и R_T , при этом прогнозирование ее термостойкости по критерию R_0 не является вполне корректным: для нее значение R_0 ($67,2^\circ\text{C}$) близко и сопоставимо с R_0 ($70,5^\circ\text{C}$) для слоисто-гранульной керамики. Тогда как использование критерия R_0^* нивелирует повышенный показатель R_0 и делает адекватным соответствие R_0^* реальным показателям термостойкости мелкокристаллической керамики по показателям N и R_T .

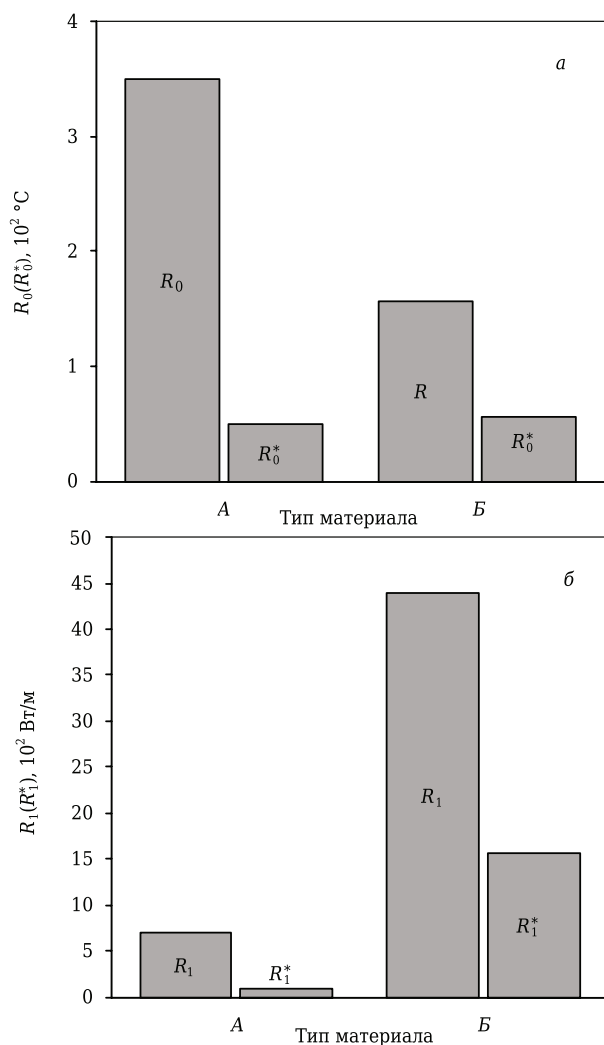


Рис. 8. Показатели критериев термостойкости для керамики $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3(3,5 \text{ мол. } \%)$ (А) и для кермета $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3(3,5 \text{ мол. } \%) - \text{Cr}_{(40 \text{ об. } \%)}$ (Б): а — критерии R_0 и R_0^* ; б — критерии R_1 и R_1^*

Таблица 4. Показатели термостойкости кермета и его керамической составляющей

Тип материала	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	K_{Ic}^* , МПа·м ^{1/2}	$R_T = (1 - K_{Ic}^*/K_{Ic}) \cdot 100$, %	N^* , количество теплосмен (850 °С–вода) до разрушения
Керамика $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3(3,5 \text{ мол. } \%)$ [17]	8,2	4,5	45,2	1–2
Кермет $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3(3,5 \text{ мол. } \%) - \text{Cr}_{(40 \text{ об. } \%)}$	4,0	3,8	5	20–25

* N определяли на цилиндрических образцах диаметром 30 и высотой 7 мм путем сбрасывания горячих образцов в воду (20°C).

Использование хрома в составе кермета позволило существенно повысить его термостойкость ($N = 20-25$) по сравнению с термостойкостью керамической составляющей ($N = 1-2$). При этом помимо термических напряжений, вклад в разрушение кермета вносили напряжения, возникающие из-за отличия термических коэффициентов линейного расширения составляющих керметной пары и вследствие окисления металлической фазы при термоциклировании на воздухе.

Применение критериев R_1 и R_1^* позволяет корректно оценить термостойкость кермета и его керамической составляющей. Для них зафиксиро-

вано снижение критериев R_1^* по сравнению с критериями R_1 . Это можно объяснить повышенной чувствительностью керамической фазы к надрезу, следовательно, можно ожидать инициирования разрушения при термическом нагружении на концентраторах напряжений в объеме керамической фазы.

Исследования выполнены в рамках базовой части государственного задания вузам № 11.7568.2017/Б4 с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Библиографический список

1. Дятлова, Е. М. Химическая технология керамики и огнеупоров, ч. 1 / Е. М. Дятлова, Ю. А. Климош. — Минск : БГТУ, 2014. — 224 с.
2. Волочко, А. Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А. Т. Волочко, К. Б. Подболотов, Е. М. Дятлова. — Минск : Беларус. навука, 2013. — 385 с.
3. Салахов, А. М. Современные керамические материалы / А. М. Салахов. — Казань : КФУ, 2016. — 407 с.
4. Гаршин, А. П. Машиностроительная керамика / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семёнов. — СПб. : изд-во СПбГТУ, 1997. — 726 с.
5. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов, И. Д. Кащеев. — М. : Металлургия, 1996. — 608 с.
6. Lu, T. J. The thermal shock resistance of solids / T. J. Lu, N. A. Fleck // *Acta Materialia*. — 1998. — Vol. 46, № 13. — P. 4755–4768.
7. Han, J.-C. Thermal shock resistance of ceramics with temperature-dependent material properties at elevated temperature / J.-C. Han, B. L. Wang // *Acta Materialia*. — 2011. — Vol. 59, № 4, February. — P. 1373–1382.
8. Li, D. Theoretical research on thermal shock resistance of ultra-high temperature ceramics focusing the adjustment of stress reduction factor / D. Li, W. Li, D. Li [et al.] // *Materials*. — 2013. — № 6. — P. 551–564.
9. Panda, P. K. Thermal shock and thermal fatigue of ceramic materials on newly developed ascending thermal shock test equipment / P. K. Panda, T. S. Kannan, J. Dubois [et al.] // *Science and technology of advanced materials*. — 2002. — № 3. — P. 327–334.
10. Wang, Y. W. Improving the thermal shock resistance of ceramics by crack arrest / Y. W. Wang, B. Xia, H. H. Su [et al.] // *Science China technological sciences*. — 2016. — Vol. 59, № 6. — P. 913–919.
11. Das, D. Thermal shock resistance of porous silicon carbide ceramics prepared using clay and alumina as additives / D. Das, N. Kayal // *Trans. of Indian Ceramic Society*. — 2019. — Vol. 78, № 3. — P. 165–171.
12. Belghalem, H. Thermal shock resistance of two micro-structured alumina obtained by natural sintering and SPS / H. Belghalem, M. Hamidouche, L. Gremillard [et al.] // *Ceram. Int.* — 2014. — Vol. 40. — P. 619–627.
13. Aksel, C. Magnesia-spinel ($MgAl_2O_4$) refractory ceramic composites / C. Aksel, F. L. Riley // *Ceramic matrix composites. Microstructure, properties and applications*; ed. by I. M. Low. — 2006. — 632 p.
14. Красулин, Ю. Л. Пористая конструкционная керамика / Ю. Л. Красулин, В. Н. Тимофеев, С. М. Баринов. — М. : Металлургия, 1980. — 100 с.
15. Красулин, Ю. Л. Структура и разрушение материалов из порошков тугоплавких соединений / Ю. Л. Красулин, С. М. Баринов, В. С. Иванов. — М. : Наука, 1985. — 148 с.
16. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. — М. : Наука, 1974. — 640 с.
17. Иванов, Д. А. Изучение термостойкости керамических материалов по чувствительности их структуры к концентратору напряжений / Д. А. Иванов // *Новые огнеупоры*. — 2020. — № 10. — С. 39–45.
18. Иванов, Д. А. Композиционные материалы / Д. А. Иванов, А. И. Ситников, С. Д. Шляпин. — М. : Юрайт, 2019. — 253 с.
19. Иванов, Д. А. Физико-химические закономерности процессов получения композиционных материалов на основе высокодисперсного алюминиевого порошка ПАП-2 / Д. А. Иванов : дис. ... докт. техн. наук. — М., 2019. — 301 с.
20. Ivanov, D. A. Some methodological features of determination of crack resistance in ceramic materials / D. A. Ivanov, G. A. Fomina // *Refract. Ind. Ceram.* — 1996. — Vol. 37, № 9/10. — P. 318–322.
21. Иванов, Д. А. О некоторых методических особенностях определения трещиностойкости керамических материалов / Д. А. Иванов, Г. А. Фомина // *Огнеупоры и техническая керамика*. — 1996. — № 9. — С. 26–30.
22. Вибрация и удар. Определение динамических свойств вязкоупругих материалов, ГОСТ Р ИСО 18437-1-2014. — Ч. 1. — М. : Стандартинформ, 2015. — 16 с.
23. Химическая технология керамики ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. — 496 с.
24. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах : справочник / В. Е. Зиновьев. — М. : Металлургия, 1989. — 384 с.
25. Казанцев, Е. И. Промышленные печи (справочное руководство) / Е. И. Казанцев. — М. : Металлургия, 1975. — 368 с.
26. Финкель, В. М. Физические основы торможения разрушения / В. М. Финкель. — М. : Металлургия, 1977. — 360 с.
27. Степин, П. А. Сопротивление материалов / П. А. Степин. — М. : Интеграл-Пресс, 1997. — 320 с. ■

Получено 25.10.20
© Д. А. Иванов, 2020 г.

К. т. н. **С. С. Добросмыслов**^{1,2} (✉), к. т. н. **М. М. Симуни**^{1,2,3}, к. т. н. **А. С. Воронин**^{1,2},
Ю. В. Фадеев¹, к. х. н. **В. Е. Задов**¹, к. ф.-м. н. **Г. Е. Нагибин**², к. т. н. **С. В. Хартов**¹

¹ ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «КНЦ СО РАН», г. Красноярск, Россия

² ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Сибирский университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва», г. Красноярск, Россия

УДК 666.974.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНОГО ВОЛОКНА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ОГНЕУПОРНОГО БЕТОНА

Приведены результаты исследований влияния нановолокна оксида алюминия на физико-механические характеристики огнеупорного бетона NPC-21AC. Показано, что использование нановолокна повышает предел прочности при изгибе на 50 %, а предел прочности при сжатии на 30 % при уменьшении модуля Юнга на 15 %. Повышение физико-механических характеристик приводит к увеличению термостойкости на 54–72 % в зависимости от скорости теплообмена. Приведены результаты исследования микроструктуры полученного материала.

Ключевые слова: термостойкость, нановолокно, оксид алюминия.

ВВЕДЕНИЕ

По своему назначению огнеупорные материалы условно можно разделить на две группы. Первая — материалы, используемые для футеровки оборудования непрерывного цикла работы, например для стекловаренных и металлургических печей. Вторая — материалы периодического использования, например тигли и лотки, предназначенные для транспортировки расплавленного металла. Для разных огнеупоров существуют свои лимитирующие характеристики, определяющие эксплуатационные свойства. Повышение срока службы огнеупорных изделий снижает затраты на производство и утилизацию отработанных материалов и уменьшает техногенное воздействие на окружающую среду.

Бетонные огнеупорные материалы широко применяют в металлургии [1] для производства тиглей, лотков и других изделий, испытывающих периодические нагрузки. Основным показателем, определяющим срок эксплуатации такого изделия, является термостойкость [2, 3]. Термостойкость определяется общей прочностью и динамикой развития трещин [4]. Один из способов

повышения термостойкости связан с торможением распространения трещин при циклическом нагружении материала. В ряде случаев возможна остановка трещин на порах материала [5]. Поры в материалах в большинстве случаев имеют сферическую форму, что не приводит к значительному отклонению и торможению трещин. В то же время наличие в структуре материальных объектов волокнистых компонентов приводит к существенному отклонению и торможению трещин, возникающих при нагружении материала [6], причем оптимальным армирующим материалом являются наноразмерные добавки [7]. В связи с тем, что температура эксплуатации огнеупоров довольно высокая, использование классических армирующих волокнистых компонентов (например, углеродного волокна) затруднено в связи с выгоранием в процессе эксплуатации. Необходимо использовать материалы, химически стабильные в воздушной и восстановительной атмосферах. В огнеупорных бетонах весьма перспективными армирующими компонентами являются наноразмерные волокна на основе оксида алюминия, остающиеся стабильными при высоких температурах и приводящие к отклонению трещин волокном [8, 9].

В качестве армируемого огнеупорного бетона был выбран материал НПЦ-21AC, используемый для производства лотков и каналов, служащих для транспортировки расплавленного алюминия.



С. С. Добросмыслов
E-mail: dobrosmyslov.s.s@gmail.com

Основная цель настоящей работы — исследование влияния нановолокна оксида алюминия на термостойкость огнеупорного бетона НПЦ-21АС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Синтез огнеупорного материала осуществляли по классической бетонной технологии методом виброформования. Отжиг проводили в условиях, максимально приближенных к применяемым в промышленном производстве изделий (продолжительность 48 ч, максимальная температура 700 °С).

Пределы прочности при сжатии и изгибе исследовали согласно ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». В рамках испытаний были получены диаграммы деформаций, что позволило определить модуль Юнга. Пористость и плотность определяли согласно ГОСТ 24468–80 «Изделия огнеупорные. Метод определения кажущейся плотности и общей пористости теплоизоляционных изделий». В качестве прессы использовали испытательную машину Instron 3369.

Морфологию и геометрические характеристики нановолокон оксида алюминия исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с помощью микроскопа Hitachi HT 7700 (Japan), ускоряющее напряжение составляло 100 кВ. Для получения одиночных нановолокон оксида алюминия для ПЭМ макроскопический пучок нановолокон диспергировали в этаноле при помощи штокового ультразвукового гомогенизатора модели УЗТА-0.1/28-О (Россия) в течение 1 мин, затем в дисперсию погружали медную сетку, покрытую углеродом, для переноса микроколичества нановолокон.

Морфологическое исследование композитов проводили методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi TM 3000 (Japan), оборудованном приставкой рентгеновского микроанализа BruckerXFlash 430 (Germany), ускоряющее напряжение 15 кВ.

Оксидный состав бетона НПЦ-21АС, мас. %: Al_2O_3 22,8, SiO_2 73,3, CaO 3,5. Вяжущим в данной системе выступает алюминат кальция ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Предположим, что весь оксид кальция химически связан с оксидом алюминия. Исхо-

дя из молярных масс (CaO и Al_2O_3 56 и 102 г/моль соответственно), можно предположить, что на образование молекулы алюмината кальция требуется в 1,8 раза больше Al_2O_3 , чем CaO . Следовательно, в алюминате кальция химически связаны 3,5 % CaO и 6,37 % Al_2O_3 . Избыточный оксид алюминия может выступать в качестве активного термостойкого заполнителя.

По результатам ситового анализа содержание частиц по размерам в бетоне НПЦ-21АС, %: >1 мм 39, 1–0,63 мм 6, 0,63–0,5 мм 3,9, 0,5–0,315 мм 5,0, 0,315–0,16 мм 22,3, 0,16–0,1 мм 16,8, 0,1–0,08 мм 5,0, 0,08–0,05 мм 0,3. Размер частиц НПЦ-21АС имеет явную бимодальную зависимость. Данный результат связан с тем, что в качестве малоразмерного заполнителя выступает аморфный оксид кремния.

Отдельные волокна армирующего бетон оксида алюминия представляют собой монокристаллы или цепочки монокристаллов, имеющие структуру $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. В связи с тем, что фазовый переход из γ -фазы в α -фазу начинается при 1100 °С, в процессе обжига фазовый переход не происходит. Результаты исследования волокна оксида алюминия с помощью просвечивающей электронной микроскопии показаны на рис. 1. После ультразвуковой обработки нановолокно образует конгломераты размером порядка 2–4 мкм (см. рис. 1, а).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из результатов исследования морфологии поверхности (рис. 2) можно сделать вывод, что на микроуровне бетон представляет собой композицию, включающую в себя крупные и мелкие частицы. Результаты данного исследования, а также элементный анализ подтверждают ранее выдвинутое предположение о химическом составе бетона. Практически весь оксид кальция химически связан с оксидом алюминия, частицы тонкомолоты, оксид алюминия выступает в качестве тонкомолотого наполнителя, а оксид кремния — аморфный заполнитель.

Добавка нановолокна оксида алюминия приводит к незначительному разрыхлению системы. В целом структура не претерпевает существенных изменений (рис. 3).

При исследовании поверхности модифицированного материала в ряде случаев наблюдались

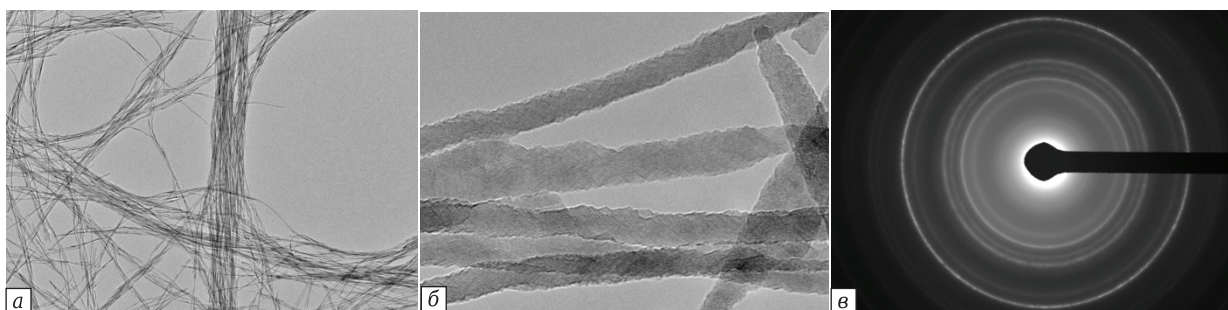


Рис. 1. Микрофотографии нановолокна оксида алюминия: а — $\times 10000$; б — $\times 300000$; в — дифрактограмма нановолокна оксида алюминия, доказывающая, что волокно состоит из $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

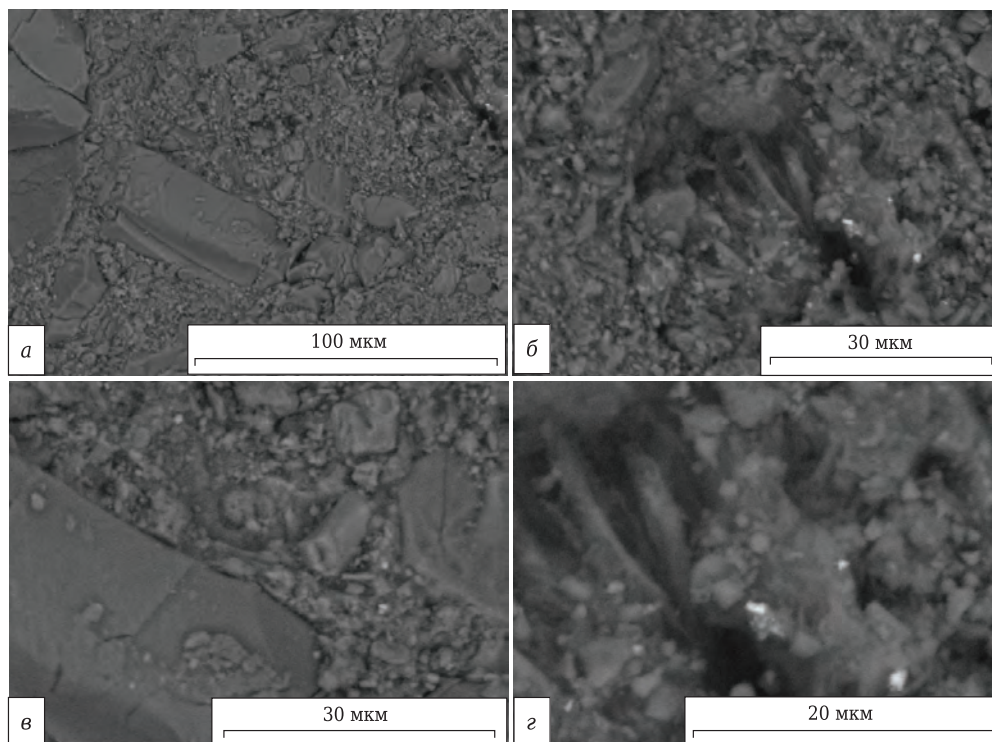


Рис. 2. Морфология поверхности спила бетона НПЦ-21АС: а — $\times 1000$; б — $\times 2500$; в — $\times 3000$; з — $\times 5000$

недиспергированные агломераты армирующего волокна. Микрофотографии блока волокон, полученные для бетона НПЦ-21АС с добавкой волокна оксида алюминия 0,5 %, показаны на рис. 4.

Размер недиспергированного блока волокон составляет порядка 20 мкм. Незначительное количество недиспергированных блоков свидетельствует о хорошем распределении волокна по объему материала.

На рис. 5 показаны зависимости пределов прочности образцов огнеупорного бетона при сжатии и изгибе, а также плотность материала в зависимости от концентрации добавки. Расчет предела прочности при изгибе осуществляли по трем образцам, при сжатии — по шести образцам.

При концентрациях нановолокна до 0,5 % происходит упрочнение материала, а также

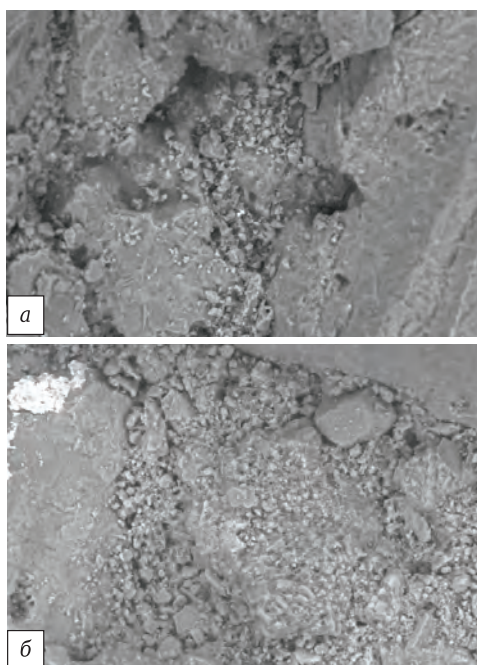


Рис. 3. Микрофотографии скола референсного образца (а) и образца, модифицированного 0,25 % нановолокна (б). $\times 1000$

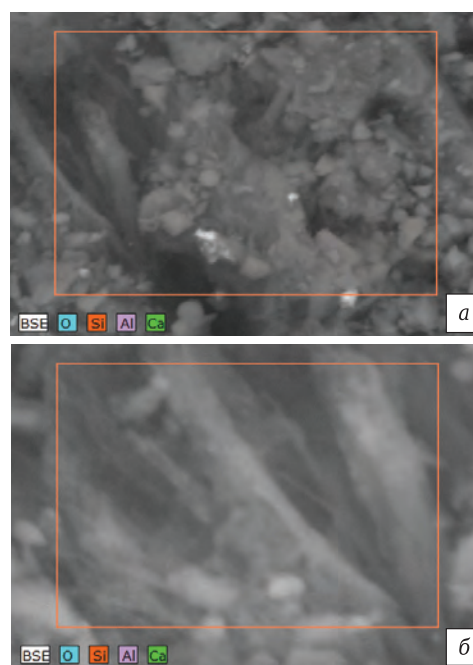


Рис. 4. Морфология поверхности и элементный анализ спила бетона NPC-21АС с добавкой 0,5 % нановолокон оксида алюминия: а — $\times 5000$; б — $\times 10000$

увеличение плотности. Увеличение плотности связано с тем, что при небольших концентрациях нановолокна оксида алюминия способствует скольжению зерен относительно друг друга. При этом волокна формируют вокруг себя наноразмерную область, сопоставимую с размерами единичного волокна порядка 10 нм (см. рис 1, а), которая способствует виброуплотнению материала. Дальнейшее снижение плотности и прочности связано с тем, что данные области начинают пересекаться, что снижает подвижность смеси при виброуплотнении.

На рис. 6 показана кривая деформации для референсного и модифицированного образцов. Результаты получены путем усреднения данных для трех образцов.

Оценка огнеупорности материала может осуществляться по следующему критерию [10]:

$$R = \frac{\sigma(1-\mu)}{E\alpha}, \quad (1)$$

где R — термостойкость, К; σ — прочность, Па; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга, Па; α — ТКЛР, K^{-1} .

