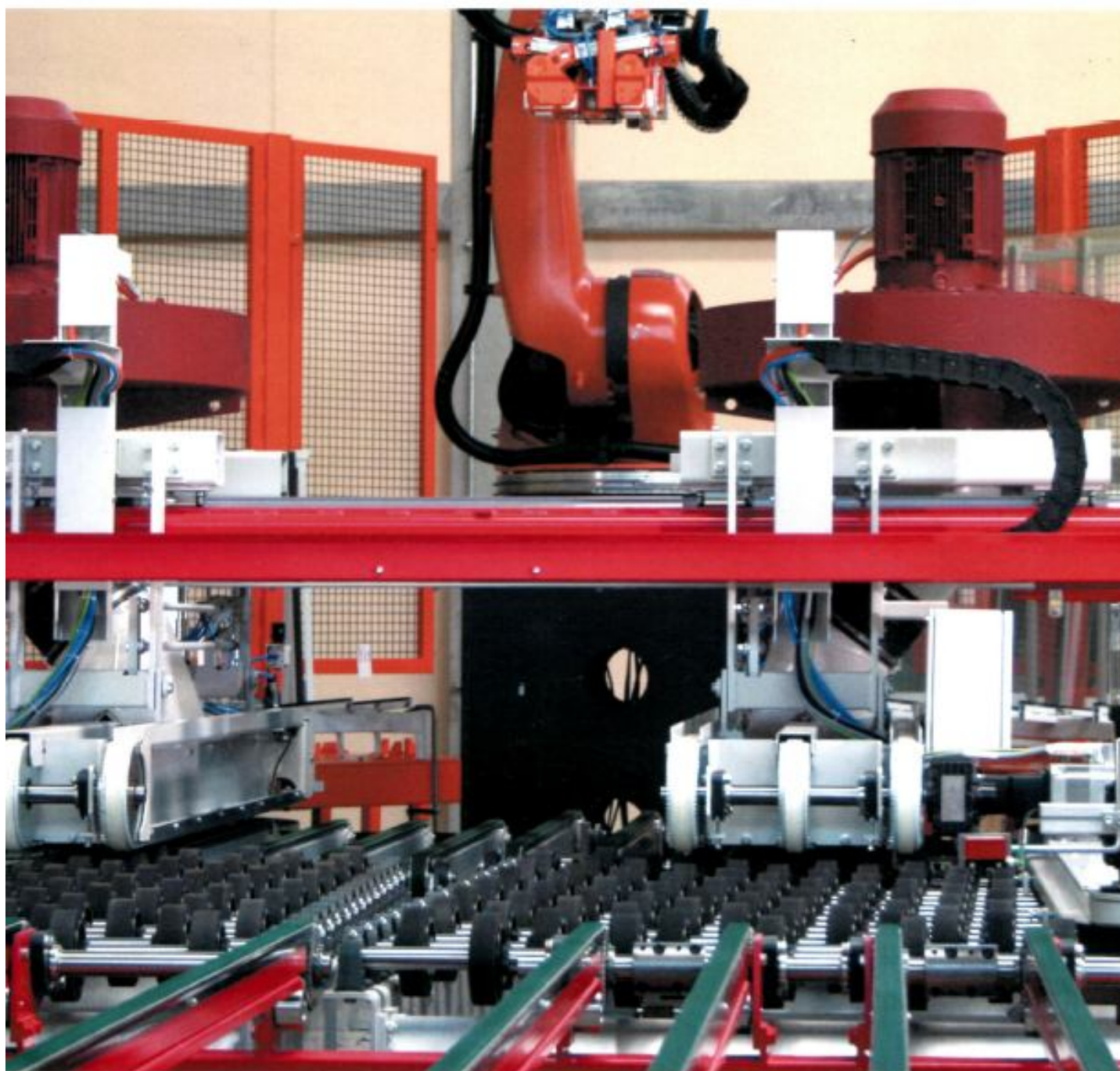


11  
079

ISSN 0131-9582

# СТЕКЛО И КЕРАМИКА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



№ 4

апрель 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Наука – стекольному производству	ЯЦЕ НКО Е. А., ЗУБЕХИН А. П., ГОЛЬЦМАН Б. М., СМОЛИЙ В. А., КОСАРЕВ А. С. Исследование факторов, влияющих на свойства и структуру ланошлакостекла	3
	СЕРГЕЕВ М. М., КОСТЮК Г. К. Лазерно-индуцированное формирование модифицированных областей протяженной формы в объеме пористого стекла, импрегнированного солями серебра	7
	МАКАРОВ Р. И. Статистическое описание технологических процессов в производстве стекла	14
Отходы – в производство	ХОМЕНКО Е. С., КОЛЕДА В. В., МИРШАВКА О. А., РИПАК В. Р. Утилизация отходов производства озонокрита в многоступенчатой энергосберегающей технологии изготовления строительной керамики	17
Наука – керамическому производству	ФЕДОСОВА Н. А., ФАЙКОВ П. П., ПОГОВА Н. А., ЗЫОНГ Ч. Т. Т., ЗАРАМЕНСКИХ К. С., СОВЫК Д. Н., КОЛЬЦОВА Э. М., ЖАРИКОВ Е. В. Влияние природы углеродных нанотрубок на структуру и прочность керамического композита	22
	БЕНДОВСКИЙ Е. Б. Керамические изделия различного назначения из нитрида кремния	27
	НИКИФОРОВ А. С., ПРИХОДЬКО Е. В., КИЖИВЕНКОВА А. К., КАРМАНОВ А. Е. Исследование предела прочности перикладоуглеродистых оптических материалов и анализа их прочностных характеристик при повышенных температурах	32
На предприятиях и в институтах	СЛЮСАРЬ О. А., УВАРОВ В. М. Смягчение твердой поверхности растворами модифицирующих добавок	36
Информация	Седьмая Международная конференция «Стеклопрогресс–XXI» в Саратове приглашает принять участие	21