В зависимости от критериев теплоотдачи (числа Био) также выделяют следующие зависимости:

$$R^1 = \frac{\sigma(1-\mu)}{E\alpha} \lambda, \quad R^2 = \frac{\sigma(1-\mu)}{E\alpha} a, \quad (2)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); a — коэффициент температуропроводности материала, m^2/s .

Выражение (1) применяется при значении числа Био > 20 , выражение (2) R^1 — при Био < 2 , а R^2 — при постоянной скорости изменения температуры. Критерий Био зависит от множества параметров, связанных с теплоотдачей, поэтому рассмотрим все три параметра.

Теплопроводность материала без учета радиационной составляющей определяется следующим выражением:

$$\lambda = \lambda_0(1 - A \cdot P), \quad (3)$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности беспористого материала, Вт/(м·К); A — коэффициент, зависящий от пористости; P — пористость.

Коэффициент температуропроводности материала a рассчитывали по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (4)$$

где C_p — теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ — плотность, kg/m^3 .

Для оценки повышения термостойкости предположим, что коэффициенты Пуассона и ТКЛР не зависят от наличия добавки. Тогда отношение термостойкости модифицированного материала к термостойкости референса будет равно:

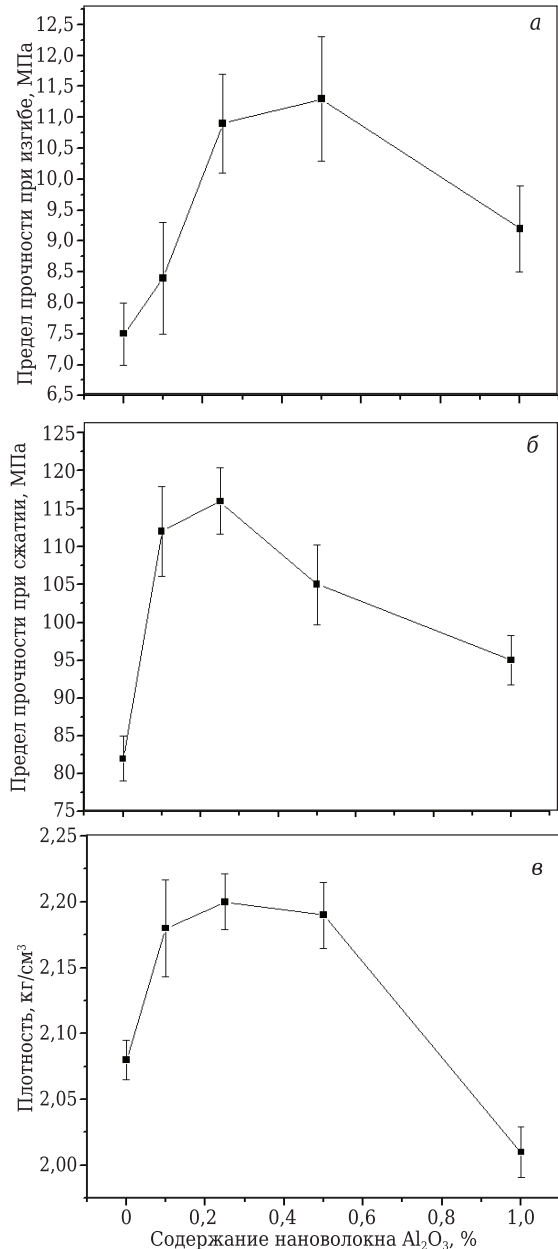


Рис. 5. Результаты исследований пределов прочности при изгибе (а) и сжатии (б), а также плотности образцов (в)

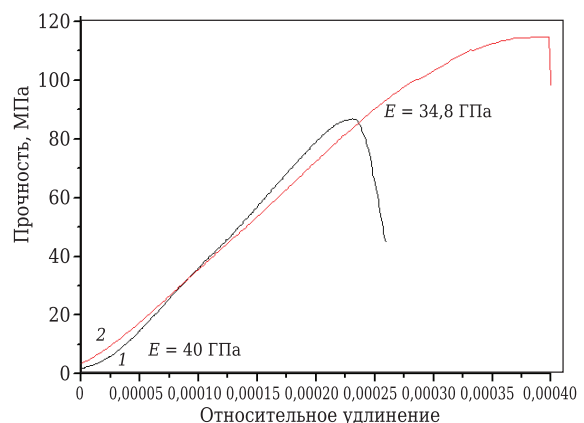


Рис. 6. Кривая деформации референсного (1) и модифицированного 0,25 % нановолокном Al_2O_3 материала (2)

$$\frac{R_{\text{мод}}}{R_{\text{реф}}} = \frac{\sigma_{\text{мод}} E_{\text{реф}}}{\sigma_{\text{реф}} E_{\text{мод}}}, \quad (5)$$

Анализ результатов показывает, что использование нановолокна оксида алюминия приводит к повышению термостойкости на 62 % согласно критерию (1). Аналогично воспользуемся зависимостями (3) и (4) и получим:

$$\frac{R_{\text{мод}}^1}{R_{\text{реф}}^1} = \frac{\sigma_{\text{мод}} E_{\text{реф}} \lambda_{\text{мод}}}{\sigma_{\text{реф}} E_{\text{мод}} \lambda_{\text{реф}}}, \quad \frac{R_{\text{мод}}^2}{R_{\text{реф}}^2} = \frac{\sigma_{\text{мод}} E_{\text{реф}} a_{\text{мод}}}{\sigma_{\text{реф}} E_{\text{мод}} a_{\text{реф}}}. \quad (6)$$

Если пренебречь массой и теплоемкостью воздуха, то получим

$$\frac{C_p}{C_{p0}} = (1 - \Pi), \quad \frac{\rho}{\rho_0} = (1 - \Pi), \quad (7)$$

где C_{p0} — теплоемкость беспористого материала, Дж/(кг·К); ρ_0 — истинная плотность, кг/м³.

Сопоставив зависимости (4), (6) и (7), получим, что для критерия R^1 повышение термостойкости составляет 72 %, а для критерия R^2 — 54 %.

Библиографический список

1. **Kashcheev, I. D.** Developing refractory concretes of aluminosilicate- and alumina-based compositions for high-temperature equipment in ferrous metallurgy / I. D. Kashcheev, S. A. Pomortsev, A. A. Ryaplova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 281–284. <https://doi.org/10.1007/s11148-014-9708-x>.
2. **Апалькова, Г. Д.** Разработка огнеупорных бетонов алюмосиликатного и глиноземистого состава для тепловых агрегатов черной металлургии / И. Д. Кащеев, С. А. Поморцев, А. А. Ряплова // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 7. — С. 15–18. https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/518?locale=ru_RU.
3. **Апалькова, Г. Д.** Destruction of graphitized electrodes under the conditions of thermal shock / G. D. Apal'kova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 59, № 2. — P. 163–169. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0199-z>.
4. **Апалькова, Г. Д.** Разрушение графитированных электродов в условиях термического удара / Г. Д. Апалькова // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 3. — С. 57–63. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/943/856>.
5. **Kashcheev, I. D.** Study of thermal shock resistance of pulsed high-temperature equipment refractories / I. D. Kashcheev, K. G. Zemlyanoi, R. V. Dzerzhinskii, A. V. Fedotov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 369–372. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9986-6>.
6. **Кащеев, И. Д.** Исследование термостойкости огнеупоров для импульсных высокотемпературных установок / И. Д. Кащеев, К. Г. Земляной, Р. В. Дзержинский, А. В. Федотов // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 7. — С. 43–47. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/656/647>.
7. **Feng, D.** Effect of Al₂O₃ + 4SiO₂ additives on sintering behavior and thermal shock resistance of MgO-based ceramics / D. Feng, X. Luo, Zh. Xie, P. Han // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 417–422. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9996-4>.
8. **Фэн, Д.** Влияние добавки Al₂O₃ + 4SiO₂ на спекание и термостойкость керамики на основе MgO / Д. Фэн, С. Ло, Ц. Цзан, Ч. Се, П. Хань // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 8. — С. 48–54. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/669/660>.
9. **Хасанов, О. Л.** Характер разрушения поверхности керамики В₄С при локальном нагружении / О. Л. Хасанов,

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Нановолокна оксида алюминия равномерно распределяются по всему объему при стандартном изготовлении образцов огнеупорного бетона НПЦ-21АС.
2. Добавка волокна от 0,1 до 0,5 мас. % приводит к увеличению плотности, пределов прочности при сжатии и изгибе.
3. Максимум предела прочности при сжатии достигал при концентрации 0,5 % нановолокна, а предел прочности при изгибе и сжатии — при концентрации 0,25 %.
4. Использование 0,25 % нановолокна при быстром охлаждении материала повышает термостойкость на 62 %, при медленном — на 72 %, а при равномерном — на 54 %.

Исследования методом просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии выполнены на оборудовании Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

- В. К. Струц, З. Г. Букбаева [и др.] // *Физика и химия обработки материалов.* — 2013. — № 2. — С. 41–47. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18929791>.
6. **Demirhan, S.** Impact behaviour of nanomodified deflection-hardening fibre-reinforced concretes / S. Demirhan, G. Yildirim, Q. S. Banyhussan [et al.] // *Magazine of Concrete Research.* — 2019. — P. 1–46. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00541>.
7. **Гончарова, М. А.** Жаростойкие бетоны из боя шамотных огнеупоров с нанодобавками / М. А. Гончарова, Г. Е. Штефан // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2014. — № 6. — С. 29–33. <http://i.uran.ru/webcab/system/files/journalspdf/ogneupory-i-tehnicheskaya-keramika/ogneupory-i-tehnicheskaya-keramika-2014-n-6/otc62014.pdf>.
8. **Савченко, Н. Л.** Структура и механические характеристики спеченных композитов на основе ZrO₂-Y₂O₃-Al₂O₃ / Н. Л. Савченко, П. В. Королёв, А. Г. Мельников [и др.] // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* — 2008. — № 1. — С. 94–99. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12771426>.
9. **Sokov, V. N.** Heat-resistant corundum concrete reinforced with aluminum oxide fibers synthesized within a matrix during firing. Part 5. Bases of reinforced corundum concrete technology and study of physicomechanical properties / V. N. Sokov, S. D. Sokova, V. V. Sokov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 34, 35. <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9779-3>.
10. **Соков, В. Н.** Термостойкие корундовые бетон, армированный волокнами оксида алюминия, синтезируемыми в матрице при обжиге. Часть 6. Корундовый бетон / В. Н. Соков, С. Д. Сокова, В. В. Соков // *Новые огнеупоры.* — 2015. — № 2. — С. 39–40. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2015-2-39-40>.
11. **Стрелков, К. К.** Технология огнеупоров / К. К. Стрелков, П. С. Мамыкин. — М. : Металлургия, 1978. — 376 с. ■

Получено 13.10.20

© С. С. Добросмыслов, М. М. Симунин,
А. С. Воронин, Ю. В. Фадеев, В. Е. Задов,
Г. Е. Нагибин, С. В. Хартов, 2020 г.

Д. т. н. Р. Стонис¹ (✉), д. т. н. А. Ягнятинскис¹, д. т. н. Ю. Малайшкене¹,
д. т. н. Е. Шкамат¹, д. т. н. В. Антонович¹, д. т. н. А. Корякин², д. т. н. А. Куджма¹

¹ Институт строительных материалов, Вильнюсский
технический университет им. Гедиминаса, г. Вильнюс, Литва

² Институт материалов и конструкций, Рижский
технический университет, г. Рига, Латвия

УДК 666.974.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ (ТЕРМОСТОЙКОСТИ) ЖАРСТОЙКИХ БЕТОНОВ

На примере жаростойкого бетона трех разных составов (без добавок, с пластификатором, с микро-наполнителем и комбинированным пластификатором) показана возможность использования метода измерения коэффициента поглощения звука α для прогнозирования термостойкости и остаточного ресурса жаростойких материалов. Установлено критическое значение α , соответствующее значительной степени разрушения материала, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна. Получены первичные уравнения регрессии, которые могут быть использованы для примерного прогнозирования термической стойкости жаростойких материалов и установления их остаточного ресурса.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, коэффициент поглощения звука, прогнозирование термостойкости, остаточный ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение огнеупорного материала футеровок различных тепловых агрегатов происходит вследствие циклического температурного воздействия при многократном нагревании и остывании футеровки. Поэтому одной из важных характеристик огнеупора является его стойкость к термическим ударам. Для определения термостойкости огнеупорных материалов в основном применяется метод, сущность которого заключается в определении количества термических циклов (нагревов и резких охлаждений), которые может выдержать изделие до определенной степени его разрушения. Для изучения структуры огнеупорных материалов и оценки ее повреждений часто применяются такие методы, как измерение скорости распространения ультразвука [1], оценка повреждений методом микроскопии [2], оценка потери массы после термических циклов [3]. В данной работе для определения по-

врежденного состояния жаростойкого бетона предлагается альтернативный акустический неразрушающий метод, основанный на измерении поглощения звука в твердых материалах. Акустические методы используются при анализе образования и распространения трещин в различных конструкционных материалах — металлах [4], бетонах [5], геополимерах [6], кладке [7]. Для оценки повреждений жаростойкого вибробетона, подверженного воздействию термических циклов, также могут быть применены акустические методы [8, 9]. Однако прогнозирование долговечности материала зачастую затруднено вследствие сложности фазового и гранулометрического состава — используются наполнители разной формы и размеров, различные связующие и множество добавок, температурные коэффициенты расширения которых могут сильно различаться [10].

Цель данной работы — изучение изменения скорости распространения ультразвукового импульса (УИ) и коэффициента поглощения звука при циклических термических нагрузках жаростойкого бетона и установление уравнений зависимостей, которые могут быть использованы для прогнозирования долговечности (количества циклов) материала по критическому значению коэффициента поглощения, учитывая различные составы бетона.



Р. Стонис
E-mail: rimvydas.stonys@vgtu.lt

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Для проведения акустических испытаний были изготовлены образцы бетонов трех разных составов. Для изготовления образцов использовались следующие материалы:

- глиноземистый цемент «Горкал-40» (G40) с содержанием Al_2O_3 не менее 40 % (химический состав, мас. %: Al_2O_3 40,8, CaO 39,5, Fe_2O_3 12,5, SiO_2 5,5, MgO 1,2; удельная поверхность по Блейну 320 м²/кг; насыпная плотность 1100 кг/м³) и высокоглиноземистый цемент «Горкал-70» (G70) с содержанием Al_2O_3 не менее 70 % (химический состав, мас. %: Al_2O_3 70,0–72,0, CaO 28,0–29,0, SiO_2 < 0,5, Fe_2O_3 < 0,5; удельная поверхность по Блейну 450 м²/кг, насыпная плотность 1100 кг/м³) фирмы «Górka Cement Sp. zo.o.» (Польша);

- шамотный заполнитель фракции мельче 5 мм марок Bos125 (химический состав, мас. %: Al_2O_3 26,31, SiO_2 59,18, CaO 2,05, Fe_2O_3 2,90) и Bos145 (химический состав, мас. %: Al_2O_3 44,3, SiO_2 49,5, CaO 0,6, Fe_2O_3 2,07) фирмы Tabex Ozmo (Польша);

- молотый дисперсный заполнитель (GF Bos125 и GF Bos145), изготовленный из тех же шамотных заполнителей, измельченный в течение 1 ч в шаровой мельнице и просеянный через сито 0,14 мм;

- молотый кварцевый песок (GQS) фирмы AB Apykščių kvarcas (Литва); химический состав, мас. %: SiO_2 99,20, Fe_2O_3 0,05, Al_2O_3 0,60, TiO_2 0,10; удельная поверхность по Блейну 490 м²/кг;

- микрокремнезем (MS) марки RW-Fuller фирмы RWSilicium GmbH (химический состав, мас. %: SiO_2 96,06, Al_2O_3 0,20, Fe_2O_3 0,05, C 0,60, CaO 0,25, MgO 0,40, K_2O 1,20, Na_2O 0,10, SO_3 0,35);

- реактивный глинозем (RA) марки CTC 20 фирмы Almatiss (Германия), Al_2O_3 99,7 мас. %, удельная поверхность по Блейну 2100 м²/кг;

- кальцинированный глинозем (CA) марки CT 19 фирмы Almatiss (Германия), Al_2O_3 99,8 мас. %, удельная поверхность по Блейну 400 м²/кг;

- дефлокулянты — поликарбоксилатный эфир марок Castament FS 20 (FS20) и Castament FS 40 (FS40) фирмы BASF и триполифосфат натрия (NT).

Характеристики используемых в данном исследовании бетонов представлены в табл. 1.

Изготовлены образцы цилиндрической формы диаметром 80 и высотой 50 мм. Образцы выдерживали 3 сут при 20 °С, после этого сушили при 110 °С до постоянной массы и обжигали при 950 °С. После обжига образцы подвергали термической циклической нагрузке в соответствии с ГОСТ 20910–90:1991. Один полный цикл включает выдержку образца в печи в течение 40 мин при 950 °С, охлаждение в холодной воде в течение 5 мин и на воздухе в течение 10 мин при комнатной температуре. После 3, 7, 11, 15, 18 и 21 цикла при помощи интерферометра проводи-

ли измерения коэффициента поглощения звука α по ISO 10534-1 и с помощью ультразвукового прибора Pundit-7 измеряли скорость ультразвукового импульса V. Состояние образцов также оценивали визуально. Статистический анализ данных проводили с помощью программных пакетов Excel и Statistica. Подобрана математическая модель, коэффициент детерминации которой близок к 1.

Для определения α выбран метод стоячей волны в трубе, который основан на определении величины максимального и минимального уровня звукового давления при распространении звука в трубе. Применение данного метода (также называемого методом импедансной трубы или интерферометра), основанного на образовании стоячей волны при нормальном падении звука на испытуемый материал, позволяет быстро с высокой точностью и повторяемостью проводить измерения α . Схема прибора, называемого «Аппарат стоячей волны», показана на рис. 1. Громкоговоритель излучает в трубу плоскую звуковую волну, которая, распространяясь в трубе, достигает испытуемого образца и отражается от него. Распространяющиеся в трубе падающая на испытуемый образец и отраженная волны в результате интерференции звука приводят к образованию стоячей волны, параметры которой зависят от разности фаз между падающим и отраженным звуком. Изменения уровня звукового давления по длине трубы определяются при помощи перемещаемого вдоль трубы микрофонного зонда. По результатам измерения уровней звукового давления в узлах стоячей волны (соответствует минимальному значению) и пучностях стоячей волны (соответствует максимальному

Таблица 1. Марка, состав и свойства бетонов

Параметр	Марка бетона		
	A	B	C
Компонентный состав, %:			
G40	25	25	–
G70	–	–	12
Bos125	60	60	–
Bos145	–	–	60,5
GF Bos125	15	12	–
GF Bos145	–	–	8
MS	–	3	5
GQS	–	–	2,5
RA	–	–	5
CA	–	–	7
NT*	–	–	0,1
FS40*	–	0,05	–
FS20*	–	–	0,1
вода	14,5	11	8
Плотность, кг/м ³ :			
после сушки при 110 °С	1990	2090	2250
после обжига при 1100 °С	1880	1970	2210
Прочность на сжатие, МПа:			
после сушки при 110 °С	35	73	109
после обжига при 1100 °С	12	46	126
Усадка после обжига при 1100 °С, %	0,14	0	0,28
* Сверх 100 % сухой смеси.			



Рис. 1. Аппарат стоячей волны с передвижным микрофоном

значению) из их соотношения определяется показатель — коэффициент стоячей волны S . По величине показателя S , который всегда больше или равен единице, рассчитывали α при нормальном (перпендикулярном поверхности) падении звуковой волны:

$$\alpha = \frac{4S}{S^2 + 2S + 1}.$$

Данный метод измерения стандартизован и описан в международном стандарте ISO 10534-1:1996 «Акустика — определение коэффициента звукопоглощения и акустического импеданса в импедансных трубках — часть 1: метод с использованием коэффициента стоячей волны». В соответствии с требованием стандарта используемая в работе импедансная труба представляет собой прямую жесткую металлическую трубу цилиндрической формы с громкоговорителем на одном конце и держателем образца на другом. Стоячая волна в трубе образуется при распространении излучаемой плоской звуковой волны и отраженной от образца. При этом величина звукопоглощения как функция частоты звука соответствует условию перпендикулярного падения звука на поверхность.

Выбранный метод передвижного микрофона требует отдельных измерений на каждой интересующей частоте. Однако данный метод позволяет с высокой точностью определять показатель стоячей волны и исключить проблему разброса фазовых характеристик при использовании двух неподвижных микрофонов, что позволяет с высокой точностью располагать микрофон для каждой интересующей частоты. Это дает значительное преимущество при необходимости исследовать материалы с низким коэффициентом звукопоглощения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения скорости ультразвука проведены в качестве контрольной меры с целью подтвердить различие в плотности изготовленных серий образцов (рис. 2). Наименьшие значения V установлены на образцах типа А, изготовленных без использования дефлокулянтов и дисперсных реактивных добавок. Средняя плотность образцов типа А составила $\sim 1950 \text{ кг/м}^3$. Структура таких образцов более пористая, менее прочная и подвержена разрушению под действием термических циклов. Критическое значение V , соответствующее значительному крошению и отколам, для образцов А

составило $\sim 1670 \text{ м/с}$ (после 15 циклов). Наиболее высокие значения V после такого же количества циклов установлены на образцах С, изготовленных с применением наибольшего количества микрокремнезема, реактивных дисперсных добавок и дефлокулянтов двух типов (FS20, NT). Расход воды для образцов С был на 38 % меньше, чем для типа А. Соответственно, были получены образцы с более плотной и прочной структурой (средняя плотность $\sim 2300 \text{ кг/м}^3$). Образцы В (средняя плотность $\sim 2050 \text{ кг/м}^3$), изготовленные с использованием среднего количества добавок, показали промежуточные значения V . Таким образом, на всех этапах исследования (после твердения, сушки, обжига и термических циклов) более высокие значения V соответствовали образцам с более высокой начальной плотностью. Наиболее резкое падение V зафиксировано для всех образцов после обжига. Далее, при применении первых термических циклов (трех — для образцов А и В, семи — для образцов С), наблюдается менее резкое падение V , связанное с накоплением дефектов в структуре, после чего значения V для всех образцов находятся на примерно постоянном уровне и даже с небольшим приростом, что может быть связано с определенным эффектом самозаживления трещин, вызванным повторной гидратацией минералов цемента при погружении в воду [11], на данном этапе циклирования. Следующий этап увеличения количества дефектов структуры и связанное с ним падение V для образцов А наступают уже после 7 циклов, для образцов В — после 11, в то время как для С постоянное значение V удерживается и после 15 циклов и составляет 3125 м/с , что почти в два раза больше, чем для образцов А, и на 17 % больше, чем для образцов В, после такого же числа циклов.

Для всех трех материалов наблюдается монотонный рост α при увеличении числа термических циклов (рис. 3). При этом на начальной стадии эксперимента (до термического циклирования) существенной разницы в значениях α не установлено, для всех образцов α составил $\sim 0,01\text{--}0,03$ в зависимости от частоты используемого при измерениях сигнала. При термическом циклировании более интенсивный рост α наблюдался на менее

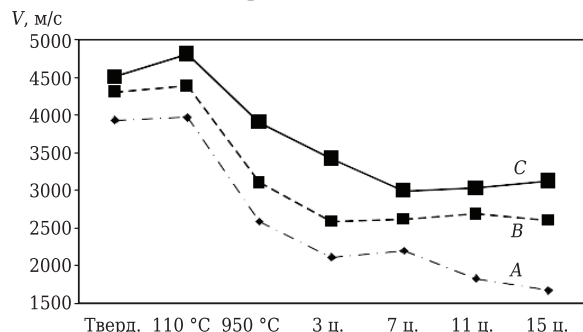
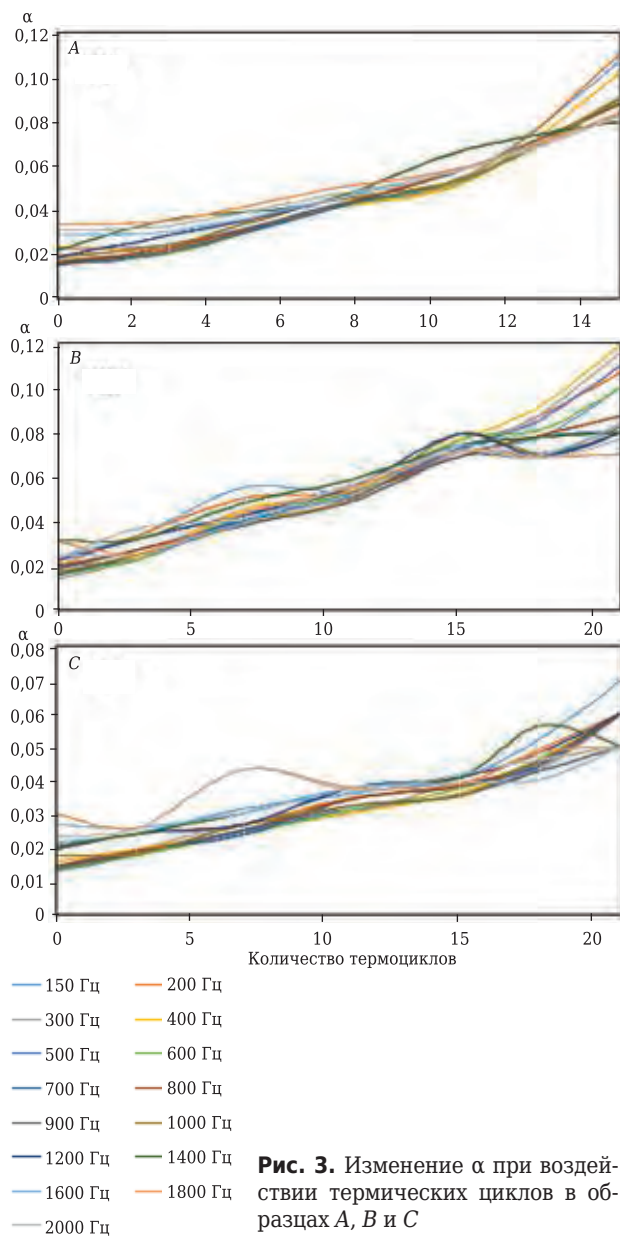


Рис. 2. Изменение скорости ультразвука V в образцах (указаны на кривых) при воздействии термических циклов



плотных и модифицированных образцах типа А, подверженных более скорому разрушению: после 15 циклов, когда в образцах А были замечены значительное крошение и отколы, α составил 0,08–0,11 (для разных частот). Для более плотных образцов В такое же максимальное значение $\alpha = 0,11$ было достигнуто лишь после 21 цикла. При этом для образцов С максимальное значение α после 21 цикла составило лишь 0,07. Для сопоставления: максимальные значения α после 15 и 21 цикла показаны на рис. 4.

Для одного и того же образца значение α колеблется в определенном интервале в зависимости от частоты звука (рис. 5). При этом все исследуемые материалы более чувствительны к звуку более низких частот: при частоте звука до ~600 Гц общий диапазон α , который покрывают кривые, шире, чем диапазон, соответствующий более высоким частотам. В этом же диапазоне частот

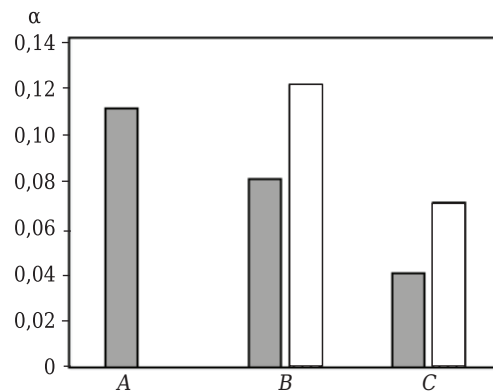


Рис. 4. Коэффициент поглощения звука после 15 (■) и 21 (□) циклов (максимальные значения)

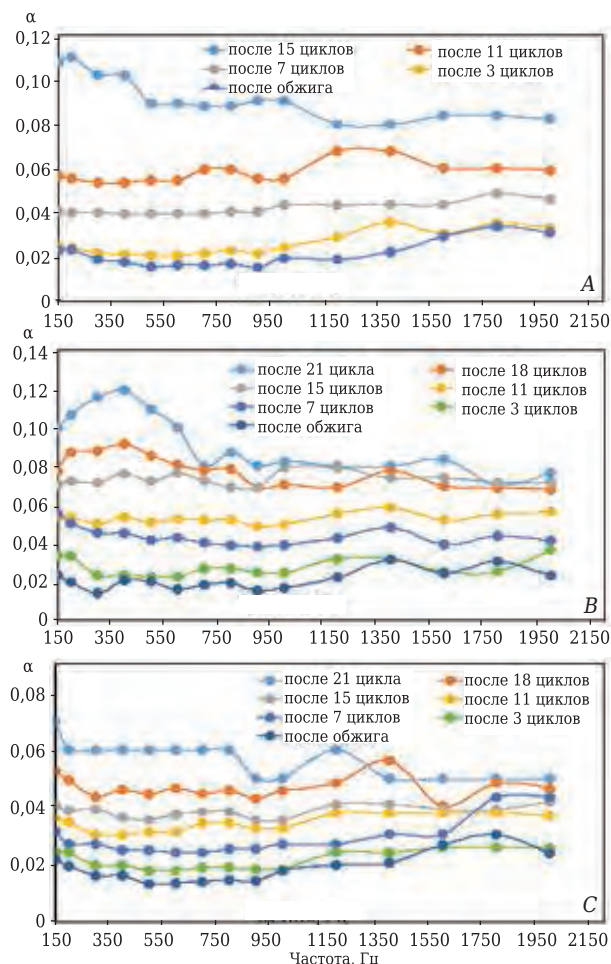


Рис. 5. Коэффициент поглощения звука в зависимости от частоты в образцах А, В и С

(150–600 Гц) для большинства кривых характерно достаточно постоянное значение α , меньше колеблющееся при изменении частоты звука. Учитывая это, дальнейший статистический анализ и составление уравнений регрессии были проведены с использованием данных, соответствующих диапазону частот 150–600 Гц.

Общий вид образцов после соответствующего числа циклов показан на рис. 6. Наибольшие разрушения были установлены на образцах А:

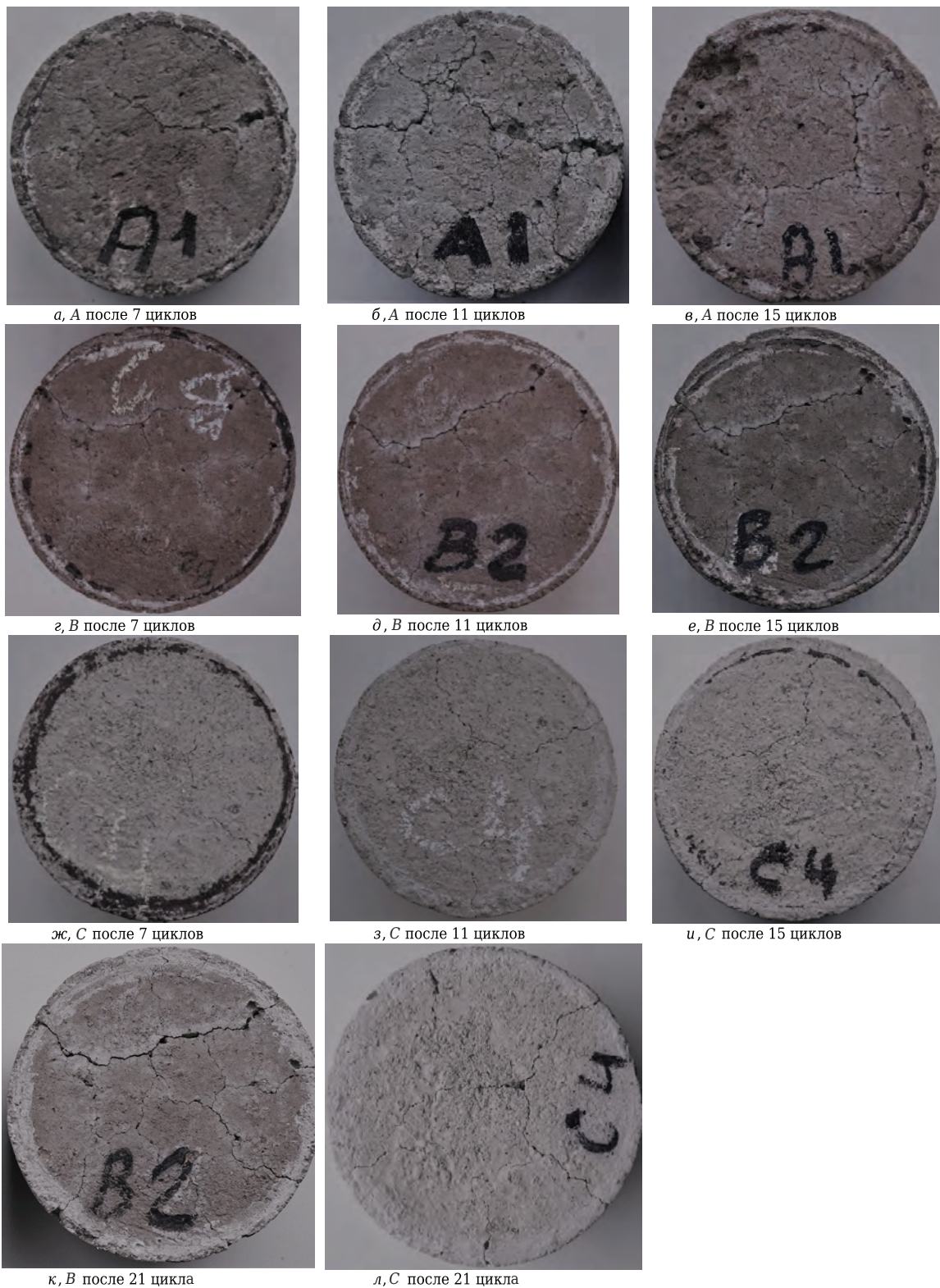


Рис. 6. Общий вид образцов после соответствующего числа циклов

Таблица 2. Уравнения регрессии и коэффициенты детерминации

Состав образцов	Плотность, г/см ³	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации	Критическое количество циклов N , рассчитанное по уравнению, принимая $\alpha_{кр} = 0,09$ (примеры)
А	~1950	$N = 169,9\alpha_{кр} - 0,616$	0,861	15
В	~2050	$N = 232,4\alpha_{кр} - 2,895$	0,965	18
С	~2300	$N = 470,2\alpha_{кр} - 5,610$	0,941	37

на рис. 6, б видно, что значительные трещины на поверхности образца появились уже после 11 циклов. После 15 циклов наблюдались глубокие трещины и значительные отколы, свидетельствующие о начале интенсивного разрушения материала, при котором дальнейшая эксплуатация изделия невозможна. Среднее значение α по данным, полученным для этого состояния образца с использованием звука в диапазоне 150–600 Гц, составило $\sim 0,1$. Такое же среднее значение α (для частоты 150–600 Гц), соответствующее началу критических разрушений материала, было установлено для образцов состава В. Глубокие критические трещины были обнаружены на этих образцах после 21 цикла (см. рис. 6, к). Для образцов состава С после 21 цикла среднее значение α (для частоты 150–600 Гц) составило $\sim 0,07$. При этом значительных повреждений материала (глубоких трещин, отколов) не было обнаружено (см. рис. 6, л). Таким образом, критическому состоянию материала соответствует определенное значение α , которое условно можно назвать критическим. На основании сопоставления состояния исследуемых образцов и установленных значений α для материалов $\alpha_{кр}$ можно принять равным 0,09–0,1.

В табл. 2 представлены уравнения регрессии, полученные для интервала частот 150–600 Гц. Уравнения составлены отдельно для каждого типа образцов. Согласно уравнениям, наибольшее количество циклов выдержит материал состава С. Достаточно высокие коэффициенты детерминации (0,861–0,965) свидетельствуют о том, что между α и количеством циклов существует тесная связь, а выбранная

упрощенная линейная модель достаточно хорошо ее описывает. Таким образом, метод измерения α может быть использован для прогнозирования долговечности жаростойких бетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования метода измерения коэффициента поглощения звука α для прогнозирования термостойкости и долговечности жаростойких материалов. На различных стадиях термоциклирования образцов выполнены измерения скорости распространения ультразвука V и коэффициента поглощения звука α . Полученные кривые зависимостей показывают тесную связь между количеством термических циклов, обуславливающих степень деградации материала, и обоими показателями α и V . Таким образом, оба параметра могут быть использованы в качестве косвенной характеристики для оценки уровня разрушений материала.

В работе установлены примерные критические значения $\alpha \approx 0,1$ и $V \approx 1700$ м/с, которые соответствуют значительному разрушению материала, при котором дальнейшая эксплуатация изделия невозможна. Также получены первичные уравнения регрессии, которые могут быть использованы для прогнозирования термической стойкости жаростойких материалов и установления их остаточного ресурса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Литовского совета по науке (LMTLT) в рамках договора № S-MIP-19-41.

Библиографический список

1. **Damhof, F.** Experimental analysis of the evolution of thermal shock damage using transit time measurement of ultrasonic waves / F. Damhof, W. A. M. Brekelmans, M. G. D. Geers // J. Eur. Ceram. Soc. — 2009. — Vol. 29. — P. 1309–1322.
2. **Soboyejo, W. O.** Investigation of thermal shock in a hightemperature refractory ceramic: a fracture mechanics approach / W. O. Soboyejo, C. Mercer // J. Am. Ceram. Soc. — 2001. — Vol. 84, № 6. — P. 1309–1314.
3. **Geck, H. G.** Kammerofen zur betriebsnahen Prüfung der Temperaturwechselbeständigkeit feuerfester Steine / H. G. Geck, H. J. Langhammer, A. Chakraborty // Stahl und Eisen. — 1973. — Vol. 93, № 21. — P. 967–976.
4. **Aggelis, D. G.** Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates / D. G. Aggelis, E. Z. Kordatos, T. E. Matikas // Mech. Res. Commun. — 2011. — Vol. 38. — P. 106–110.
5. **Ohtsu, M.** Quantitative AE techniques standardized for concrete structures / M. Ohtsu // Adv. Mater. Res. — 2006. — Vol. 13/14. — P. 183–192.
6. **Zhang, Z.** Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete / Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, H. Wang // Cem. Concr. Compos. — 2015. — Vol. 62. — P. 97–105.
7. **Verstrynge, E.** Monitoring of crack growth in masonry with acoustic emission and fibre optic sensors /

E. Verstrynge, M. Wevers // Proceedings of IIIAE, Kyoto, Japan. — 2016. — P. 129–134.

8. **Briche, G.** Investigation of the damage behaviour of refractory model materials at high temperature by combined pulse echography and acoustic emission techniques / G. Briche, N. Tessier-Doyen, M. Huger, T. Chotard // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28. — P. 2835–2843.

9. **Andreev, K.** Acoustic emission based damage limits and their correlation with fatigue resistance of refractory masonry / K. Andreev, N. Shetty, E. Verstrynge // Constr. Build. Mater. — 2018. — Vol. 165. — P. 639–646.

10. **Briche, G.** Investigation of the damage behaviour of refractory model materials at high temperature by combined pulse echography and acoustic emission techniques / G. Briche, N. Tessier-Doyen, M. Huger, T. Chotard // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28. — P. 2835–2843.

11. **Antonovič, V.** Procedural elements in estimation of the thermal shock resistance of different types of refractory concrete based on chamotte filler / V. Antonovič, M. Šukšta, I. Pundienė, R. Stonys // Refract. Ind. Ceram. — 2011. — Vol. 52. — P. 70–74. ■

Получено 24.09.20

© Р. Стонис, А. Ягнятинскис,
Ю. Малайшкене, Е. Шкама, В. Антонович,
А. Корякин, А. Куджма, 2020 г.

А. А. Таганова^{1,2}, Е. А. Бойченко^{1,2}, Н. В. Киселев^{1,3}, Б. Б. Хайдаров¹,
Е. А. Колесников¹, К. Т. Н. А. Г. Юдин¹, К. Х. Н. М. А. Викулова³,
К. Т. Н. Н. В. Горшков³, К. Т. Н. Д. В. Кузнецов¹, Д. Т. Н. И. Н. Бурмистров^{1,2} (✉)

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова», Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина», г. Саратов, Россия

УДК 621.362:661.874.22

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ПОЛЫХ МИКРОСФЕР СОСТАВА NiO И NiO/Ni ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Исследовано влияние режимов восстановления полых микросфер оксида никеля, синтезированных методом пиролиза ультразвуковых аэрозолей, на соотношение оксидной и металлической форм никеля в их структуре. Проведен синтез микросфер из аэрозоля водного раствора нитрата никеля, изучены их состава и морфология. Восстановление микросфер проводили в токе водорода при разных температурах. Соотношение металлического никеля и оксида определяли двумя разными методами: по данным термогравиметрического анализа и методом Ритвельда на основании результатов рентгенофазового анализа. Показано, что доля металлического никеля возрастает при повышении температуры восстановления примерно до 375 °С и далее изменяется незначительно. Определен фракционный состав микросфер.

Ключевые слова: полые микросферы, термоэлектрохимические преобразователи тепла, пиролиз ультразвуковых аэрозолей.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире очень широко применяют керамические материалы и изделия. Это обусловлено большой прочностью, значительной долговечностью, декоративностью многих видов керамики, а также распространенностью в природе сырьевых материалов.

Большими перспективами практического применения характеризуются полые микросферы на основе переходных металлов и их оксидов. В частности, они могут применяться как материалы катализаторов в различных реакциях [1–3], как сорбенты органических красителей [4, 5], а наибольшее количество исследований в

области применения микросфер сконцентрировано на создании электродных материалов для аккумуляторов, суперконденсаторов и термоэлектриков [6–10].

Существует много разных методов получения полых микросфер [11]: механическое измельчение, осаждение (precipitation), лиофильная сушка (lyophilization), сублимационная сушка (freeze-drying), распылительная сушка (spray-drying), распылительный пиролиз (spray-pyrolysis), метод сверхкритической жидкости (supercritical fluid) и эмульсионный метод (emulsion-based methods). Метод распылительного пиролиза очень перспективен [12]. Он совмещает в себе удобство лабораторного использования, а также позволяет получать полые микросферы заданного диаметра с узким распределением. Большим достоинством является возможность гибкого управления условиями получения частиц с заданной морфологией. Свойства микросфер, получаемых методом распылительного пиролиза, зависят от широкого спектра факторов, включающих температурный



И. Н. Бурмистров
E-mail: burmistrov.in@misis.ru

режим [13, 14], а также применение различных органических добавок [15–19] для увеличения удельной поверхности материала, что может повысить адсорбционные свойства и увеличить площадь контакта, повышая эффективность материала.

Для металлических микросфер важными факторами, определяющими эффективность их применения в составе электродных материалов, являются фазовый состав и доля металлической фазы, зависящая от степени восстановления изначально синтезированного порошка микросфер NiO. Цель данной работы — исследование зависимости соотношения металлического Ni и NiO в микросферах, синтезированных методом спрей-пиролиза, от температурного режима восстановления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для синтеза образцов полых микросфер методом распылительного пиролиза был использован нитрат никеля шестиводный ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (ООО «Вектон», Россия) квалификации ч.д.а. (99,8 % основного вещества). Образцы были изготовлены методом ультразвукового распылительного пиролиза (рис. 1).

Прекурсором для синтеза выступал водный раствор нитрата никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) с содержанием соли 15 мас. %. Подготовленный раствор заливали в емкость ультразвукового генера-

тора, который производит диспергирование с поверхности раствора и создает поток капель, постоянная скорость потока (30 л/мин) поддерживается с помощью воздушного компрессора. В реакторе из кварцевого стекла стабильно поддерживается температура 900 °С.

Из полых микросфер NiO изготавливают металлические микросферы путем его восстановления водородом в секционной печи при 300–400 °С. По окончании процесса восстановления металлические полые сферы пассивируются в токе азота с малым содержанием кислорода.

Морфологию и размеры частиц до и после процесса восстановления исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 2) с помощью анализатора Tescan Vega3, (TESCAN, Чехия) с SDD-XMAS (Япония).

Для восстановленных сфер при разных температурах методами ТГА и РФА было определено соотношение никеля, находящегося в форме оксида и металла. Термогравиметрический анализ проводили на приборе TGA/DSC 3+ (Mettler Toledo, США) в атмосфере воздуха. Эксперимент включал в себя нагревание образца от 25 до 1000 °С со скоростью 10 град/мин (рис. 3, а). Использовали многочисленные тигли из Al_2O_3 , тигли заполнялись на 0,3 высоты, исходные массы образцов варьировались от 5,1250 до 5,7150 мг.

Рентгенофазовый анализ проведен на дифрактометре ARL X'TRA фирмы Thermo Scientific (Швейцария) с использованием Cu K_α -излучения ($\lambda = 0,15412 \text{ нм}$) в диапазоне углов 2θ (5–90 град). Использована геометрия измерений Брэгга – Брентано, пошаговый режим сканирования (шаг 0,02 град) со скоростью 1,2 [20]. Для идентификации фаз на дифрактограммах применяли библиотеку международной электронной базы дифракционных стандартов (выпускается компанией ICDD — International Center for Diffraction Data) —

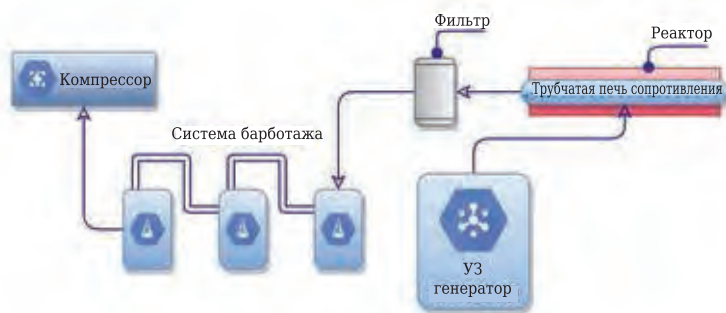


Рис. 1. Схема установки ультразвукового спрей-пиролиза

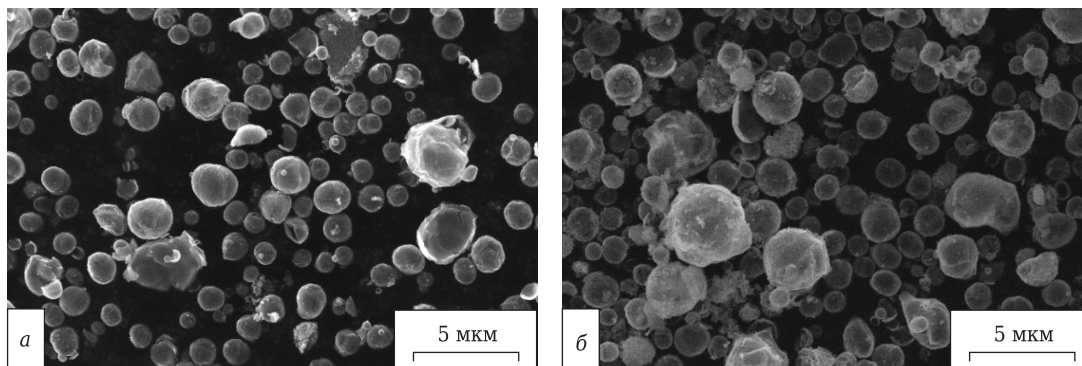


Рис. 2. СЭМ-изображения микросфер NiO до восстановления (а) и частиц Ni после восстановления (б)

базы данных PDF-2 (Powder Diffraction File-2) в программе Crystallographic Search-Match Version 3.1.0.2.

Расчет по данным РФА проводили методом Ритвельда, который подразумевает уточнение и приближение теоретической линии профиля дифрактограммы к экспериментальным данным посредством подбора параметров образца и измерения методом наименьших квадратов. Далее проводили нестандартный количественный фазовый анализ в программе GSAS (набор программ для обработки и анализа данных дифракции монокристаллов и порошков, полученных с помощью РФА или нейтронографии).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдается небольшой разброс размеров синтезированных микросфер как до, так и после восстановления. Следует отметить, что морфология и размеры частиц в процессе восстановления полностью сохраняются. Как до, так и после восстановления в материале присутствует незначительное количество агрегатов деформированных и разрушенных микросфер (см. рис. 2).

Изменение массы никелевых микросфер, восстановленных при различных температурах, показано на рис. 3, а, результаты рентгенофазового анализа на рис. 3, б.

Для количественной оценки содержания элементарного никеля в образцах, производили расчет соотношения восстановленной и оксидной форм согласно уравнению реакции, происходящей при окислении материала в ходе эксперимента: $2\text{Ni} + \text{O}_2 = 2\text{NiO}$.

При этом прирост массы образца принимали как массу кислорода, вступившего в реакцию с восстановленным металлическим никелем.

Процентное содержание никеля в микросферах возрастает при увеличении температуры восстановления от 300 до 375 °C и далее выходит на плато, при этом максимальное содержание никеля достигает 72 мас. % (рис. 4).

Расчет, проведенный методом Ритвельда по результатам РФА, показывает схожий характер нарастания содержания металлического никеля в образцах при увеличении температуры восстановления. Расхождение в полученных результатах, вероятнее всего, связано с заниженными данными содержания оксидной фазы, рассчитанными по РФА в связи со спецификой полуколичественного метода и частичной рентгеноаморфностью оксидов никеля. Неточность ТГА метода также может быть обусловлена строением сфер, при котором окисление происходит только на внешней поверхности сферы, если отсутствуют поры. Тем не менее доля таких сфер крайне мала.

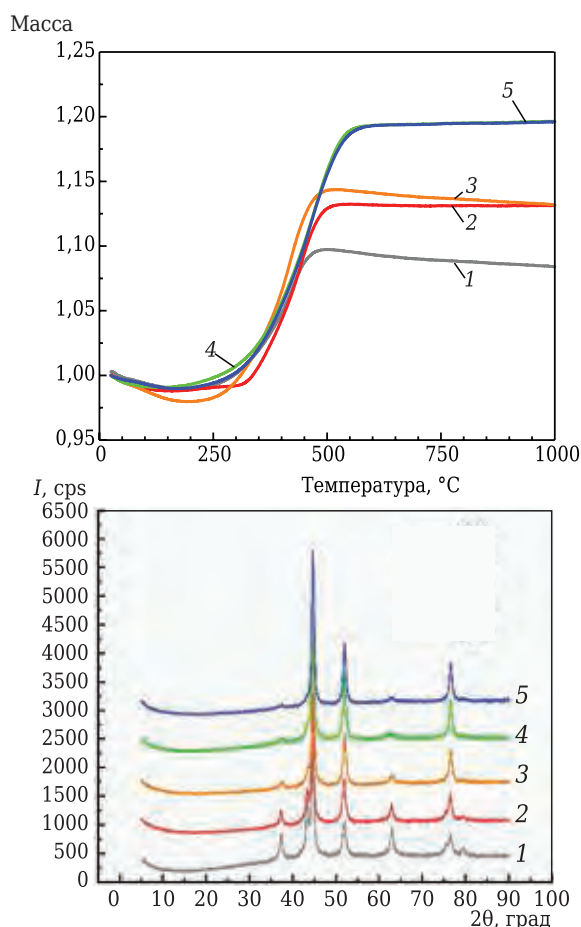


Рис. 3. Термогравиметрические кривые окисления металлического Ni (а) и РФА спектры образцов с разной температурой восстановления (б): 1 — 300 °C; 2 — 325 °C; 3 — 350 °C; 4 — 375 °C; 5 — 400 °C

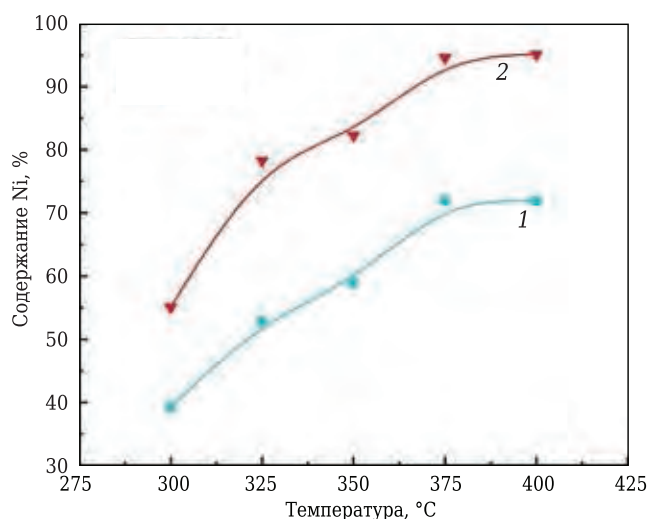


Рис. 4. Зависимость содержания металлического никеля в образцах в зависимости от температуры их восстановления при расчетах по данным ТГА (1) и РФА (2)

Гранулометрический анализ порошка NiO характеризуется мономодальным распределением частиц и размерами от 0,1 до 15 нм, со средним размером частиц 3 мкм (рис. 5).

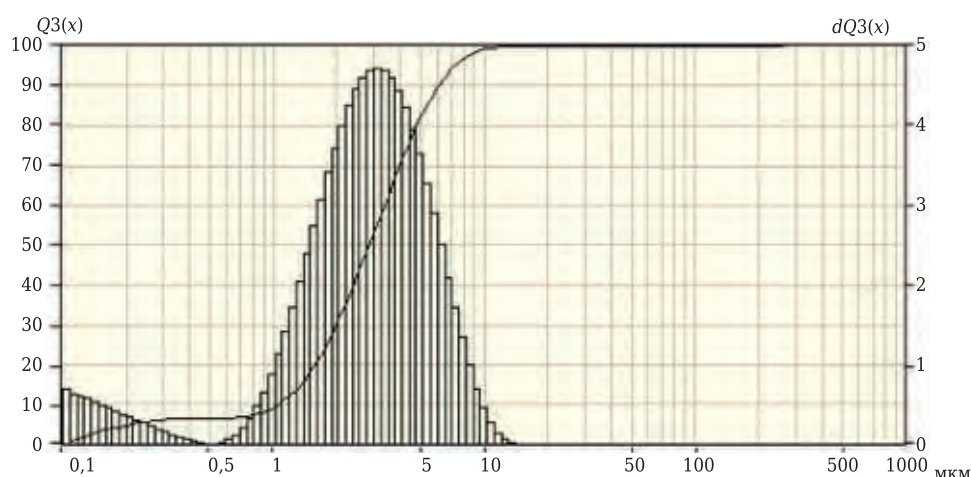


Рис. 5. Гранулометрический состав микросфер NiO

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена зависимость соотношения никеля, находящегося в металлической форме и в виде оксида, от температуры восстановления. На основании полученной зависимости показано, что температура выше 375 °C не приводит к увеличению содержания металлического никеля, что может быть объяснено полным восстановлением уже при данной температуре, а наличие

оксидной фазы в данном случае объясняется необходимой стадией пассивации.

Синтезированные микросферы обладают морфологией, близкой к сферам, состоят из оксида никеля или никеля с оксидной пленкой, более 60 % сфер имеют размеры от 2 до 4 мкм. Фракционный состав порошка показал мономодальное распределение частиц по размерам со средним размером частиц 3 мкм.

Библиографический список

1. **Feng, X.** Copper oxide hollow spheres: synthesis and catalytic application in hydrolytic dehydrogenation of ammonia borane / X. Feng, X.-M. Chen, P. Qiu [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. — 2018. — Vol. 43, № 45. — P. 20875–20881.
2. **Tan, X.** Three-dimensional MnO₂ porous hollow microspheres for enhanced activity as ozonation catalysts in degradation of bisphenol A / X. Tan, Yi. Wan, Ya. Huang [et al.] // Journal of Hazardous Materials. — 2017. — Vol. 321. — P. 162–172.
3. **Zhai, S.** Fabrication of hollow-catalytic microspheres (HCMs) with double-sided materials and their application on wastewater treatment / S. Zhai, M. Li, D. Wang, Sh. Fu // Journal of Cleaner Production. — 2020. — P. 119956.
4. **Chen, H.** Chestnut husk-like nickel cobaltite hollow microspheres for the adsorption of Congo red / H. Chen, Yi. Zheng, B. Cheng, J. Yu // J. Alloys Compd. — 2018. — Vol. 735. — P. 1041–1051.
5. **Chen, H.** Hierarchical C/NiO–ZnO nanocomposite fibers with enhanced adsorption capacity for Congo red / H. Chen, S. Wageh, A. Al-Ghamdi, H. Wang // Journal of Colloid and Interface Science. — 2019. — Vol. 537. — P. 736–745.
6. **Li, H.** Highly controlled synthesis of multi-shelled NiO hollow microspheres for enhanced lithium storage properties / H. Li, H. Ma, M. Yang [et al.] // Materials Research Bulletin. — 2017. — Vol. 87. — C. 224–229.
7. **Wang, J.** Design of hollow nanostructures for energy storage, conversion and production / J. Wang, Y. Cui, D. Wang // Advanced Materials. — 2019. — Vol. 31, № 38. — P. 1801993.
8. **Zhang, C.** Well-designed hollow and porous Co₃O₄ microspheres used as an anode for Li-ion battery / C. Zhang, F. Ke, H. Xiao, H. Zhang // Journal of Solid State Electrochemistry. — 2019. — Vol. 23, № 8. — P. 2477–2482.
9. **Burmistrov, I.** High seebeck coefficient thermo-electrochemical cell using nickel hollow microspheres electrodes / I. Burmistrov, N. Gorshkov, N. Kovyneva [et al.] // Renewable Energy. — 2020. — № 157. — P. 1–8.
10. **Burmistrov, I.** Development of new electrode materials for thermo-electrochemical cells for waste heat harvesting / I. Burmistrov, N. Kovyneva, N. Gorshkov [et al.] // Renewable Energy Focus. — 2019. — № 29. — P. 42–48.
11. **Ong, C. B.** A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: synthesis, mechanisms and applications / C. B. Ong, L. Y. Ng, A. W. Mohammad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 81. — P. 536–551.
12. **Yudin, A.** Synthesis of hollow nanostructured nickel oxide microspheres by ultrasonic spray atomization / A. Yudin, N. Shatrova, B. Khaydarov [et al.] // Journal of Aerosol Science. — 2016. — Vol. 98. — P. 30–40.
13. **Thirumoorthi, M.** Structure, optical and electrical properties of indium tin oxide ultra thin films prepared by jet nebulizer spray pyrolysis technique / M. Thirumoorthi, J. Thomas Joseph Prakash // Journal of Asian Ceramic Societies. — 2016. — Vol. 4, № 1. — P. 124–132.
14. **Zeggar, M. L.** Solution flow rate influence on properties of copper oxide thin films deposited by ultrasonic spray pyrolysis / M. L. Zeggar, L. Chabane, M. S. Aida [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2015. — Vol. 30. — P. 645–650.
15. **Shih, S. J.** Manipulation of morphology of strontium titanate particles by spray pyrolysis / S. J.

Shih, W. L. Tzeng // Powder Technology. — 2014. — Vol. 264. — P. 291–297.

16. **Edinger, S.** Influence of the acetic acid concentration on the growth of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis of aqueous solutions / S. Edinger, J. Bekacz, M. Richter, R. Hamid // Thin Solid Films. — 2015. — Vol. 594. — P. 238–244.

17. **Shih, S. J.** Fabrication of ceria particles using glycine nitrate spray pyrolysis / S. J. Shih, W. L. Tzeng, W. L. Kuo // Surface and Coatings Technology. — 2014. — Vol. 259. — P. 302–309.

18. **Trusov, G. V.** High porous cellular materials by spray solution combustion synthesis and spark plasma sintering / G. V. Trusov, D. O. Moskovskikh, A. S. Rogachev [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2019. — Vol. 779. — C. 557–565.

19. **Min, B. H.** Enhanced upconversion luminescence of GdVO_4 : $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ prepared by spray pyrolysis using organic additives / B. H. Min, K. Y. Jung // RSC Advances. — 2019. — Vol. 9, № 35. — C. 20002–20008.

20. **Scarlett, N. V. Y.** Outcomes of the international union of crystallography commission on powder diffraction round robin on quantitative phase analysis: samples 2, 3, 4, synthetic bauxite, natural granodiorite and pharmaceuticals / N. V. Y. Scarlett, I. C. Madsen, L. M. D. Cranswick [et al.] // Journal of Applied Crystallography. — 2002. — Vol. 35, № 4. — C. 383–400. ■

Получено 13.10.20

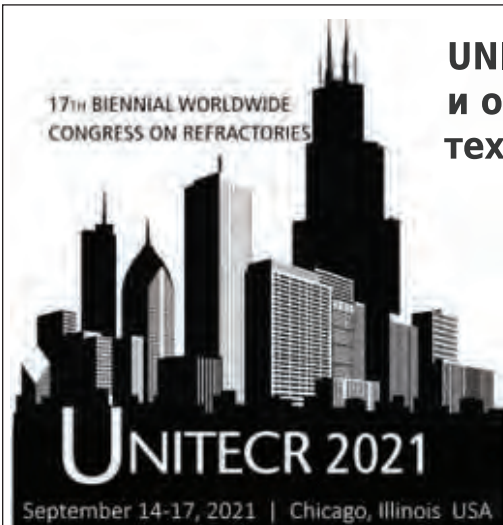
© А. А. Таганова, Е. А. Бойченко,

Н. В. Киселев, Б. Б. Хайдаров, Е. А. Колесников,

А. Г. Юдин, М. А. Видулова, Н. В. Горшков,

Д. В. Кузнецов, И. Н. Бурмистров, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



UNITECR 2021 — 17-й всемирный конгресс и объединенная международная техническая конференция по огнеупорам

14–17 сентября 2021 г.
г. Чикаго, США

Тезисы докладов по основным темам:

- Огнеупоры:
 - для черной металлургии
 - для цветной металлургии
 - для цементной промышленности
 - для стекольной промышленности
 - для нефтехимических процессов
- Огнеупорные материалы для сжигания отходов и др.
- Сырье
- Экологическая устойчивость и переработка
- Достижения в области производства и оборудования
- Огнеупорные инженерные системы и дизайн
- Новые разработки
- Базовая наука
- Энергосбережение и теплоизоляция
- Тестирование огнеупоров
- Образование
- Применение промышленных огнеупоров
- Кооперация производителей, потребителей и исследователей

www.Unitecr2021.org

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 666.3:546.28'171].017:539.375

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ Si_3N_4 -TiC-КЕРАМИКИ

С использованием базовых положений компьютерной инженерии изучено напряженное состояние поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки. Выявлено формирование микроструктурных концентраторов напряжений в точке приложения сосредоточенной силы, приводящих к изменению структуры керамики за счет образования несплошностей.

Ключевые слова: Si_3N_4 -TiC-керамика, поверхностный слой, напряженное состояние, интенсивность напряжений, микроструктурный концентратор напряжений, несплошности, компьютерная инженерия.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение структуры поверхностного слоя (ПС) керамики под действием эксплуатационных нагрузок является начальной стадией сложного и продолжительного процесса выхода изделия из работоспособного состояния [1–8]. Исследования изделий из оксидной, нитридной и карбидной керамики в разных условиях эксплуатации показали, что механизм изменения структуры ПС керамики заключается в спонтанном образовании видимых и скрытых дефектов, имеющих разную форму и размеры, как в изолированных областях, так и в смежных [9–11].

Кинетика этого процесса включает три взаимосвязанных этапа [12, 13]. Первый — формирование напряженно-деформированного состояния ПС керамики под действием внешней нагрузки. Второй — первичная трансформация исходной структуры ПС керамики за счет появления единичных дефектов в виде несплошностей в результате упругих смещений контактирующих частиц. Третий — накопление и объединение несплошностей с образованием зародышевых трещин. Главным негативным последствием этого циклически повторяющегося механизма является моментальное формирование структурных концентраторов напряжений вокруг вновь образовавшихся несплошностей

[14]. Увеличение числа несплошностей и, соответственно, микроструктурных концентраторов напряжений «ухудшает» напряженное состояние и создает благоприятные условия для спонтанного образования новых дефектов [15, 16].

Роль каждого этапа в изменении структуры ПС керамики при ее эксплуатации интуитивно понятна. Однако ограниченный объем знаний о взаимодействии сложных явлений на этих этапах, а также отсутствие данных о влиянии трансформированной структуры на напряженное состояние не позволяют построить обобщенную модель эксплуатации керамических изделий. Особого внимания требует взаимосвязь структуры ПС, трансформированной под действием технологических и эксплуатационных нагрузок, с напряженным состоянием. Эта взаимосвязь детально исследована в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики с использованием базовых положений компьютерной инженерии [17]. Систематизированные результаты силового, теплового, комбинированного и системного анализов напряженно-деформированного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики показали глубокое понимание процесса изменения его структуры под действием эксплуатационных нагрузок [18–21]. Для Si_3N_4 -TiC-керамики аналогичные исследования ранее не выполнялись.

В настоящей работе поставлена цель — изучить характер распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 -TiC-керамики под действием силовой, тепловой и комбинированной нагрузки для выявления особенностей процесса изменения структуры ПС керамики при ее эксплуатации. Результаты исследований будут изложены в четырех статьях. В настоящей статье



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

приведены результаты численных экспериментов с использованием силовой нагрузки.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термopочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы № 1 и метода контрольных точек (КТ) [17, 22]. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в шести поверхностях C1–C6 (табл. 1) шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики четырех систем (№ 1–4, табл. 2) под действием сосредоточенной ($F = 0,02 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$) и распределенной ($P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$) силы. Анализ статистических характеристик (наименьшие $\sigma_{\text{мин}}$, наибольшие $\sigma_{\text{макс}}$, средние $\sigma_{\text{ср}}$ значения σ_i , диапазон изменения значений $\Delta\sigma_i$ и стандартное отклонение s для σ_i) в КТ каждой поверхности выполнен с использованием программного комплекса Statistica. Более подробно методика численных экспериментов приведена в статье [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерная схема деформации ПС шлифованной Al_2O_3 –TiC-керамики (на примере системы № 1) под действием силовой нагрузки показана на рис. 1, а. Видно, что точка 0, к которой приложена сосредоточенная сила, перемещается с некоторым отклонением от направления сосредоточенной силы и имеет наибольшие значения горизонтальных u и вертикальных v перемещений среди всех КТ. Значения u и v для этих КТ уменьшаются с увеличением расстояния от них до точки 0.

Поля σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики всех систем, образовавшиеся при одновременном воздействии сосредоточенной и распределенной силы, однотипны. В качестве примера на рис. 1, б показано поле σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки. Видно, что наиболее сложное напряженное состояние формируется в верхней части ПС в области, к которой

Таблица 1

Обозначение поверхности	Структурные особенности поверхности	Номер КТ
C1	Поверхность зерна, контактирующая с межзеренной фазой	КТ1–КТ18
C2	Поверхность межзеренной фазы, контактирующая с зерном	КТ19–КТ34
C3	Поверхность межзеренной фазы, контактирующая с матрицей	КТ35–КТ50
C4	Поверхность матрицы, контактирующая с межзеренной фазой	КТ51–КТ66
C5	Фрагменты поверхностей зерна, межзеренной фазы и матрицы, контактирующие со слоем	КТ67–КТ82
C6	Поверхность слоя, контактирующая с фрагментами зерна межзеренной фазы и матрицы	КТ83–КТ98

Таблица 2

Система	Зерно	Межзеренная фаза	Матрица	Слой
№ 1	Si_3N_4	Y_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4
№ 2	Si_3N_4	Y_2O_3	Si_3N_4	TiC
№ 3	TiC	Y_2O_3	Si_3N_4	Si_3N_4
№ 4	TiC	Y_2O_3	Si_3N_4	TiC

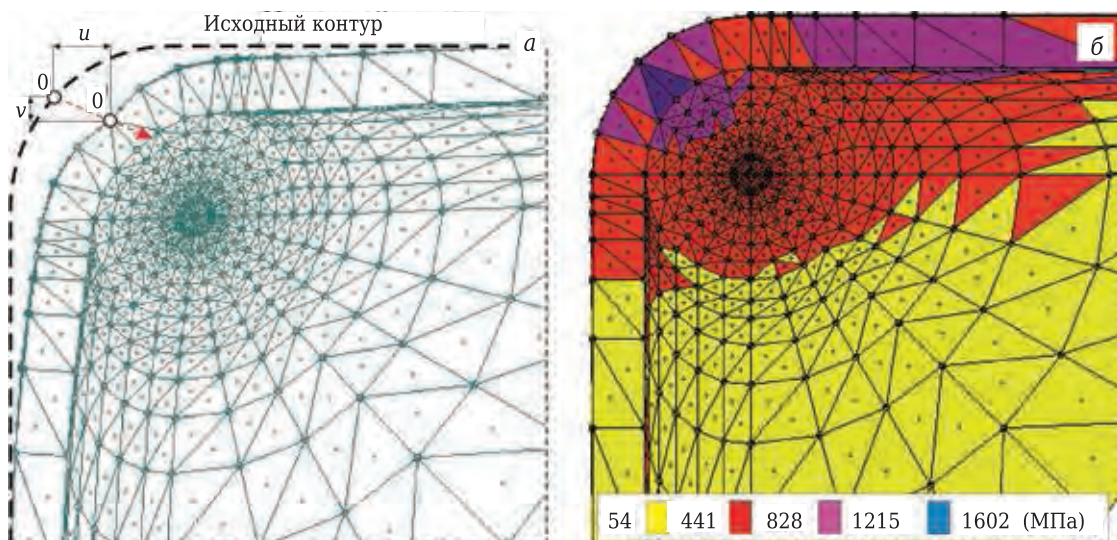


Рис. 1. Схема деформации и поле интенсивности напряжений σ_i в ПС шлифованной Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки

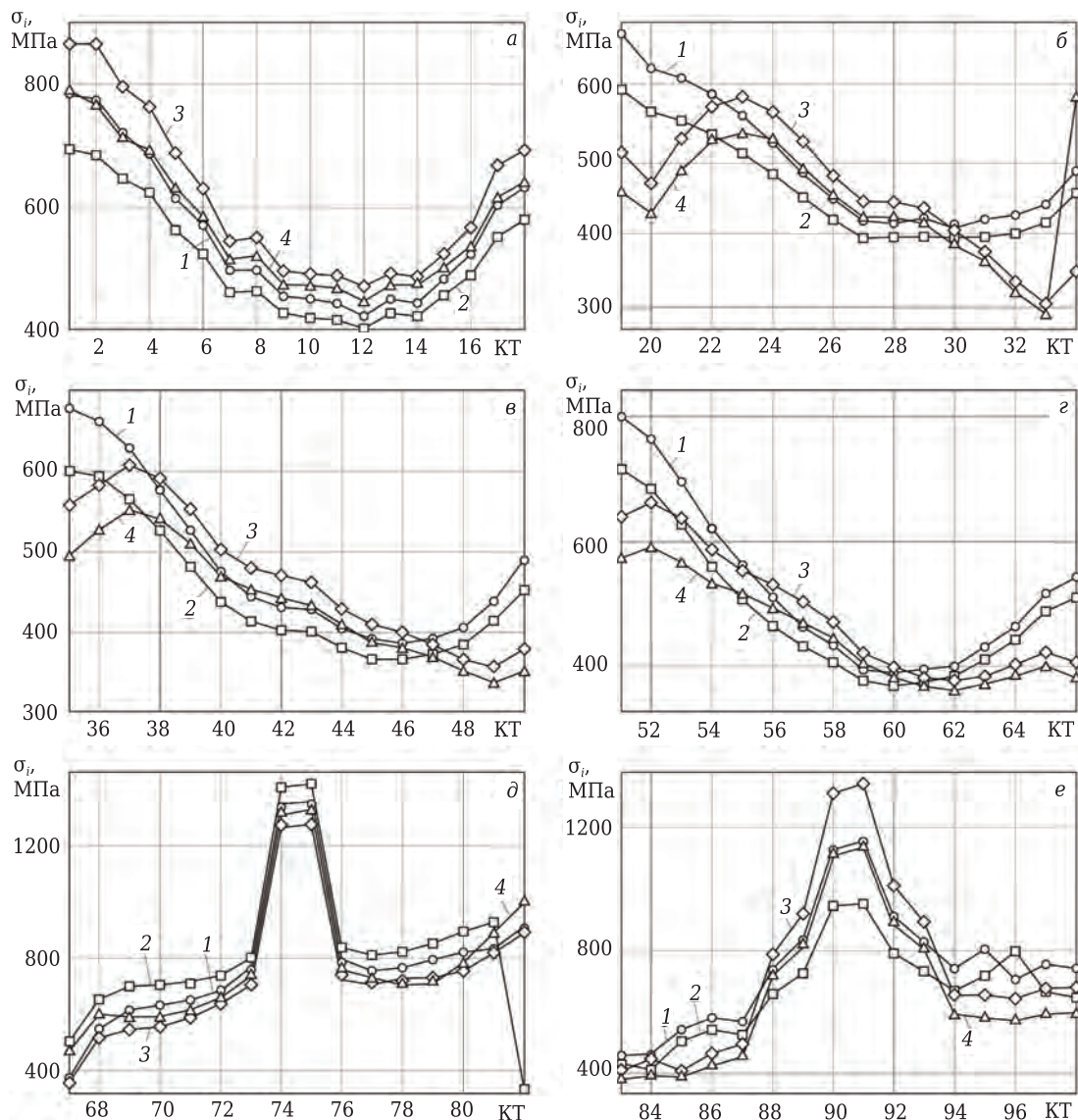


Рис. 2. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 (1–4) под действием силовой нагрузки

приложена силовая нагрузка. Наибольшая σ_i (до 1600 МПа) формируется в локальной области слоя, на которую действует сосредоточенная сила, а во внутреннем объеме керамики σ_i не превышает 441 МПа.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C1 Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, а. Видно, что все кривые одинаковы по форме; в КТ1 зафиксированы наибольшие значения σ_i , а в КТ12 — наименьшие. В поверхности C1 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 425 ($\sigma_{\text{мин}}$) до 781 МПа ($\sigma_{\text{макс}}$) при $\Delta\sigma_i = 356$ МПа, системы № 2 — от 401 до 696 МПа при $\Delta\sigma_i = 295$ МПа, системы № 3 — от 469 до 862 МПа при $\Delta\sigma_i = 393$ МПа, системы № 4 — от 446 до 783 МПа при $\Delta\sigma_i = 337$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 4 имеют проме-

жуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 1 эти значения несколько выше, чем у системы № 4. Связь для σ_i в этой поверхности всех систем имеет наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C2 Si_3N_4 -TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, б. Видно, что в центральной области этой поверхности (КТ20–КТ33) форма всех кривых одинакова, а на периферийных участках (КТ19–КТ23 и КТ33–КТ34) форма кривых для систем № 1 и 2 отличается от формы кривых для систем № 3 и 4. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ19 (для систем № 1 и 2) и КТ23 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ27 (для систем № 1 и 2) и КТ33 (для систем № 3 и 4). В поверхности C2 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 415 до 677 МПа при $\Delta\sigma_i = 262$ МПа, систе-

мы № 2 — от 394 до 604 МПа при $\Delta\sigma_i = 210$ МПа, системы № 3 — от 304 до 590 МПа при $\Delta\sigma_i = 286$ МПа, системы № 4 — от 290 до 592 МПа при $\Delta\sigma_i = 302$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 4, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 3 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 1. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i имеет связь систем № 1 и 2, наименьший (0,5) — связь систем № 1 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, в. Видно, что центральная часть кривых от КТ38 до КТ46 имеет одинаковую форму, а их периферийные участки по форме различаются. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ35 (для систем № 1 и 2) и КТ37 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ46 (для систем № 1 и 2) и КТ49 (для систем № 3 и 4). В поверхности С3 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 388 до 677 МПа при $\Delta\sigma_i = 289$ МПа, системы № 2 — от 369 до 600 МПа при $\Delta\sigma_i = 231$ МПа, системы № 3 — от 359 до 609 МПа при $\Delta\sigma_i = 250$ МПа, системы № 4 — от 341 до 554 МПа при $\Delta\sigma_i = 195$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 3 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 2. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,89) — связь систем № 3 и 4, № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С4 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, г. Видно, что форма всех кривых идентична форме кривых для системы С3. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется в КТ51 (для систем № 1 и 2) и КТ52 (для систем № 3 и 4), наименьшая — в КТ61 (для систем № 1 и 2) и КТ62 (для систем № 3 и 4). В поверхности С4 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 392 до 801 МПа при $\Delta\sigma_i = 409$ МПа, системы № 2 — от 371 до 717 МПа при $\Delta\sigma_i = 346$ МПа, системы № 3 — от 378 до 659 МПа при $\Delta\sigma_i = 281$ МПа, системы № 4 — от 363 до 591 МПа при $\Delta\sigma_i = 228$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 2 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 3. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,86) — связь систем № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С5 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием

силовой нагрузки показан на рис. 2, д. Видно, что форма этих кривых принципиально отличается от формы кривых для поверхностей С1–С4 присутствием пика в КТ73–КТ76. Соответственно в этих КТ формируются наибольшие значения σ_i для всех систем, а в КТ67 (для систем № 1, 3 и 4) и КТ82 (для системы № 2) — наименьшие. Во всех КТ поверхности С5 керамики значения σ_i для разных систем очень близки: σ_i системы № 1 изменяется в диапазоне от 374 до 1347 МПа при $\Delta\sigma_i = 973$ МПа, системы № 2 — от 104 до 1428 МПа при $\Delta\sigma_i = 1324$ МПа, системы № 3 — от 360 до 1284 МПа при $\Delta\sigma_i = 924$ МПа, системы № 4 — от 472 до 1340 МПа при $\Delta\sigma_i = 868$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 2, наименьшими — система № 4. Системы № 1 и 3 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 1 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 3. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 3, наименьший (0,62) — связь систем № 2 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, е. Видно, что форма кривых сходна с формой кривых для поверхности С5 при значительно большей ширине основания пика. Наибольшая σ_i в этой поверхности формируется во всех системах в КТ91, наименьшая — в КТ83. В поверхности С6 керамики системы № 1 σ_i изменяется в диапазоне от 448 до 1148 МПа при $\Delta\sigma_i = 700$ МПа, системы № 2 — от 405 до 954 МПа при $\Delta\sigma_i = 549$ МПа, системы № 3 — от 415 до 1341 МПа при $\Delta\sigma_i = 926$ МПа, системы № 4 — от 391 до 1138 МПа при $\Delta\sigma_i = 747$ МПа. Наибольшими значениями $\Delta\sigma_i$ характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 4 имеют промежуточные значения $\Delta\sigma_i$, причем у системы № 4 $\Delta\sigma_i$ несколько выше, чем у системы № 1. Наибольший коэффициент корреляции (равный 1), значимый на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеет связь систем № 1 и 2, № 3 и 4, наименьший (0,86) — связь систем № 2 и 3, № 2 и 4.

Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей С1–С6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показаны на рис. 3. Для всех распределений выявлены два общих признака: значения σ_i во всех поверхностях можно считать нормально распределенными, наибольшее число КТ концентрируется в диапазоне σ_i 350–700 МПа. При однотипной форме кривых распределения σ_i в КТ значения статистических характеристик для разных систем существенно различаются.

Распределение σ_i в КТ поверхностей С1–С6 Si₃N₄-TiC-керамики системы № 1 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, а. Установлено, что в поверхности С1 среднее значение σ_i (далее σ_{cp}) составляет 559,8 МПа при $s = 119$ %,

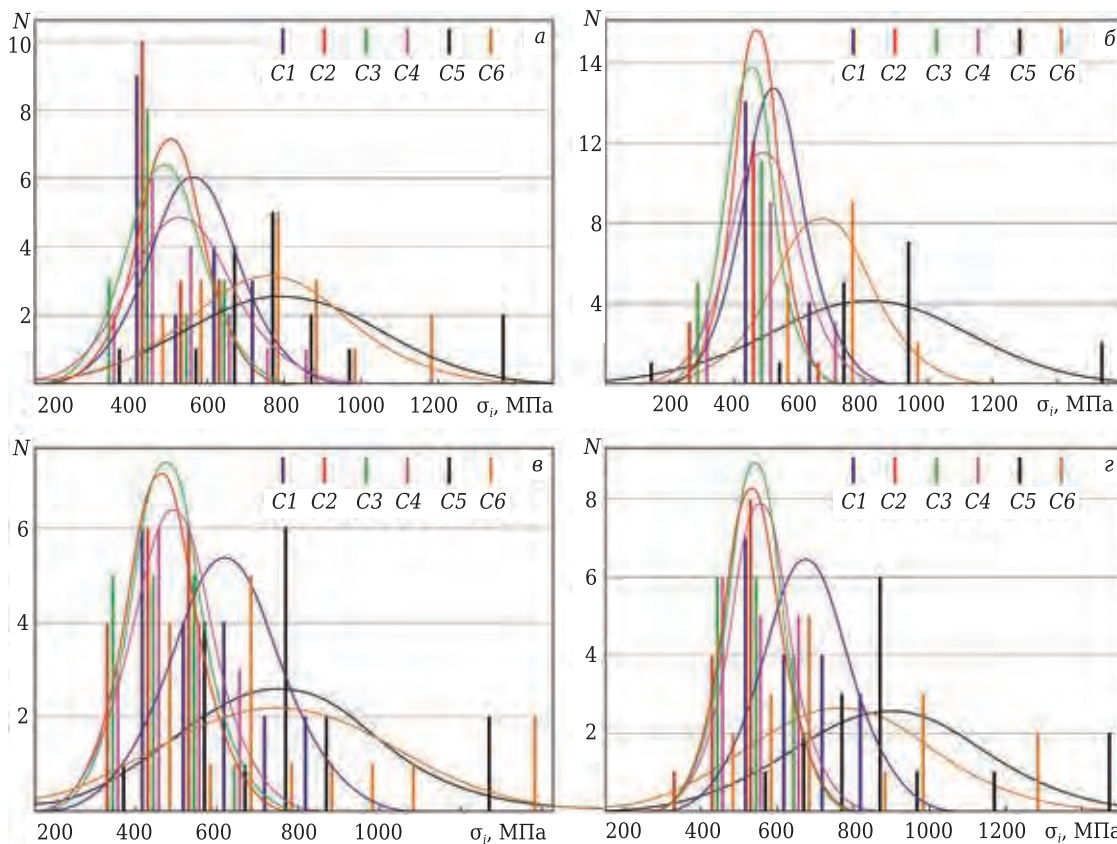


Рис. 3. Гистограммы распределения σ_i в КТ поверхностей C1–C6 керамики систем № 1–4 (а–г) под действием силовой нагрузки

в поверхности C2 — 501,9 МПа при $s = 89,2 \%$, в поверхности C3 — 485,1 МПа при $s = 99,7 \%$, в поверхности C4 — 526 МПа при $s = 131,8 \%$, в поверхности C5 — 792,1 МПа при $s = 250,9 \%$, в поверхности C6 — 754,3 МПа при $s = 202,6 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 1 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} — поверхность C3, наименьшими s — поверхность C2. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,6 раза, соответственно для s — в 2,8 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 2 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, б. В поверхности C1 σ_{cp} составляет 515 МПа при $s = 97,7 \%$, в поверхности C2 — 464,1 МПа при $s = 72,5 \%$, в поверхности C3 — 448,6 МПа при $s = 81,1 \%$, в поверхности C4 — 486,5 МПа при $s = 111,0 \%$, в поверхности C5 — 810,8 МПа при $s = 308,5 \%$, в поверхности C6 — 667,5 МПа при $s = 155,7 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 2 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} — поверхность C3, наименьшими s — поверхность C2. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,8 раза, соответственно для s — в 4,3 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 3 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, в. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет

616,2 МПа при $s = 133,6 \%$, в поверхности C2 — 462,4 МПа при $s = 89,3 \%$, в поверхности C3 — 472,1 МПа при $s = 86,3 \%$, в поверхности C4 — 488,2 МПа при $s = 99,8 \%$, в поверхности C5 — 745,8 МПа и $s = 245,7 \%$, в поверхности C6 — 741,9 МПа при $s = 291,9 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 3 характеризуются поверхности C5 и C6, наименьшими — поверхности C3 и C2 соответственно. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,6 раза, соответственно для s — в 3,4 раза.

Распределение σ_i в КТ поверхностей C1–C6 Si_3N_4 –TiC-керамики системы № 4 под действием силовой нагрузки показано на рис. 3, г. Установлено, что в поверхности C1 σ_{cp} составляет 571,7 МПа при $s = 111,3 \%$, в поверхности C2 — 447,8 МПа при $s = 81,9 \%$, в поверхности C3 — 439,7 МПа при $s = 71,5 \%$, в поверхности C4 — 453,2 МПа при $s = 80,9 \%$, в поверхности C5 — 788 МПа при $s = 249 \%$, в поверхности C6 — 660,6 МПа при $s = 241,8 \%$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s в системе № 4 характеризуется поверхность C5, наименьшими σ_{cp} и s — поверхность C3. В этой системе наибольшие значения σ_{cp} выше, чем наименьшие, в 1,8 раза, соответственно для s — в 3,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования характера распределения напряжений в ПС шлифованной Si_3N_4 –

TiC-керамики четырех систем под действием силовой нагрузки установлено, что наибольшие напряжения формируются в локальных объемах поверхностей C5 и C6, находящихся в непосредственной близости от точки приложения сосредоточенной силы. Напряженное состояние этих поверхностей принципиально отличается от напряженного состояния поверхностей C1–C4, о чем свидетельствует вид кривых изменения σ_i в КТ. Кривые изменения σ_i в КТ поверхностей C5–C6 имеют пики в центральной части, характеризующие появление микроструктурных концентраторов напряжений в этих областях, и, соответственно, высокую вероятность образования эксплуатационных дефектов в виде несплошностей. Кривые изменения σ_i в КТ поверхностей C1–C4 имеют простой вид с наименьшими значениями σ_i в центральной части, что свидетельствует о значительном уменьшении влияния сосредоточенной силы на напряженное состояние внутреннего объема Si₃N₄-TiC-керамики.

Статистический анализ, выполненный раздельно для поверхностей C1–C4, C5–C6 Si₃N₄-TiC-керамики систем № 1–4, показал сле-

дующее. В поверхностях C1–C4 значения σ_i изменяются от 290 (поверхность C2 в системе № 4) до 862 МПа (поверхность C1 в системе № 3) при средней σ_i по 16 поверхностям 496,1 МПа; значения s изменяются от 71,5 (поверхность C3 в системе № 4) до 133,6 % (поверхность C1 в системе № 3) при среднем s по 16 поверхностям 97,3 %. В поверхностях C5–C6 значения σ_i изменяются от 104 (поверхность C5 в системе № 2) до 1428 МПа (поверхность C5 в системе № 2) при средней σ_i по 8 поверхностям 745,1 МПа; значения s изменяются от 155,7 (поверхность C6 в системе № 2) до 308,5 % (поверхность C5 в системе № 2) при среднем s по 8 поверхностям 243,3 %.

Эти результаты указывают на высокую вероятность появления несплошностей в ПС детали из Si₃N₄-TiC-керамики под действием силовой нагрузки на границе поверхностей C5 и C6 в зоне приложения сосредоточенной силы.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

Библиографический список

1. **Grigoriev, S. N.** Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.
2. **Григорьев, С. Н.** Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.
3. **Torrecillas, San Millan R.** Specifics of wear of ceramic cutting tool inserts featuring Al₂O₃-TiC dies when face milling hardened cast iron / San Millan R. Torrecillas, A. E. Seleznev, V. D. Gurin [et al.] // Materials Science Forum. — 2016. — Vol. 876. — P. 43–49.
4. **Kuzin, Valery V.** A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton [et al.] // Proceedings of the 10th International Conference on Manufacturing Research ICMR 2012. — 2012. — P. 523–528.
5. **Zhao, Jun.** Cutting performance and failure mechanisms of an Al₂O₃/WC/TiC micro-nano-composite ceramic tool / Jun Zhao, Xunliang Yuan, Yonghui Zhou // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2010. — Vol. 28, № 3. — P. 330–337.
6. **Kuzin, V. V.** Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2013. — Vol. 34, № 3. — P. 199–203.
7. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.
8. **Yin, Zengbin.** Friction and wear behaviors of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials / Zengbin Yin, Juntang Yuan, Chuanzhen Huang [et al.] // Ceram. Int. — 2016. — Vol. 42, № 1. — P. 1982–1989.
9. **Volosova, M. A.** Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / M. A. Volosova,

V. V. Kuzin // Metal Science and Heat Treatment. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

Волосова, М. А. Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // Металловедение и термическая обработка. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

8. **Kuzin, V. V.** Service-induced damages of the ceramic thrust bearing pivot in the seal section of electrical centrifugal pump system / V. V. Kuzin, S. Y. Fedorov, V. L. Reutov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 564–568.

Кузин, В. В. Эксплуатационные повреждения пяты упорного керамического подшипника в узле гидрозаклещи установки электроцентробежных насосов / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, В. Л. Реутов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 1. — С. 63–67.

9. **Song, S.** Performance optimization of complicated structural SiC/Si composite ceramics prepared by selective laser sintering / S. Song, B. Lu, L. Wang [et al.] // Ceram. Int. — 2020. — Vol. 46, № 1. — P. 568–575.

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 // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.

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.

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.

Кузин, В. В. Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

12. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 1 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 1. — P. 94–99.

Кузин, В. В. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 2. — С. 39–45.

13. **Kuzin, V. V.** Change in ceramic object surface layer structure during operation. Part 2 / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 2. — P. 178–182.

Кузин, В. В. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 2 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 3. — С. 50–55.

14. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.

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

16. **Kuzin, Valery V.** A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton [et al.] // Proc. of the 10th International Conference on Manufacturing Research ICMR 2012. — 2012. — P. 523–528.

17. **Kuzin, V. V.** Basic framework for computer-aided engineering of polished ceramic surface layers / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 3. — P. 349–354.

Кузин, В. В. Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / В. В.

Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 6. — С. 64–69.

18. **Kuzin, V. V.** Computer engineering of the surface layer of ground Al_2O_3 -TiC ceramics. Force analysis / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 413–417.

Кузин, В. В. Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Силовой анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 7. — С. 67–71.

19. **Kuzin, V. V.** Computer engineering of the surface layer of ground Al_2O_3 -TiC ceramics. Thermal analysis / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 418–423.

Кузин, В. В. Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Тепловой анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 8. — С. 53–58.

20. **Кузин, В. В.** Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Комбинированный анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 9. — С. 67–72.

21. **Кузин, В. В.** Компьютерное моделирование напряженного состояния поверхностного слоя Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования. Системный анализ / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 10. — С. 65–71.

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

Получено 14.12.20

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Nano Tech 2021

Международная выставка-конференция нанотехнологий



International Nanotechnology Exhibition & Conference
nano tech 2021
国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議

27–29 января 2021 г.
Токио, Япония

Нanomатериалы:

фуллерен, углеродные нанотрубки, фотонные, композиционные, высокочистые, биосовместимые, нанокompозитные материалы, высокопроизводительные магнитные материалы, высокочистые нанопокpытия, наночернила, наночастицы, графен, целлюлозные нановолокна

Оценка и измерение:

SPM / AFM, сверхточные измерительные приборы, электронные микроскопы (SEM / TEM), высокоэффективные / высокочувствительные датчики, молекулярная визуализация, измерительные инструменты для оценки и проектирования, симуляция, программное обеспечение для молекулярного проектирования

Технология изготовления:

наночастичная смесь / дисперсия, литография следующего поколения, наноимпринт, лазерная обработка, обработка электронным/ионным лучом, технология слияния / связывания, травление, обработка заpунтованных зарядов, технология изготовления тонкой пленки, технология ультраточной обработки поверхности, технология нанотранзисторов, точные технологии печати шаблонов, 3D-принтеры

<https://www.nanotechexpo.jp/>

К. т. н. А. Б. Гольцов, д. т. н. К. И. Логачёв (✉), к. т. н. Ю. Г. Овсянников,
к. т. н. В. М. Киреев

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

УДК 533.6:628.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЗАГРУЗОЧНОМ ЖЕЛОБЕ АСПИРАЦИОННОГО УКРЫТИЯ С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ВОЗДУШНЫМ ЗАТВОРОМ

Рассмотрена многоступенчатая технологическая рециркуляция аспирационного воздуха в перегрузочные желоба — возврат аспирируемого от укрытий технологического оборудования воздуха обратно в технологический процесс с целью снижения энергетических затрат за счет создания аэродинамического сопротивления на пути движения эжекционного воздуха и поддержания требуемых теплофизических параметров в оборудовании. Рекомендуются оснащать желоба многоступенчатыми рециркуляционными затворами с минимально возможным углом подачи воздуха навстречу потоку, эжектируемому перегружаемым сыпучим материалом, что повысит энергетическую эффективность систем вентиляции и сократит выбросы в атмосферу вредных веществ.

Ключевые слова: обеспыливающая вентиляция, рециркуляция, энергосбережение, конвейерная перегрузка.

ВВЕДЕНИЕ

Производство строительных материалов и переработка минерального сырья сопровождается значительным выделением пыли. Для ее эффективной локализации используются различные технологические приемы [1–4], совершенствующие производственный процесс и системы обеспыливающей вентиляции. Работа систем обеспыливающей вентиляции требует значительных энергетических затрат, связанных с процессами локализации, транспортировки и очистки воздушных потоков от пыли [5]. В основном они обусловлены энергозатратами на преодоление сопротивления систем обеспыливающей вентиляции и создание достаточной для эффективной локализации необходимой скорости воздушного потока в местах пылевыведения. Совершенствование систем обеспыливающей вентиляции направлено на снижение расхода удаляемого воздуха, снижение концентрации пыли в аспирируемом воздухе, повышение степени очистки пылеулавливающими установками, снижение

аэродинамического сопротивления пылеуловителей [5, 6] и фасонных элементов вентиляционных систем [7, 8].

Для снижения энергозатрат на функционирование систем обеспыливающей вентиляции используют свойства отрывных [9, 10], рециркуляционных [11, 12], вихревых [13, 14], закрученных течений [15–17], механическое экранирование [18, 19], а также более совершенные укрытия, пылеулавливающие аппараты, вентиляторы с низким энергопотреблением, рекуперацию [20–23] и методики расчета [24]. Особого внимания заслуживают системы аспирации с технологической рециркуляцией (рис. 1), которые направлены на снижение производительности обеспыливающих систем, т. е. на снижение объемов аспирируемого воздуха за счет повышения аэродинамического сопротивления технологического тракта (например, верхнее укрытие ленточного конвейера – желоб – нижнее укрытие ленточного конвейера) и обеспечения теплофизических условий для перерабатываемого материала. Технологическая рециркуляция открывает разные пути интеграции обеспыливающих систем и технологических процессов с целью их совершенствования. Например, использование рециркуляционного воздуха позволяет снижать объемы выбросов в атмосферу. Данному вопросу была посвящена работа [21], в которой рассматривалась рециркуляция под углом к встречному эжекционному потоку, формируе-



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

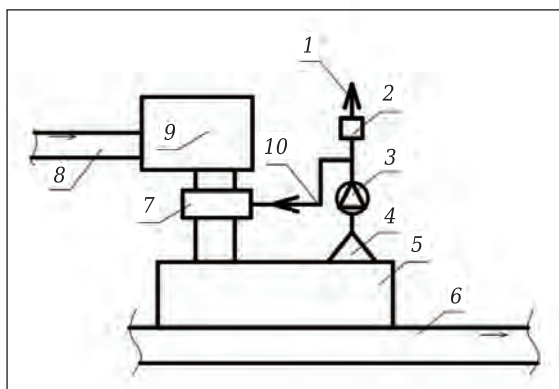


Рис. 1. Принципиальная схема аспирации с рециркуляционным затвором: 1 — выброс очищенного воздуха; 2 — пылеулавливающий аппарата; 3 — вентилятор; 4 — аспирационная воронка; 5 — нижнее аспирационное укрытие; 6 и 8 — конвейерная лента; 7 — рециркуляционный воздушный затвор (РВЗ); 9 — верхнее укрытие конвейерной ленты; 10 — рециркуляционный воздуховод

тому перегружаемым сыпучим материалом, для повышения эффективности данного устройства было предложено использовать эффект Коанда, что и было подтверждено в последующих работах [22, 23, 25]. Более того, была выявлена положительная динамика при использовании многоступенчатого рециркуляционного патрубка [23]. Использование технологической рециркуляции также позволяет эффективно поддерживать тепловизионные условия в полостях технологического оборудования, например при переработке гигроскопичных материалов.

В выполненных ранее работах [5, 6, 21–23, 25] было установлено, что использование принудительной рециркуляции в желобах оказывает положительное влияние на снижение эжекционного потока и объемов аспирируемого из укрытия воздуха, что, в свою очередь, приводит к снижению энергопотребления системами обеспыливающей вентиляции. В данных работах были изучены разные затворы для рециркуляции: одно- и двухщелевые с перпендикулярной подачей воздуха, двухщелевые с подачей под углом по направлению к эжекционному потоку, одноступенчатый двухщелевой с использованием эффекта Коанда для подачи рециркуляционного потока навстречу эжекционному, а также двухступенчатый с эффектом Коанда. Все изученные варианты позволяют повысить энергетическую эффективность систем вентиляции за счет снижения объемов эжектируемого воздуха на 30–80 %. Наибольшую эффективность показывают многоступенчатые затворы с применением эффекта Коанда [23], рассматривается сравнение многоступенчатого затвора с разными углами подачи рециркуляционного воздуха.

Данная работа посвящена исследованию многоступенчатой рециркуляции в перегрузоч-

ных желобах. Цель работы — исследование многоступенчатого рециркуляционного воздушно-го затвора (РВЗ) с разными углами подачи α и переменным числом ступеней для выявления факторов, влияющих на повышение сопротивления движению эжекционного воздуха, обеспечивающих его снижение и повышение энергетической эффективности аспирационных систем при локализации конвейерных перегрузок.

Задачи исследования:

- аналитическое исследование закономерности влияния рециркуляционного потока на потери давления в закрытых желобах при перегрузке сыпучих материалов;
- проведение серии вычислительных экспериментов для выявления влияния факторов (количество ступеней, угол наклона, ширина щели) на потери давления при использовании технологической рециркуляции;
- выявление основных факторов, влияющих на повышение потерь давления, снижение объемов эжектируемого воздуха, дальнейшие направления исследования.

МЕТОДЫ

Построение расчетной области, выбор модели и вычислительный эксперимент проводили в программном комплексе Solid Works Flowsimulation. В математической модели заложены уравнения неразрывности, движения и энергии, а также кинетической энергии турбулентности (k - ϵ -модель турбулентности, интенсивность 0,1 % и масштаб турбулентности 0,002 м). Уравнения решают на неструктурированных адаптированных к телу прямоугольных сетках. Для выполнения вычислительного эксперимента в среде Solid Works была построена пространственная твердотельная модель перегрузочного желоба и задана расчетная область моделирования воздушных течений. В ходе расчетов решали внутреннюю газодинамическую задачу движения воздушного потока в полости желоба.

В среде Solid Works Flow Works была разработана математическая модель желоба с одно-, двух- и трехступенчатой рециркуляцией. В качестве граничных условий приняты (рис. 2): постоянный объем эжектируемого воздуха 0,24 м³/с, вход рециркуляционного воздуха в желоб 0,02 м³/с (суммарно 0,12 м³/с), статическое давление на выходе из желоба 101325 Па. В ходе эксперимента фиксировали значения перепада полного давления на входе и на выходе из желоба. Геометрические характеристики желоба: высота 1 м, сечение 0,3×0,3 м.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается результатами серии сравнительных экспериментов по определению коэффициента местного сопротивления (КМС) воздушного затвора ζ в сравнении с ре-

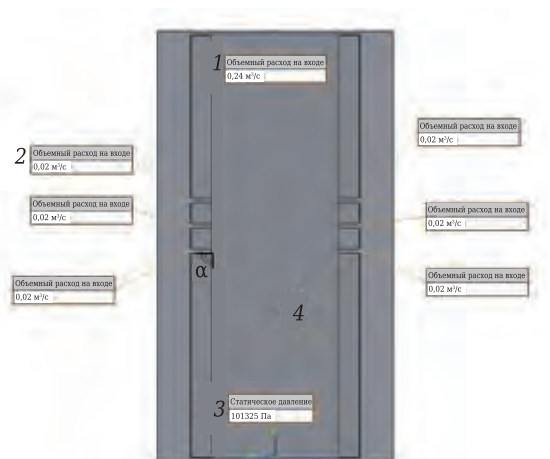


Рис. 2. Математическая модель желоба с одно-, двух- и трехступенчатой рециркуляцией. Граничные условия: 1 — объемный расход на входе в желоб; 2 — объемный расход на входе в щели одно-, двух- и трехступенчатого РВЗ (суммарно составляет 0,12 м³/с); 3 — статическое давление на выходе из желоба; 4 — непроницаемые стенки желоба с шероховатостью 100 мкм

зультатами исследований воздушного тройника, как наиболее точно повторяющего физическую модель РВЗ [26] (рис. 3). Коэффициент линейной корреляции сравниваемых величин составляет 0,99.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовали РВЗ при подаче воздуха перпендикулярно потоку ($\alpha = 90^\circ$) и по направлению к потоку с углом $\alpha = 5^\circ$, количество ступеней варьировалось от 1 до 3, расстояние между ступенями 50 мм. Из проводимых ранее исследований выявлено, что чем меньше угол α подачи рециркуляционного воздуха, тем выше сопротивление, поэтому в исследованиях принят наихудший $\alpha = 90^\circ$ и наилучший $\alpha = 5^\circ$. В предшествующих поисковых экспериментах проводили эксперименты с разными углами подачи, шагом между ступенями и шириной щелей. На основании результатов этих экспериментов не удалось выявить характерные условия, формирующие максимальное сопротивление в желобе из-за возникновения хаотичного перемешивания воздушных потоков и слияния рециркуляционных струй, поэтому принято решение сократить количество факторов.

Потери давления в общем случае в желобе складываются из потерь при турбулентном смешении потоков с разными скоростями и направлениями, а также потерь на поворот потока при его выходе из рециркуляционного патрубка и на расширение потока.

Движение воздуха в перегрузочном желобе, снабженном воздушным затвором (рис. 4), представляет собой движение газа с переменным расходом. Изменение расхода воздуха Q_1 (индекс ch

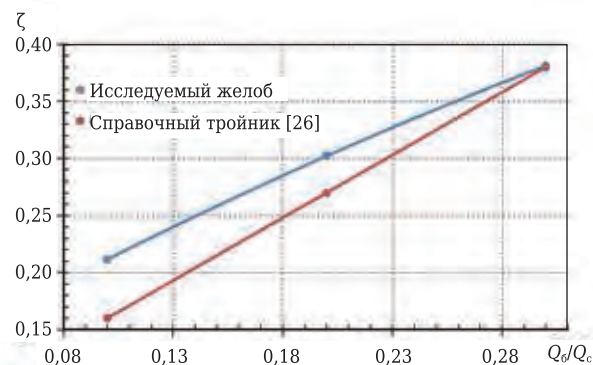


Рис. 3. Результаты сравнения расчетной модели с данными [26]: Q_6/Q_c — соотношение расхода воздуха, проходящего через боковое ответвление, к общему объему воздуха, проходящего через тройник

опущен с целью упрощения записи), поступающего в желоб из верхнего укрытия, происходит из-за входа в данное русло рециркуляционного потока Q_r . В результате расход воздуха, поступающего из желоба в укрытие, рассчитан по формуле

$$Q_2 = Q_1 + Q_r. \quad (1)$$

Величина Q_2 в общем случае будет зависеть от гидравлического сопротивления желоба, разрежения в укрытии P_{sh} и эжектирующих свойств перегружаемого материала.

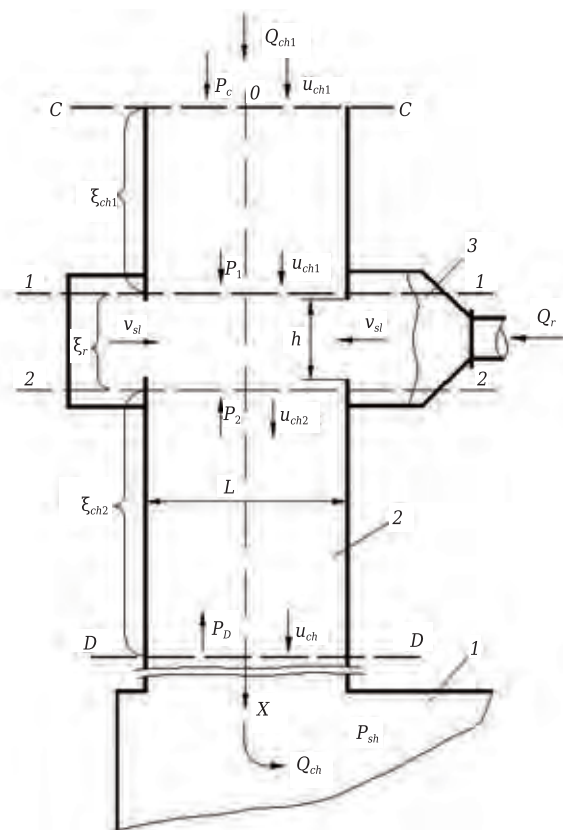


Рис. 4. Аэродинамическая схема перегрузочного желоба с воздушным затвором: 1 — укрытие; 2 — желоб; 3 — РВЗ

Гидравлическое сопротивление желоба определяется величинами Q_1 и Q_2 (индекс ch опущен) и действием РВЗ ζ_r . Разрежение в укрытии P_{sh} задается исходя из конструкции укрытия [27–29].

Существующие методики расчета объемов аспирации [27–29] позволяют учесть эжектирующие свойства перегружаемого материала, но только на участках до и после воздушного затвора. Как правило, длина этих участков будет значительно больше осевой длины РВЗ, поэтому можно допустить отсутствие влияния эжектирующих свойств перегружаемого сыпучего материала на аэродинамические характеристики РВЗ, что на практике будет соответствовать работе аспирационной системы (АС) при выключенном или незагруженном подающем конвейере.

Механизм слияния воздушных потоков в РВЗ, объем V которого будет равен объему желоба, заключенного между сечениями 1–1 и 2–2, описывается уравнением изменения количества движения [5]:

$$\int_S \rho u u_n dS = - \int_S P n dS + \int_S \tau_n dS + \int_V \rho M dV, \quad (2)$$

где u_n — проекция вектора скорости u на внешнюю нормаль к выделенному объему газа V ; n — единичный вектор внешней нормали; τ_n — касательные напряжения на площадке с внешней нормалью n ; M — вектор внешних массовых сил, действующих на выделенный объем, отнесенный к единице массы; S — поверхность выделенного объема V .

Для упрощения решения этого уравнения принят ряд следующих допущений. Параметры газа в выделенном объеме неизменны, движение установившееся. Слияние потоков происходит мгновенно и равномерно во всех точках объема РВЗ. Скорости потока во всех точках до и после затвора одинаковы. Касательные напряжения на стенках желоба РВЗ и массовые силы, действующие на выделенный объем, незначительны: $\int_S \tau_n dS \approx 0$, $\int_V \rho M dV \approx 0$.

С учётом изложенных допущений, в проекции на ось x (см. рис. 4) выражение (2) примет следующий вид:

$$\rho u_2 u_2 S_2 - \rho u_1 u_1 S_1 = P_{st1} S_1 - P_{st2} S_2, \quad (3)$$

где S_1 , S_2 — площади соответствующих сечений, равные площади поперечного желоба $S_{ch} = LB$; B — ширина поперечного желоба; P_{st1} и P_{st2} — статические давления в соответствующих сечениях; u_1 и u_2 — скорости движения воздуха до и после РВЗ (индекс ch опущен).

Выражение (3) сокращается на величину S_{ch} . При прибавлении к левой и правой частям этого выражения $\frac{\rho u_1^2}{2} - \frac{\rho u_2^2}{2}$ оно примет вид:

$$P_{st1} + \frac{\rho u_1^2}{2} - \left(P_{st2} + \frac{\rho u_2^2}{2} \right) = \rho u_2^2 - \frac{\rho u_2^2}{2} + \frac{\rho u_1^2}{2} - \rho u_1^2.$$

Здесь левая часть — это разность полных давлений в сечениях 1–1 и 2–2, то есть

$$P_{1-2} = P_1 - P_2 = \rho \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}. \quad (4)$$

Для того чтобы найти величину u_2 , необходимо в уравнении (1) выразить расходы воздуха через его скорости и площади поперечных сечений:

$$u_1 S_{ch} + v_{sl} S_{sl} = u_2 S_{ch}, \quad (5)$$

где v_{sl} — скорость воздуха в щелях РВЗ ($slote$ — щель); S_{sl} — площадь щелей воздушного затвора, $S_{sl} = Bnh$; n — количество щелей; h — высота щели.

После введения переменной $f = S_{sl}/S_{ch} = nh/L$ из уравнения (5) выражается величина скорости эжектируемого воздуха

$$u_2 = u_1 + f v_{sl}. \quad (6)$$

Выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$\Delta P_{1-2} = \rho (u_2 + f v_{sl}) f v_{sl} / 2. \quad (7)$$

Потери давления на проход в РВЗ ΔP_{1-2} , выраженные через соответствующий КМС ζ_r , отнесенный к динамическому давлению после слияния потоков Q_1 и Q_r , рассчитываются по формуле

$$\Delta P_{1-2} = \zeta_r \rho u_2^2 / 2. \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) выражается величина КМС РВЗ

$$\xi_r = \frac{\Delta P_{1-2}}{\rho u_1^2 / 2} = \frac{f \cdot v_{sl} (2u_1 + f \cdot v_{sl})}{u_2^2}, \quad (9)$$

или с учетом (6)

$$\xi_r = f \frac{v_{sl}}{u_2} \left(2 - f \frac{v_{sl}}{u_2} \right) = \frac{S_{sl}}{S_{ch}} \frac{v_{sl}}{u_2} \left(2 - \frac{S_{sl}}{S_{ch}} \frac{v_{sl}}{u_2} \right) = \frac{Q_r}{Q_{ch}} \left(2 - \frac{Q_r}{Q_{ch}} \right). \quad (10)$$

Полученные зависимости позволяют оценить только качественную картину аэродинамики систем с принудительной рециркуляцией части аспирируемого воздуха. Основная причина этого заключается в том, что выражение включает в себя зависимость для ΔP_{1-2} и КМС воздушного затвора, полученные при допущениях, существенно упрощающих механизм слияния потоков, что искажает количественную оценку аэродинамического сопротивления воздушного затвора.

Исходя из полученных выражений (5) и (6), можно говорить о том, что количество затворов N способно повысить сопротивление только в комплексе с увеличением рециркуляционного потока Q_r . Повышение расхода рециркуляционного потока при сохранении S_{sl} рециркуляционного затвора приведет к повышению скорости и, как следствие, к повышению ΔP_{1-2} и КМС в перегрузочном желобе. Увеличение N с площа-

дями $S_{sl} = Bh$ при постоянном расходе $Q_r = nBh v_{sl}$ приведет к снижению v_{sl} и увеличению S_{sl} , что в совокупности приведет к снижению сопротивления и КМС РВЗ ζ_r .

Расход рециркуляционного воздуха должен обеспечить наибольшее снижение расхода эжектируемого воздуха и, следовательно, расхода аспирируемого воздуха. Как показали исследования одно- и двухщелевого затвора [21–23, 25], при поперечной подаче рециркуляционного воздуха в желоб существует экстремум, при котором достигается максимальный КМС РВЗ. В то же время существует эжекционный эффект (отрицательный КМС) при больших объемах рециркуляционного воздуха.

Для подтверждения полученных зависимостей (8)–(10) были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых подтверждаются результаты аналитических исследований. Увеличение количества последовательных ступеней воздушных затворов при сохранении объемов рециркуляционного воздуха приводит к снижению ΔP_{1-2} . В то же время выявлена интересная закономерность, которая требует дальнейшего исследования: влияние высоты щели h на ΔP_{1-2} в желобе. В более ранних исследованиях [5, 21–23] и в полученных аналитических выражениях уменьшение h и, соответственно, S_{sl} приведет к пропорциональному повышению скорости и сохранению перепада полных давлений (рис. 5). Подача воздуха под малым углом α приводит к повышению перепада полных давлений.

На рис. 6, а, d видно, что при подаче под малым углом α формируются вихри рециркуляционного потока, которые сужают проход эжекционного воздуха и приводят к повышению сопротивления. Наиболее высокий ΔP_{1-2} (74,17 Па) зафиксирован при $h = 5$ мм. Скорость в выходном сечении щели составляет 41,4 м/с. Формирование высокого сопротивления происходит под воздействием встречных давлений эжекционного и рециркуляционного потоков. При увеличении высоты щели до 12 мм скорость падает до 17,2 м/с, а сопротивление до 32,7 Па.

При использовании двухступенчатого РВЗ с расстоянием между ступенями 50 мм (рис. 6, b, e) наиболее высокий ΔP_{1-2} (40,9 Па) зафиксирован при $h = 5$ мм. Скорость в выходном сечении щели составляет 10,3 м/с. При этом видно, что в двухступенчатом РВЗ по сравнению с одноступенчатым создаваемое сопротивление вдвое меньше. Снижение сопротивления обусловлено увеличением общей площади сечения воздушного затвора. Количество щелей стало вдвое больше, суммарные объемы рециркуляционного воздуха неизменны. При увеличении высоты щели до 12 мм скорость составляет 4,3 м/с, а сопротивление 20,6 Па.

В трехступенчатом РВЗ с тем же расстоянием между ступенями 50 мм (рис. 6, c, f) общая

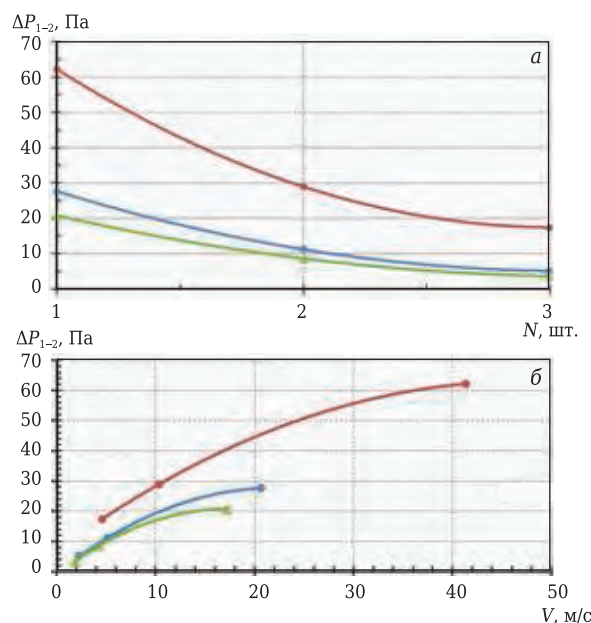


Рис. 5. Зависимость ΔP_{1-2} в желобе при постоянном расходе рециркуляционного воздуха от количества ступеней N воздушного затвора (а) и от средней скорости потока в щели V (б) при h , равной 0,01 (●), 0,005 (●) и 0,012 м (●); $\alpha = 5^\circ$

зона вихря более протяженная по сравнению с одно- и двухступенчатым затвором. В то же время сужение потока происходит в меньшей степени, так как скорость выходящего рециркуляционного потока составляет от 1,9 до 4,6 м/с (при $h = 12$ мм и $h = 5$ мм). Наиболее высокий ΔP_{1-2} (29,4 Па) зафиксирован при $h = 5$ мм. Скорость в выходном сечении щели составляет 4,6 м/с. Аналогично с предыдущими экспериментами, сохраняется тенденция снижения сопротивления при увеличении высоты щели до 12 мм, сопротивление составляет 15,6 Па.

При подаче рециркуляционного потока под углом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 7) в рамках исследуемого диапазона расходов наблюдается эжекционный эффект: в случае с одной щелью перепад полных давлений составляет -4,4 Па при скорости рециркуляционного потока 20,7 м/с.

Эжекционный эффект наблюдается, когда воздушный затвор способствует дополнительной эжекции, т. е. КМС и ΔP_{1-2} имеют отрицательные значения. Воздушный затвор проявляет себя как эжектор. Необходимо учитывать, что решаемая задача является упрощенной моделью желоба с воздушным затвором, в реальности данная картина проявляется при большем соотношении Q_r/Q_{ch} в связи с наличием верхнего укрытия, которое обладает дополнительным сопротивлением. С двумя и тремя щелями эжекционного эффекта не наблюдается, ΔP_{1-2} составляет от 7,4 и 7,5 Па при скорости рециркуляционного воздуха 5,2 и 2,6 м/с. РВЗ с поперечной подачей рециркуляционного воздуха создает значительно более низкое сопротив-

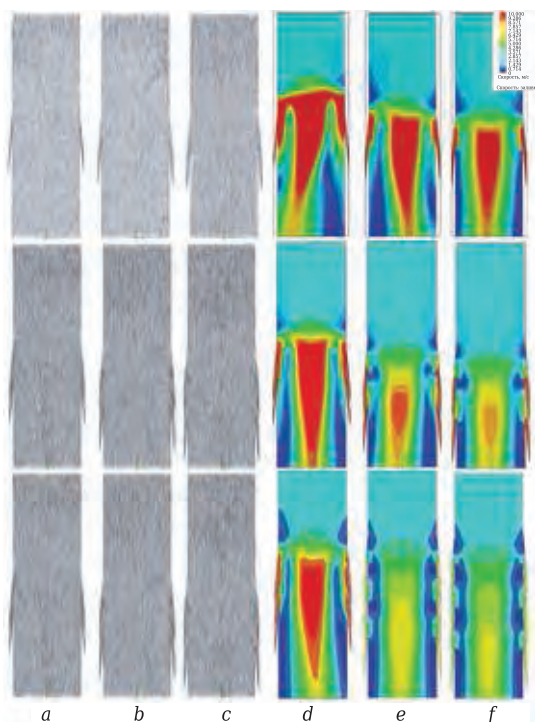


Рис. 6. Линии тока и поля скоростей одно-, двух- и трехступенчатом рециркуляционных РВЗ с углом подачи $\alpha = 5^\circ$ при h , равной 5 (a, d), 10 (b, e) и 12 мм (c, f)

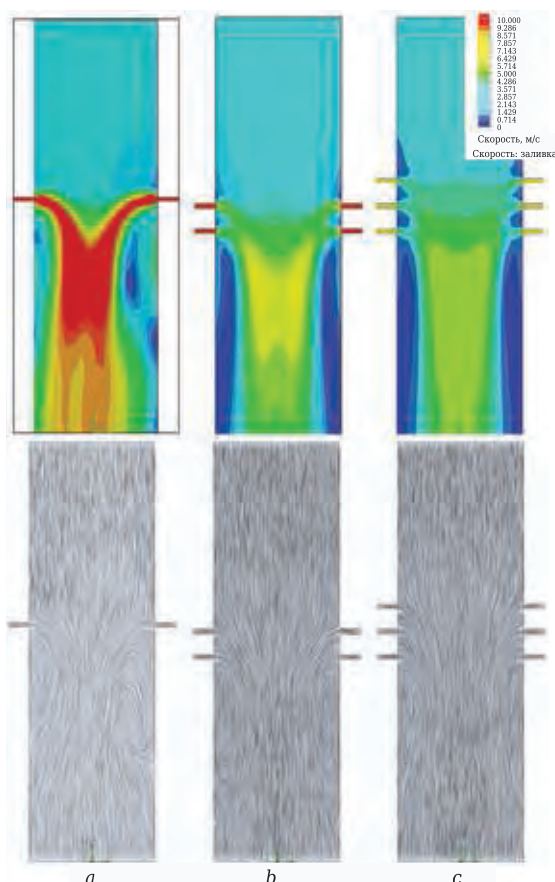


Рис. 7. Линии тока и поля скоростей для одно- (a), двух- (b) и трехступенчатом (c) РВЗ с углом подачи $\alpha = 90^\circ$, $h = 10$ мм и расстоянием между ступенями 50 мм

ление, до 10 раз меньшее, чем подача воздуха по направлению к эжекционному потоку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований установлено следующее:

- увеличение количества ступеней рециркуляционных затворов с сохранением объемов рециркуляционного воздуха приводит к снижению потерь полных давлений;
- уменьшение угла α приводит к повышению потерь полных давлений в желобе, оснащенном рециркуляционным затвором;
- полученная общая аналитическая зависимость потерь полных давлений в желобе позволяет качественно оценить эффективность работы воздушного затвора. Выявлено влияние высоты щели рециркуляционного затвора при углах подачи α менее 90° ;
- технологическая рециркуляция способна значительно снизить объемы эжектируемого и аспирируемого воздуха, снизить пылевую нагрузку на фильтры системы, а также снизить типоразмер используемого оборудования в системах обеспыливающей вентиляции (на наш взгляд, данный тип устройств может более чем вдвое сократить энергоемкость систем аспирации перегрузочных узлов);
- использование принудительной технологической рециркуляции в системах аспирации имеет высокий потенциал развития и совершенствования систем промышленной вентиляции.

На основании полученных результатов при проектировании систем аспирации перегрузочных узлов рекомендуется оснащать желоба одноступенчатыми рециркуляционными затворами с минимальным углом α подачи рециркуляционного воздуха. В отличие от более ранних исследований, где используется естественная рециркуляция за счет воздуха с увлекаемым сыпучим материалом и использования проницаемого загрузочного желоба с байпасной камерой, здесь используется принудительная рециркуляция. Поэтому появляется возможность получить более существенное снижение расхода эжектируемого воздуха. Дальнейшим направлением исследований может стать комплексное использование принудительной и естественной рециркуляции. Кроме того, данная работа связана с направлением исследований по повышению КМС элементов вентиляционных сетей [35, 36], что приводит к уменьшению расхода эжектируемого и аспирируемого из укрытий воздуха, в отличие от работ [7–10], где, напротив, снижение КМС приводит к уменьшению расхода отсасываемого воздуха для систем вентиляции с открытыми местными отсосами.

В дальнейших исследованиях планируется провести исследования высоты щели воздуш-

ного затвора с целью получения аналитических зависимостей, позволяющих осуществлять эффективное проектирование систем аспирации со сниженной энергоемкостью. Для этого требуется более детальная проработка вычислительных моделей и практические исследования опытных образцов воздушных затворов. Особую роль в дальнейших исследованиях планируется отвести подходам к определению оптимальных объемов рециркуляционного воздуха.

Проведенные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (Проект № 18-79-10025).

Библиографический список

1. Dust control handbook for industrial minerals mining and processing ; 2nd edition / U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. — 2019.
2. **Huque, S. T.** The transfer chute design manual: for conveyor belt systems. Conveyor transfer design pty / S. T. Huque, P. Donecker, J. J. Rozentals, C. W. Benjamin. — Limited, 2010. — 272 p.
3. **Li, Xiaochuan.** Developments in studies of air entrained by falling bulk materials / Xiaochuan Li, Qili Wang, Qi Liu, Yafei Hu // Powder Technology. — 2016. — Vol. 291. — P. 159–169.
4. **Fang, Chenchen.** Experimental investigation on particle entrainment behaviors near a nozzle in gas-particle coaxial jets / Chenchen Fang, Jianliang Xu, Hui Zhao, Weifeng Li, Haifeng Liu // Powder Technology. — 2015. — Vol. 286. — P. 55–63.
5. **Овсянников, Ю. Г.** Аспирационные системы с принудительной рециркуляцией : монография / Ю. Г. Овсянников, А. И. Алифанова. — Белгород : изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013. — 137 с.
6. **Logachev, I. N.** Local exhaust ventilation: aerodynamic processes and calculations of dust emissions / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova. — Boca Raton: CRC Press, 2015. — 576 p.
7. **Logachev, K. I.** On the resistance of a round exhaust hood, shaped by outlines of the vortex zones occurring at its inlet / K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova // Build. Environ. — 2019. — Vol. 151. — P. 338–347.
8. **Ziganshin, A. M.** Minimizing local drag by shaping a flanged slotted hood along the boundaries of vortex zones occurring at inlet / A. M. Ziganshin, K. I. Logachev // J. Build. Eng. — 2020. — Vol. 32. — Article 101666.
9. **Logachev, K. I.** A survey of separated airflow patterns at inlet of circular exhaust hoods / K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova, A. K. Logachev // Energy Build. — 2018. — Vol. 173. — P. 58–70.
10. **Logachev, K. I.** A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods / K. I. Logachev, A. M. Ziganshin, O. A. Averkova // J. Build. Eng. — 2020. — Vol. 29. — Article 101159.
11. **Averkova, O. A.** Analytical and experimental study of the air recirculation in a loading porous tube with a combined bypass chamber / O. A. Averkova, I. V. Kryukov, I. N. Logachev, K. I. Logachev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2017. — Vol. 90, № 2. — P. 318–328.
12. **Logachev, K. I.** Simulation of air flows in ventilation shelters with recirculation / K. I. Logachev, I. V. Kryukov, O. A. Averkova // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 4. — P. 428–434.
13. **Логачёв, К. И.** Моделирование воздушных потоков в аспирационном укрытии с рециркуляцией / К. И. Логачёв, И. В. Крюков, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2015. — № 8. — С. 57–62.
14. **Caο, Z.** Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system / Z. Cao, Y. Wang, M. Duan, H. Zhu // Energy and Buildings. — 2017. — Vol. 142. — P. 39–48.
15. **Gritskevich, M. S.** Numerical Investigation of flow near a round exhaust channel screened by an annular swirled jet / M. S. Gritskevich, A. K. Logachev, K. I. Logachev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2019. — Vol. 92, № 2. — P. 468–476.
16. **Gol'tsov, A. B.** Modeling dust and air flow within an aspirated shelter / A. B. Gol'tsov, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 325–331.
17. **Гольцов А. Б.** Моделирование пылевоздушных течений в аспирируемом укрытии / А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 61–66.
18. **Gol'tsov, A. B.** Simulation of the dust-air flow near a rotating disk cylinder suction unit / A. B. Gol'tsov, K. I. Logachev, O. A. Averkova, V. A. Tkachenko // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 2. — P. 232–236.
19. **Гольцов А. Б.** Моделирование пылевоздушного течения вблизи вращающегося дискового цилиндра-отсоса / А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко // Новые огнеупоры. — 2019. — № 4. — С. 70–74.
20. **Gol'tsov, A. B.** Investigation of the dust-air flow near a vertical rotating cylindrical local exhaust / A. B. Gol'tsov, K. I. Logachev, O. A. Averkova, V. A. Tkachenko // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 59, № 6. — P. 671–676.
21. **Гольцов А. Б.** Исследование пылевоздушного потока вблизи вертикально расположенного вращающегося цилиндрического местного отсоса / А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова, В. А. Ткаченко // Новые огнеупоры. — 2018. — № 12. — С. 62–66.
22. **Logachev, K. I.** Flow analysis of slit-type suction ports shielded with slender visors / K. I. Logachev, N. M. Anzheurov // Refract. Ind. Ceram. — 2003. — Vol. 44, № 3. — P. 145–148.
23. **Логачев, К. И.** Расчеты щелевых отсосов, экранированных тонкими козырьками / К. И. Логачев, Н. М. Анжеуров // Новые огнеупоры. — 2002. — № 7. — С. 38–41.
24. **Cascetta, F.** Assessment of velocity fields in the vicinity of rectangular exhaust hood openings / F. Cascetta, F. M. Rosano // Building and Environment. — 2001. — Vol. 36. — P. 1137–1141.
25. **Haan, F. L.** Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications / F. L. Haan, P. P. Sarkar, W. A. Gallus // Engineering Structures. — 2008. — Vol. 4, № 30. — P. 1146–1159.
26. **Ovsyannikov, Y. G.** Reducing the power consumption of ventilation systems through forced recirculation / Yu.

G. Ovsyannikov, A. B. Gol'tsov, A. S. Seminenko [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 557–561.

Овсянников, Ю. Г. Снижение энергоёмкости аспирационных систем за счет принудительной рециркуляции / Ю. Г. Овсянников, А. Б. Гольцов, А. С. Семиненко [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 64–68.

22. **Kireev, V. M.** The use of coanda effect in energy-efficient recirculating aspiration systems / V. M. Kireev, A. B. Goltsov, A. S. Seminenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 463. — Article 032020.

23. **Kireev, V. M.** Creation of a new energy-efficient design of the dustexhaust system / V. M. Kireev, A. B. Goltsov, A. S. Seminenko, Y. G. Ovsyannikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 552. — Article 012021.

24. **Logachev, I. N.** Refining the method for determining the flow rate of air entrained by freely falling polydisperse loose material / I. N. Logachev, E. N. Popov, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Powder Technology. — 2020. — Vol. 373. — P. 323–335.

25. **Киреев, В. М.** Рециркуляционные энергоэффективные системы аспирации с использованием эффекта Коанда / В. М. Киреев, В. А. Минко, А. Б. Гольцов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2018. — № 12. — С. 57–62.

26. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга ; 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1992. — 672 с.

27. **Минко, В. А.** Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов / В. А. Минко. — Воронеж : изд-во ВГУ, 1981. — 176 с.

28. **Нейков, О. Д.** Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. — М. : Металлургия, 1981. — 192 с.

29. Альбом унифицированного и нестандартного оборудования систем аспирации для предприятий по производству силикатного кирпича. — Белгород : БТИСМ, 1989. — 78 с.

30. **Huang, Y.** Study on ventilation performance of lateral exhaust hood under the influence of two high-temperature buoyant jets / Y. Huang, K. Lu, J. Guo [et

al.] // Building and Environment. — 2020. — Vol. 177. — Article 106849

31. **Huang, Y.** Study on limit flow ratio method for a lateral exhaust hood above high-temperature buoyant jets / Yanqiu Huang, Ke Lu, Yi Wang [et al.] // Sustainable Cities and Society. — 2020. — Vol. 54. — Article 101969.

32. **Wang, Y.** Lateral ventilation performance for removal of pulsating buoyant jet under the influence of high-temperature plume / Yi Wang, Lei Cao, Yanqiu Huang, Yingxue Cao // Indoor and Built Environment. — 2020. — Vol. 29, № 4.

33. **Huang, Y.** Performance of constant exhaust ventilation for removal of transient high-temperature contaminated airflows and ventilation-performance comparison between two local exhaust hoods / Yanqiu Huang, Yi Wang, Li Liu [et al.] // Energy and Buildings. — 2017. — Vol. 154. — P. 207–216.

34. **Huang, Y.** Ventilation guidelines for controlling smoke, dust, droplets and waste heat: four representative case studies in Chinese industrial buildings / Yanqiu Huang, Yi Wang, Xiaofen Ren [et al.] // Energy and Buildings. — 2016. — Vol. 128. — P. 834–844.

35. **Logachev, I. N.** Methods and means of reducing the power requirements of ventilation systems in the transfer of free-flowing materials / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refract. Ind. Ceram. — 2013. — Vol. 54, № 3. — P. 258–262.

Логачёв, И. Н. Способы и средства снижения энергоёмкости аспирационных систем при перегрузке сыпучих материалов / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 66–70.

36. **Logachev, K. I.** Decreasing the power requirements of ventilation shelters through aerodynamic screening of slot leakages / K. I. Logachev, I. V. Khodakov, O. A. Averkova // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 204–209.

Логачёв, К. И. Снижение энергоёмкости аспирационных укрытий за счет аэродинамического экранирования щелевых неплотностей / К. И. Логачёв, И. В. Ходаков, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 56–61. ■

Получено 21.10.20

© А. Б. Гольцов, К. И. Логачёв,
Ю. Г. Овсянников, В. М. Киреев, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ «НОВЫЕ ОГНЕУПОРЫ» В 2020 г.

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
ОГНЕУПОРЫ В ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТАХ		
Земляной К. Г., Серова Л. В. Механизм разрушения периклазохромитовых огнеупоров под воздействием кислых шлаков.....	5	5
Кочергина Л. Р., Шевченко С. В., Сарычев Б. А. Применение метода шоткретирования для восстановления рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей кислородно-конвертерного цеха ПАО ММК.....	10	3
Сакулин А. В., Гершкович С. И., Иксанов Ф. Р., Витовский А. В., Мусевич В. А., Вихрова Н. В., Калугина М. Я., Прокофьев Б. Н., Мурзин Ю. А. Опыт использования материалов АО БКО при строительстве высокотемпературных воздухонагревателей конструкции Калугина (ВНК).....	7	3
Обзорная статья		
Словиковский В. В., Гуляева А. В. Эффективная коррозионно-эрозионно-стойкая футеровка вращающихся печей.....	11	3
Сухарев С. В., Заболотский А. В., Котровский П. В., Турчин М. Ю. Влияние конструкции металлоприемника слябовых МНЛЗ на движение потока в промежуточном ковше при отклонении струи металла от требуемого положения. Часть III. Результаты исследования.....	1	5
Перепелицын В. А., Земляной К. Г., Миронов К. В., Форшев А. А., Николаев Ф. П., Сушников Д. В. Минералогия и микроструктура разновидностей гарнисажа в доменной печи № 6 АО ЕВРАЗ НТМК.....	7	11
Юрков А. Л., Малахов А. П., Авдеев В. В. Углеродные футеровочные катодные материалы для получения алюминия электролизом — вопросы совершенствования свойств.....	1	9
СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ		
Евтехова А. Е., Прибытков И. А., Шатохин К. С. Оценка энергетической эффективности переработки отходов углеобогащательных фабрик.....	6	5
Завёрткин А. С. Получение огнеупорных материалов из хромитового сырья Карелии и физико-химические процессы при их службе.....	5	12
Истомин Е. И., Истомин П. В., Надуткин А. В., Грасс В. Э. Обескремнивание лейкоксенового концентрата при вакуумной силикотермической обработке.....	3	5
Жакипбаев Б. Е., Колесников А. С., Кенжибаева Г. С., Ботабаев Н. Е., Кутжанова А. Н., Изтлеуов Г. М., Аширбаев Х. А., Ахметова Э. К., Колесникова О. Г. Исследования аморфнокремнеземистых горных пород Республики Казахстан в качестве минерального сырья в формировании пористой структуры теплоизоляционного пеностекла.....	2	5
Кадырова З. Р., Пурханатдинов А. П., Ниязова Ш. М. Исследование бентонитовых глин Каракалпакстана для получения керамических теплоизоляционных материалов.....	9	3
Сатбаев Б. Н., Кокетаев А. И., Аймбетова Э. О., Бердикулова Ф. А., Шалабаев Н. Т., Сатбаев А. Б. Изготовление химически стойкой огнеупорной бетонной смеси из отходов металлургических производств и их физико-химические свойства.....	10	9
Соколов В. А., Богатырева Е. В., Гаспарян М. Д. Состояние и перспективы развития сырьевой базы для производства циркониевых материалов в Российской Федерации.....	4	5
Трунов С. В., Конов М. В., Сарычев И. С., Чмырев И. Н. К выбору теплоизолирующей смеси для непрерывной разливки.....	10	6
Эминов А. А. Влияние дисперсности кварцитов на свойства диносовых огнеупорных масс.....	8	5
ПРОИЗВОДСТВО И ОБОРУДОВАНИЕ		
Барский Е. М. Оптимизация основных параметров сепарации сыпучих материалов в вертикальных каскадных сепараторах.....	3	10
Барский Е. М. Равноизвлекаемость различных классов крупности в процессах гравитационной сепарации.....	11	11
Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Кожушко Г. Г. Хризотил-асбест — сырье строительной индустрии из глубоких карьеров.....	6	9
Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Костюк П. А. Новые разработки по пневматической доставке вяжущих и инертных добавок строительных материалов.....	12	10
Давыдов С. Я., Апакашев Р. А., Михалицин А. А., Михалицина О. В., Катаев А. В. Решение проблемы очистки автоклавы для выращивания синтетического кварца.....	1	17
Давыдов С. Я., Макаров В. Н., Апакашев Р. А., Макаров Н. В., Кожушко Г. Г. Универсальное бустерное устройство для перемещения и подъема сыпучих материалов в двух- и трехфазных потоках.....	9	10
Макаров В. Н., Давыдов С. Я., Угольников А. В., Макаров Н. В. Гидровихревая классификация композиционных микрочастиц.....	10	13
Непочатов Ю. К., Плетнев П. М., Денисова А. А. Огнеупорная оснастка для обжига алюмини-тридных подложек.....	9	7
Соколов В. А., Горбаненко М. А., Лисафин А. Б., Гаспарян М. Д. Выбор плавильного агрегата для производства плавленого диоксида циркония.....	12	3

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Тимофеева А. С., Базарова М. С., Морозова Н. А. Подбор огнеупора для воронки стакана-дозатора при непрерывной разливке стали.....	1	14
Тимофеева А. С., Шишкин В. Д., Морозова Н. А. Подбор огнеупорного бетона для стаканов-дозаторов промежуточного ковша МНЛЗ.....	7	21
Уваров В. И., Капустин Р. Д., Кириллов А. О., Федотов А. С., Цодиков М. В. Разработка пористого каталитического конвертера для дегидрирования кумола в α -метилстирол.....	8	8
ТЕПЛОТЕХНИКА		
Вильданов С. К., Рогалёва Л. В., Пыриков А. Н. О некоторых критериях эффективности комплексных теплоизолирующих и шлакообразующих смесей.....	5	16
Нижегородов А. И. Моделирование переноса лучистой энергии на сыпучую среду в электропечах с верхним положением излучающих элементов.....	2	10
Нижегородов А. И. Перспективы применения и возможности электрических модульно-спусковых печей с новой конструкцией нагревательной системы.....	3	14
Нижегородов А. И. Технологические и энергетические возможности электрических двухмодульных спусковых печей с верхней нагревательной системой.....	6	13
Нижегородов А. И., Гаврилин А. Н., Мойзес Б. Б., Исмаилов Г. М. Модульно-спусковая печь с распределением скоростей локальных потоков сыпучих сред по тепловым зонам.....	12	16
Сидняев Н. И., Белкина Э. В. О влиянии гиперзвукового потока на скорость оплавления теплозащитной поверхности в условиях разрушения.....	1	20
Шустров Н. Н., Пузач В. Г., Безенков С. А. Влияние токопроводящих стен варочного бассейна электропечи на распределение потоков энергии.....	4	12
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ		
Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Аналитический анализ влияния алюмосодержащего нанотехногенного сырья на показатели кислотоупоров.....	5	41
<i>Долговечность керамических материалов возрастом более 100 лет</i>		
Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Взаимосвязь фазового и химического составов с долговечностью керамического материала крепостной стены города Салоники (Греция) возрастом более 1000 лет.....	9	56
Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Исследование фазового состава и структуры пористости керамического материала возрастом более четырехсот лет (Испания).....	7	57
Антонович В., Зданявичюс П., Стонис Р., Спудулис Э., Корякин А., Шахменко Г., Татарин А. Исследование деструкции жаростойкого шамотного бетона при его резком нагреве и охлаждении.....	6	41
Апалькова Г. Д. Расширение/усадка подовых масс при обжиге.....	3	61
Аттия Мохамед А. А., Эвайс Эмад Мохамед М. Изготовление деталей двигателей автомобилей из Si_3N_4 -керамики с добавкой $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ методом горячего прессования.....	7	36
Аунг Чжо Мое, Лукин Е. С., Попова Н. А. Структурно-механические свойства композиционного материала электроплавный корунд – диоксид циркония, модифицированный эвтектической добавкой в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO--TiO}_2$	4	46
Бабкин М. Ю., Боровик С. И., Солдатов А. И. Зависимость упругости обожженной холоднонабивной подовой массы от степени ее уплотнения.....	2	35
Бажин В. Ю., Глазьев М. В. Комбинированные огнеупорные материалы с добавкой техногенных отходов для металлургических агрегатов.....	11	21
Беляев И. М., Истомин П. В., Истомина Е. И., Лысенков А. С., Ким К. А. Получение и свойства керамики на основе карбида тантала, модифицированного газом SiO	11	27
Беляков А. В. Высокоплотная микро- и нанозернистая керамика. Переход открытых пор в закрытые. Часть 3. Спекание заготовок без внешнего давления.....	1	39
Беляков А. В., Церман С. И. Эффективность «умных сегментов» при периферийном и торцевом алмазном шлифовании абразивных и неабразивных хрупких материалов.....	3	41
Бесиса Д. Х. А., Заки З. И., Амин А. М. М., Ахмед Ю. М. З., Эвайс Е. М. М. Влияние упрочняющих добавок на характеристики композита $\text{TiC--Al}_2\text{O}_3$ трибологического назначения, полученного СВС.....	9	47
Богачев Е. А., Кулик В. И., Кулик А. В., Нилов А. С. Исследование газофазных процессов получения волокнисто-армированных органоморфных керамических композитов с SiC -матрицей.....	8	23
Болгару К. А., Верещагин В. И., Редер А. А., Скворцова Л. Н. Синтез сиалона и нитридных фаз на основе ферросиликоалюминия с добавками маршалита в режиме горения.....	11	34
Болоцкая А. В., Михеев М. В. Получение методом СВС-экструзии компактных керамических электродных материалов на основе системы Ti--B--Fe , модифицированных наноразмерными частицами AlN	6	51
Ванчурин В. И., Беляков А. В., Джумамухамедов Д. Ш., Федотов А. В. Реология формовочных масс для экструдирования заготовок для получения медьсодержащих алюмокремнеземистых катализаторов.....	5	23
Волов В. Н., Гаршин А. П. Сравнительные показатели абразивных порошков кубического нитрида бора разных марок.....	8	31
Датта Р., Пал Чоудхури Д., Мухопадхай С. Улучшение реологических характеристик углеродсодержащей смеси, обогащенной глиноземом, с помощью поверхностно-модифицированных графитов... ..	6	37
Добросмыслов С. С., Симунин М. М., Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Задов В. Е., Нагибин Г. Е., Хартов С. В. Исследование влияния наноразмерного волокна оксида алюминия на термостойкость огнеупорного бетона.....	12	38

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Дрокин Н. А., Кийко В. С., Павлов А. В., Малкин А. И. Электрофизические свойства керамики БТ-30.....	6	56
Елизарова Ю. А., Захаров А. И. Высокотемпературные защитные покрытия функционального назначения.....	10	52
Жаникулов Н. Н., Таймасов Б. Т., Борисов И. Н., Даулетияров М. С., Айтурсев М. Ж., Джан-муддаева Ж. К. Получение малоэнергоемкого цемента из техногенного сырья.....	3	34
Закоржевский В. В., Ковалев И. Д., Мухина Н. И. Закономерности структуро- и фазообразования при синтезе композиций $AlN-Al_2O_3-Y_2O_3$ в режиме горения.....	9	32
Иванов Д. А. Изучение термостойкости керамических материалов по чувствительности их структуры к концентратору напряжений.....	10	39
Иванов Д. А. Изучение физико-механических свойств и структуры слоистого кермета $Al-Al_2O_3-Al_4C_3$	7	45
Иванов Д. А. Применение критериев термостойкости для оценки устойчивости к разрушению при воздействии термических напряжений алюмооксидной керамики и кермета $t-ZrO_2-Cr$	12	29
Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследования методом ЯГР-спектроскопии оксидов железа в кислотоупорных керамических материалах на основе отходов производства.....	3	56
Канапинов М. С., Кашкаров Г. М., Новоселова Т. В., Тубалов Н. П., Толмачёва Л. В. Влияние компонентов шихты на физико-механические свойства пористых проницаемых металлокерамических материалов.....	11	51
Каченюк М. Н., Кульметьева В. Б., Сметкин А. А. Влияние наноразмерного карбида титана на синтез, структуру и свойства композиционного материала на основе карбосилицида титана.....	10	46
Кашцев И. Д., Земляной К. Г., Доронин А. В. Разработка технологии получения высокочистых порошков Al_2O_3 на основе сырья Уральского региона.....	4	20
Кириллова Н. К., Шакурова Н. В., Дороганов В. А., Морева И. Ю. Карбидкремниевые композиты на нитридной связке на основе искусственных керамических вяжущих.....	2	26
Колесников А. С., Кенжибаева Г. С., Ботабаев Н. Е., Кутжанова А. Н., Изтлеуов Г. М., Суйгенбаева А. Ж., Аширбаев Х. А., Колесникова О. Г. Термодинамическое моделирование химических и фазовых превращений в системе шлак от вельцевания – углерод.....	5	45
Комоликов Ю. И., Кашцев И. Д., Земляной К. Г., Василенко О. Н., Пудов В. И. Свойства микропористой композиционной керамики на основе оксидов циркония и алюминия.....	3	30
Комоликов Ю. И., Кашцев И. Д., Хрустов В. Р., Пудов В. И. Устойчивость керамики на основе ZrO_2 , допированного Y_2O_3 , в условиях гидротермального воздействия.....	8	14
Коцарь Т. В., Данилович Д. П., Орданьян С. С. Стеклокристаллические прекурсоры в системах $B_2O_3-SiO_2-M_2O_n$, где $M = Ti, Zr, Cr$, как источник получения высокодисперсных смесей тугоплавких карбидов и боридов.....	2	46
Кравченко И. Н., Карцев С. В., Кузнецов Ю. А. Применение горячих углеводородов для плазменной установки при нанесении износостойких покрытий.....	7	51
Кравченко И. Н., Карцев С. В., Кузнецов Ю. А. Способ защиты плазменной наплавки газопорошковым потоком.....	9	37
Крючков Ю. Н. Оценка параметров пористой структуры и проницаемости монофракционной керамики.....	5	35
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Взаимосвязь профиля рабочей поверхности алмазного круга с качеством шлифованной поверхности Al_2O_3-TiC -керамики.....	11	64
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 1.....	2	39
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 2.....	3	50
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Компьютерная инженерия поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3-TiC -керамики. Комбинированный анализ.....	9	67
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Компьютерная инженерия поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3-TiC -керамики. Силовой анализ.....	7	67
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Компьютерная инженерия поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3-TiC -керамики. Системный анализ.....	10	65
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Компьютерная инженерия поверхностного слоя шлифованной Al_2O_3-TiC -керамики. Тепловой анализ.....	8	53
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Микроструктурная модель поверхностного слоя керамики после алмазного шлифования, учитывающая его реальную структуру и условия контактного взаимодействия с упругим телом.....	5	59
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики.....	6	64
Кузин В. В., Григорьев С. Н., Волосова М. А. Силовой анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя шлифованной Si_3N_4-TiC -керамики.....	12	54
Курапова О. Ю., Голубев С. Н., Глухарев А. Г., Конаков В. Г. Взаимосвязь синтеза и структуры керамических прекурсоров системы $TiO_2-CeO_2-ZrO_2$	2	59
Логвинков С. М., Шабанова Г. Н., Корогодская А. Н., Шумейко В. Н., Борисенко О. Н. Структурно-фазовые изменения динаса в прокаточных печах коксового производства.....	1	51
Ломанова Н. А. Синтез материалов на основе оксида со структурой браунмиллерита системы $CaO-Bi_2O_3-Fe_2O_3$	4	36

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Лучникова Г. Г., Дружинина М. Э., Хайдаров Б. Б., Суворов Д. С., Кузнецов Д. В., Лысов Д. В., Бурмистров И. Н. Разработка энергоэффективной технологии получения и исследование бесклнкерных минеральных вяжущих материалов на основе доменных гранулированных шлаков с добавлением золы-уноса.....	2	52
Марков М. А., Кузнецов Ю. А., Красиков А. В., Слободов А. А., Быкова А. Д., Перевислов С. Н. Особенности формирования керамических покрытий методом микродугового оксидирования в электролите на основе борной кислоты.....	5	50
Михайлов Г. Г., Макровец Л. А., Самойлова О. В. Термодинамическое моделирование диаграмм состояния двойных и тройных оксидных систем, принадлежащих к системе FeO–MgO–MnO–Al ₂ O ₃	6	47
Никифоров А. С., Приходько Е. В., Кинжибекова А. К., Карманов А. Е. Учет влажности огнеупорных материалов при разогреве высокотемпературных агрегатов.....	4	56
Николаев А. Н., Баньковская И. Б., Перевислов С. Н. Влияние наноразмерных частиц оксидов циркония и алюминия на свойства материалов на основе композиции Si–B ₄ C–ZrB ₂	8	18
Перевислов С. Н. Определение ТКЛР материалов на основе карбида кремния.....	11	44
Перевислов С. Н., Баньковская И. Б., Николаев А. Н., Коловертнов Д. В., Несмелов Д. Д. Изучение механических характеристик композиционных материалов системы ZrB ₂ –Si.....	6	22
Перевислов С. Н., Марков М. А., Красиков А. В., Быкова А. Д. Влияние дисперсного состава SiC на физико-механические свойства реакционно-спеченного карбида кремния.....	4	41
<i>Обзорная статья</i>		
Пивинский Ю. Е. Бесцементные огнеупорные бетоны. Часть 3. Высокодисперсные виды кремнезема как эффективные компоненты огнеупорных бетонов.....	1	28
Пивинский Ю. Е. Бесцементные огнеупорные бетоны. Часть 4. Огнеупорные бетоны на кремнезольных связующих.....	3	20
Пивинский Ю. Е., Дякин П. В. Бесцементные огнеупорные бетоны. Часть 5. БЦОБ на глиноземистых гидравлических вяжущих.....	7	25
Пивинский Ю. Е., Дороганов В. А., Дороганов Е. А. Бесцементные огнеупорные бетоны. Часть 6. Сопоставительная оценка природных (глины) и искусственных керамических вяжущих (ВКВС).....	9	25
Пивинский Ю. Е., Дороганов В. А., Дороганов Е. А., Дякин П. В. Об эффективности добавок огнеупорных глин в технологии керамобетонов (Обзорная статья).....	10	18
Пивинский Ю. Е., Дороганов В. А., Дороганов Е. А., Дякин П. В. Синергетический эффект совместных добавок глины и комплексного органоминерального разжижителя (КОМР) в технологии керамобетонов (Обзорная статья).....	12	24
Пивинский Ю. Е., Скуратов М. А., Дороганов В. А., Дороганов Е. А. Керамические вяжущие суспензии композиционного состава в системе Al ₂ O ₃ –SiO ₂ –SiC и керамобетоны на их основе.....	11	16
Порозова С. Е., Рогожников А. Г., Шоков В. О., Поздеева Т. Ю. Оптимизация условий получения нанопорошков диоксида циркония по золь-гель методу.....	11	38
Руми М. Х., Ирматова Ш. К., Файзиев Ш. А., Уразаева Э. М., Мансурова Э. П., Зуфаров М. А. Получение алюмосиликатных керамических материалов с использованием золы-уноса ТЭС.....	5	37
Роман О. В., Шмурадко В. Т., Пантелеенко Ф. И., Реут О. П., Бендик Т. И., Шмурадко Н. А., Судник Л. В., Бородавко В. И., Кизимов А. Н., Клавкина В. В. Техническая керамика: материаловедческие-технологические принципы и механизмы разработки и реализации керамических электроизоляторов различного научно-практического назначения.....	9	16
Сатбаев Б. Н., Нурумгалиев А. Х., Шишкин Ю. И., Аймбетова Э. О., Шалабаев Н. Т., Сатбаев А. Б. Высокотемпературные и износостойкие материалы с повышенными эксплуатационными свойствами.....	2	30
Синицын Д. Ю., Аникин В. Н., Ерёмин С. А., Ванюшин В. О., Швецов А. А., Бардин Н. Г. Шликерные покрытия системы ZrB ₂ –MoSi ₂ –SiC на углерод-углеродных композиционных материалах.....	8	46
Синицын Д. Ю., Аникин В. Н., Ерёмин С. А., Юдин А. Г., Чупрунов К. О. Жаростойкие покрытия на УУКМ для авиакосмических применений.....	2	65
Сметкин А. А., Гилёв В. Г., Каченюк М. Н., Вохмянин Д. С. Получение пористого карбосилицида титана и его жаростойкость.....	1	57
Соков В. Н. Интенсификация пенотехнологии энергией электрогидротеплосилового поля. Часть 1. Анализ особенностей генерирования внутреннего давления в пеномассе при внесении в нее энергии электрического тока.....	5	56
Соков В. Н. Интенсификация пенотехнологии энергией электрогидротеплового поля. Часть 3. Исследование процессов тепло- и массопереноса в пеносистеме при воздействии ЭГТСП.....	9	64
Соков В. Н. Интенсификация пенотехнологии энергией электрогидротеплосилового поля. Часть 4. Этапы и параметры активации пеномасс полем внутреннего воздействия совокупных параметров на формирование структуры сырца.....	11	60
Соков В. Н., Кулибаев А. А. Интенсификация пенотехнологии энергией электрогидротеплосилового поля. Часть 2. Закономерности оптимизации структуры пенолегковесного материала под воздействием ЭГТСП.....	7	63
Степнов А. В., Беляев И. В., Баженов В. Е., Павлов А. А., Киреев А. В. Рециклинг порошка оксида алюминия после плазменного напыления.....	4	24
Стонис Р., Ягнятинскис А., Малайшкене Ю., Шкамат Е., Антонович В., Корякин А., Куджма А. Использование акустического метода измерения коэффициента поглощения звука для прогнозирования долговечности (термостойкости) жаростойких бетонов.....	12	43

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Сулейманов С. Х., Бабашов В. Г., Джанклич М. У., Дыскин В. Г., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю., Кулагина Н. А., Арушанов Г. М. Поведение теплозащитного материала на основе волокон Al_2O_3 и SiO_2 при воздействии концентрированного потока солнечной энергии.....	11	55
Таганова А. А., Бойченко Е. А., Киселев Н. В., Хайдаров Б. Б., Колесников Е. А., Юдин А. Г., Викулова М. А., Горшков Н. В., Кузнецов Д. В., Бурмистров И. Н. Синтез и исследование состава полых микросфер состава NiO и NiO/Ni для термоэлектрохимических преобразователей энергии низкопотенциальных температурных градиентов тепловых агрегатов в электричество.....	12	49
Теневич М. И., Шевчик А. П., Фищев В. Н. Влияние добавок титаната алюминия на параметры кристаллической решетки и спекание диоксида циркония.....	5	29
Тихомирова И. Н., Макаров А. В., Зин Мин Хтет. Теплоизоляционные материалы на основе вспученного вермикулита и вспененного жидкого стекла.....	8	41
Уразаева Э. М., Руми М. Х., Ирмаева Ш. К., Файзиев Ш. А., Мансурова Э. П., Зуфаров М. А. Структурно-фазовые характеристики легковесных огнеупоров на основе каолиновых и сухарных глин.....	10	61
Хашковский С. В., Перевислов С. Н. Синтез жаростойких бескислородных покрытий в системе Nb–Cr–Mo–Si–B из композиций, модифицированных халькогенидными соединениями тугоплавких металлов IV–VIa групп.....	1	63
Хмельев А. В. Разработка оксидно-безоксидных материалов в условиях плазменно-искрового спекания смеси безоксидных компонентов и добавки разного порошка металла.....	2	17
Хмельев А. В. Разработка плотных материалов плазменно-искровым спеканием оксидно-безоксидных компонентов с разными смесями порошков металлов.....	6	27
Хмельев А. В. Плазменно-искровое спекание оксидно-безоксидных компонентов с добавкой твердого раствора TiC–ZrC и разных смесей порошков металлов.....	10	27
Хорев В. А., Румянцев В. И., Пономаренко Г. А., Осмаков А. С., Фищев В. Н. Трибологические свойства пиролитического углерода в условиях высокоскоростных испытаний.....	1	71
Чернышов Н. С., Кузнецов Ю. А., Марков М. А., Красиков А. В., Быкова А. Д. Испытания на коррозионную стойкость оксидно-керамических покрытий, сформированных микродуговым оксидированием.....	4	51
Шарафеев Ш. М., Погребенков В. М. Процессы фазообразования в природных силикатах магния различной структуры при их фтораммонийной обработке.....	4	28
ЭКОЛОГИЯ		
Аверкова О. А., Гольцов А. Б., Логачёв К. И., Минко А. В. Снижение пылеуноса из аспирационного укрытия за счет механического экранирования.....	3	65
Гольцов А. Б., Логачёв К. И., Овсянников Ю. Г., Киреев В. М. Численное моделирование воздушных течений в загрузочном желобе аспирационного укрытия с многоступенчатым рециркуляционным воздушным затвором.....	12	61
Хохряков А. В., Студенок Г. А., Студенок А. Г., Ольховский А. М. Выбор метода защиты окружающей среды от загрязнения при добыче асбестосодержащей руды.....	8	66
Шаптала В. В., Логачев К. И., Северин Н. Н., Хуаленко Е. Е., Гусев Ю. М. Компьютерное моделирование вентиляции при выполнении электросварочных работ.....	8	59
Юсубов Ф. Ф. Измерения трения и износа порошковых композиционных материалов по механизму «палец-диск».....	9	60
ИНФОРМАЦИЯ И ХРОНИКА		
Травицкова А. Н. X Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы огнеупорного производства».....	4	60
<i>Поздравляем юбиляра</i>		
К 80-летию Владимира Васильевича Примаченко	4	19
К 80-летию Станислава Алексеевича Суворова	6	20
Олегу Юрьевичу Шешукову — 60 лет.....	2	16
Памяти Олега Владиславовича Романа	9	14
Статьи, опубликованные в журнале «Новые огнеупоры» за 2020 г.	12	69

ПОПРАВКА

В журнале «Новые огнеупоры № 5 за 2020 г. в статье «Термодинамическое моделирование химических и фазовых превращений в системе шлак от вельцевания – шлак» на с. 45 и 49 фамилию предпоследнего автора следует читать: «Аширбаев».

Соответственно в содержании журнала (contents) на с. 4 в левой колонке (16-я строка снизу) фамилию предпоследнего автора следует читать: «Аширбаев», в правой колонке следует читать: «Ashirbaev».

В рефератах (abstracts) на с. 67 в левой колонке (3-я строка снизу) фамилию предпоследнего автора следует читать: «Ashirbaev».

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. Для оформления рукописи используйте 12-й размер шрифта через 1,5 интервала. Рекомендованное максимальное число страниц рукописи (A4) — 15. Формулы, оформляемые отдельной строкой, должны набираться с использованием редактора формул (Equation). Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1–2003. Использование в библиографическом списке DOI обязательно. 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 Excel), 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.

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. To make out the manuscript, use the 12th font size in 1.5 intervals. The recommended maximum number of pages of the manuscript (A4) is 15. Formulas formed by an individual line should be typed using the Equation Editor. Please use the DOI number in the bibliographic list. 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 Excel 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 is not allowed offering the Editorial office an article which has been published by other journals or was sent to other publishing houses.
- The article sent to the Editorial office by foreign author is refereed firstly by an independent reviewer. Then it is edited and red-penciled, then it is translated into Russian and published in the journal «Novye Ogneupory». Further both the article and the original author's article are sent off to be published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics». Thus the final article published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics» can vary slightly from the original variant sent by the author.

- 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.

- 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>

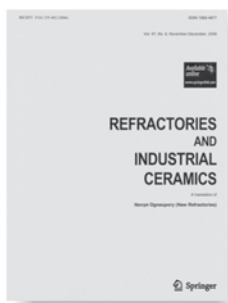
General repositories — for all types of research data — such as figshare and Dryad may also be used.

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 статьи, года издания, номера выпуска, страниц, номера журнала публикуется в Интернете:

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

Редакция

ABSTRACTS

UDC 666.7625.046.5: 621.365.22

The selection of melting unit for production of fused zirconia

Sokolov V. A., Gorbanenko M. A., Lisafin A. B., Gasparyan M. D. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 3–9.

Data are provided for preparation of fused and fused stabilized zirconia from baddeleyite and synthetic zirconia in induction, plasma and electric arc furnaces. The results are discussed and the prospects for zircon in an electric arc furnace are shown. The positive effect of the oxidizing melting mode in an electric arc furnace on the quality and process of obtaining the fused product is shown. Data on the production of fused zirconia from zircon in plasma furnaces are presented. Ill. 10. Ref. 27.

Key words: fused zirconia (FZ), fused stabilized zirconia (FSZ), baddeleyite, zircon, induction furnace, plasma furnace, electric arc furnace, oxidizing melting, carbothermy.

UDC 621.867.81/85.001.895

New developments in pneumatic delivery of binders and inert additives for building materials

Davydov S. Ya., Apakashev R. A., Valiev N. G., Kostiyk P. A. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 10–15.

The main characteristics, purpose and application of building binders in mining are given. Delivery of binders and aggregates to the mine workings is carried out in soft containers. Unloading of flexible containers is carried out using pneumatic chamber unloaders. A pneumatic unloader has been developed for unloading and feeding material to its destination, including lifting it. It is proposed to install transverse inserts in the form of lattices movably in height with the possibility of changing the distance between them in the process of reconfiguring the elevator, which does not exceed a certain value. A lifting device is proposed to increase the productivity and efficiency of the pneumatic transport by reducing or eliminating the blockage of the lower part of the pipeline. Ill. 3. Ref. 13.

Key words: cementitious building materials, pneumatic unloader, soft containers, gratings, transverse inserts, petals.

UDC 62-868;67-05;66-041

Modular-trigger electric furnace with distribution of local flow rates of bulk media over thermal zones

Nizhegorodov A. I., Gavrilin A. N., Moyses B. B., Ismailov G. M. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 16–23.

The results of analytical and experimental studies of temperature zones in the working space of the modules of the modular-trigger electric furnace are presented. The distribution of local flows of a granular medium over these zones is performed depending on their heating to increase productivity and reduce the energy intensity of the working process. The modular-triggering furnace with plate accelerators of local flows of a granular medium, located in its modules, has been modernized; a drum batcher with longitudinal step-variable depth slots on the drum has been adapted to it. The reasons for the formation of an inhomogeneous thermal field on the refractory surfaces of the firing modules are established on the basis of the analysis of the incident, effective and resulting flows in the working spaces of the modules by the methods of the

algebra of radiant fluxes. The analysis of experimental data, confirming the conclusions of the analytical study, is carried out, the width of each thermal zone is determined. The minimum sufficient time of movement of its particles in each thermal zone and the average local velocities of movement of particles in the indicated zones are determined using the example of vermiculite by comparing the thermal powers absorbed by it. The nonlinear character of the distribution of average local velocities of vermiculite flows over temperature zones is shown. The local productivity and total productivity of the furnace are determined, equal to 0,95 m³/s, which is 27 % higher than the productivity of the analogue pilot-industrial furnace with equal power consumption. Ill. 8. Ref. 9.

Key words: modular-trigger electric furnace, temperature zones, plate accelerator, thermal power, average local speeds, local productivity.

UDC 666.762.1:666.792.32

Synergistic effect of combined additions of clay and a complex organomineral thinner (COMT) in the technology of ceramic concrete (Review article)

Pivinskii Yu. E., Doroganov V. A., Doroganov E. A., Dyakin P. V. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 24–28.

The exceptional efficiency of the combination of clay additives together with the introduction of thinning additives of a complex organomineral composition (COMT) was found. The values of the initial porosity of 14–15 % of pressed high-alumina ceramic castable at a pressing pressure of 30 MPa were achieved. Depending on the composition of the masses and the content of clay additives at their relative humidity in the process of static pressing, the porosity of the material with the addition of COMT is approximately equal to the porosity of the material without the additive under the pressing pressure, 3–6 times lower than the pressure on the material with the additive. Ill. 3. Ref. 17.

Key words: HCBS, complex organomineral thinner (COMT), ceramic castable, rheological properties.

UDC 666.762.091

Application of the thermal shock resistance criteria for evaluating the fracture resistance under thermal stress of alumina ceramics and t-ZrO₂-Cr cermet

Ivanov D. A. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 29–37.

The thermal shock resistance of alumina ceramics with a fine-crystalline structure (crystal size 5–40 μm) and with a layered-granular structure, as well as t-ZrO₂-Cr₄₀ vol. %) cermet, was studied. Layered-granular ceramics consisted of randomly oriented layered granules, including alternating dense fine-crystalline layers and porous layers made of corundum microballs. The cermet structure is represented by two interpenetrating continuous skeletons formed from chromium grains and t-ZrO₂ grains. To assess the thermal shock resistance, in addition to the known criteria R₀, R₁ it is proposed to use new criteria R₀^{*}, R₁^{*} and the kinetic characteristic of fracture γ_F/γ_r. These criteria were compared with the thermal shock resistance by the number of thermal cycles to failure of specimens N and by the method of local thermal shock, which determines the relative loss of

crack resistance sample after a single thermal cycling R_T . The best thermal shock resistance possessed a layered-granular Al_2O_3 -ceramics due to the discrete and high-energy destruction mechanism. The use of chromium in the composition of cermet made it possible to significantly increase its thermal shock resistance in comparison with the thermal shock resistance of the ceramic component due to the presence of a heat-conducting metal component. It is shown that the application of the new criteria R_0^* and R_1^* made it possible to reliably predict the thermal shock resistance of the studied materials by the indicators N and R_T . Ill. 8. Ref. 26. Tab. 4.

Key words: cermet, thermal cycling, thermal shock resistance criteria, crack resistance, deformation diagrams, fracture work, fracture mechanism, alumina ceramics, zirconia partially stabilized, layered-granular structure.

UDC 666.974.2

Investigation of the effect of nanoscale alumina fiber on the heat resistance of refractory concrete

Dobrosmyslov S. S., Simunin M. M., Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Zadov V. E., Nagibin G. E., Khartov S. V. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 38–42.

The results of studies of the effect of nanofiber of aluminum oxide on the physical and mechanical characteristics of refractory concrete NPC-21AC are presented. It is shown that the use of nanofibers increases the ultimate strength in bending by 50 %, and the ultimate strength in compression by 30 % with a decrease in Young's modulus by 15 %. An increase in physical and mechanical characteristics leads to an increase in thermal resistance by 54–72 %, depending on the rate of heat transfer. The results of the study of the microstructure of the obtained material are presented. Ill. 6. Ref. 10.

Key words: heat resistance, nanofiber, aluminum oxide.

UDC 666.974.2

Using the acoustic method for measuring the sound absorption coefficient to predict the durability (heat resistance) of heat-resistant concretes

Stonys R., Jagniatinskis A., Malaiškienė J., Škamat J., Antonovič V., Koryakins A., Kudžma A. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 43–48.

The article shows the possibility of using the method of measuring the sound absorption coefficient α for predicting the heat resistance and residual life of heat-resistant materials using the example of heat-resistant concrete of three different compositions (without additives, with a plasticizer, with a micro-filler and a combined plasticizer). The critical value of α is established, corresponding to a significant degree of material destruction, at which further operation is impossible. The primary regression equations are obtained, which can be used for approximate prediction of the thermal stability of heat-resistant materials and the determination of their residual life. Ill. 6. Ref. 11. Tab. 2.

Key words: heat-resistant concrete, sound absorption coefficient, heat resistance prediction, residual life.

UDC 621.362:661.874.22

Synthesis and study of the composition of hollow microspheres of composition NiO and NiO / Ni for thermoelectrochemical energy converters of

low-potential temperature gradients of thermal aggregates into electricity

Taganova A. A., Boychenko E. A., Kiselev N. V., Khaidarov B. B., Kolesnikov E. A., Yudin A. G., Vikulova M. A., Gorshkov N. V., Kuznetsov D. V., Burmistrov I. N. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 49–53.

The article investigates the influence of the recovery modes of hollow nickel oxide microspheres synthesized by the pyrolysis of ultrasonic aerosols on the ratio of oxide and metallic forms of nickel in their structure. The synthesis of microspheres from an aerosol of an aqueous solution of nickel nitrate was carried out, their composition and morphology were studied. The reduction of microspheres was carried out in a stream of hydrogen at different temperatures. The ratio of metallic nickel and oxide was determined by two different methods, according to the data of thermogravimetric analysis and by the Rietveld method based on the results of X-ray phase analysis. It is shown that the proportion of metallic nickel increases with an increase in the reduction temperature to approximately 375 °C and then changes insignificantly. The fractional composition of microspheres was determined. Ill. 5. Ref. 20.

Key words: hollow microspheres, thermoelectrochemical heat converters, pyrolysis of ultrasonic aerosols.

UDC 666.3:546.28'171].017:539.375

Force analysis of stress-strain state of surface layer of ground Si_3N_4 -TiC ceramics

Kuzin V. V., Grigor'ev S. N., Volosova M. A. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 54–60.

The stress state of surface layer of ground Si_3N_4 -TiC ceramics under action of force loads is studied on the basis of the main concepts of computer engineering. The formation of microstructural stress concentrators at the point of application of a concentrated force, leading to changes in structure of ceramics due to formation of discontinuities, is revealed. Ill. 3. Ref. 22. Tab. 2.

Key words: Si_3N_4 -TiC ceramics, surface layer, stress state, stress intensity, microstructural stress concentrator, discontinuity, computer engineering.

UDC 533.6:628.5

Numerical simulation of air flows in the loading chute of an aspiration shelter with a multistage recirculating air seal

Gol'tsov A. B., Logachev K. I., Ovsyannikov Yu. G., Kireev V. M. // *New Refractories*. — 2020. — No 12. — P. 61–68.

The article discusses the multistage technological recirculation of aspiration air into the transfer chutes — the return of the air aspirated from the shelters of the technological equipment back to the technological process in order to reduce energy costs by creating aerodynamic drag on the path of the ejection air and maintaining the required thermal parameters in the equipment. It is recommended to equip the gutters with single-stage recirculation gates with the minimum possible angle of air supply to counter the flow ejected by the overloaded bulk material, which will increase the energy efficiency of ventilation systems and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere. Ill. 7. Ref. 36.

Key words: dedusting ventilation, recirculation, energy saving, conveyor reloading.