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

© Москва «Стекло и керамика», 2014

Перепечатка материалов из журнала при обязательном письменном согласовании с редакцией, ссылка на журнал обязательна

Журнал переводится на английский язык и публикуется в США «SPRINGER SCIENCE + BUSINESS MEDIA, INC»

**ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СТАТЕЙ,  
ПУБЛИКУЕМЫХ В ЖУРНАЛЕ  
«СТЕКЛО И КЕРАМИКА»**

**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**ТЕХНИКА**

**ТЕХНОЛОГИИ**

**ПРОИЗВОДСТВО ВСЕХ ВИДОВ**

**СТЕКЛА** (строительное, техническое, сортовое, специальные стекла, хрусталь, термалы и др.)

**КЕРАМИКИ** (фарфор, фаянс, грубая керамика, оптические, технические конструктивная, сверхпроводящая и другие виды специальной керамики)

**СИТАЛИКОВ И СТЕКЛОКЕРАМИКИ**

**СТЕКЛОПЛАСТИКОВ**

**ЭМАЛЕЙ И ГЛАЗУРЕЙ**

**КАМЕННОГО ЛЕНТА**

**МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ**

**ДРУГИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ,  
ОБЖИГОВЫХ НОВЫХ И  
ТРАДИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

- строительство
- товары народного потребления
- химия
- металлургия
- электроника и электротехника
- медицина
- оптика
- другие области

В журнале также помещаются статьи по следующим вопросам:

- Новая техника, оборудование
- Технические перевооружение предприятий и производства
- Развитие сырьевой базы, рациональное использование сырья, в том числе местного, отходов промышленности
- Ресурс- и энергосберегающие технологии. Охрана окружающей среды
- хозяйственная деятельность предприятий в рыночных условиях, экономика, маркетинг
- Заводской опыт
- Информация, реклама

**CONTENTS**

**SCIENCE FOR GLASS PRODUCTION**

YATSENKO Ye. A., ZUBEKHINA A. P., GOLTSMAN B. M., SKOLY V. A., KOSAREV A. S. Investigation of parameters determining foam slag-glass structure and properties	3
SERGEEV M. M., KOSTYUK G. K. Laser-induced formation of elongated modified areas within porous glass impregnated with silver salts	7
MAKAROV R. I. Statistic description of technological processes in glass-making	14

**UTILIZATION OF WASTE**

KHOMENKO E. S., KOLEDA V. V., MIRSHAYKA O. A., RYPAK V. R. Utilization of mineral waste production waste in heavy tonnage energy-efficient manufacturing of construction ceramics	17
---	----

**SCIENCE FOR CERAMIC PRODUCTION**

FEDOSOVA N. A., FAIKOV P. P., POPOVA N. A., ZYONG Ch. T. T., ZARAMENSKKH K. S., SOVYK D. N., KOLITSOVA E. M., ZHARKOV E. V. Effect of carbon nanotubes nature on structure and strength of ceramic composites	22
BIENDOVSKIY E. B. Silicon nitride ceramics of miscellaneous purpose	27
NIKIFOROV A. S., PRIKHODKO E. V., KINOBEKOVA A. K., GARMANOV A. E. Strength investigation and high-temperature strength behaviour analysis for periclase-carbonaceous refractories	32

**AT THE ENTERPRISES AND INSTITUTES**

SILYUSAR' O. A., UNAROV V. M. Solid surface wetting with dopant solutions	36
---	----

**INFORMATION**

VII International conference «Glass Progress-200» in Saratov calls for participants	21
---	----

**АДРЕС РЕДАКЦИИ (почтовый и для посетителей):**

125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, 20, корп. 3  
(РХТУ им. Д. И. Менделеева), комн. 302  
Телефон: (495) 495-39-76  
E-mail: st.lsgam@rftu.ru



УДК 666.762

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПЕРИКЛАЗО-УГЛЕРОДИСТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И АНАЛИЗ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Д-р техн. наук А. С. НИКИФОРОВ (e-mail: aleke4599@mail.ru), канд. техн. наук Е. В. ПРИХОДЬКО, канд. техн. наук А. К. КИНЖИБЕКОВА, А. Е. КАРМАНОВ

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова (Казахстан, г. Павлодар)

*Рассмотрено описание установки для определения предела прочности огнеупорных материалов при сжатии при повышенных температурах. Приведены значения предела прочности при сжатии периклазоуглеродистых материалов в диапазоне температур 20 – 500 °С. Проведен анализ процесса разрушения и прочностных характеристик*

**Ключевые слова:** предел прочности на сжатие, огнеупоры, периклазоуглеродистые материалы, разрушение, напряжения

Высокотемпературные агрегаты футеруются огнеупорными материалами. При этом срок службы многих высокотемпературных агрегатов определяется сроком службы футеровки.

Оптимизация факторов, влияющих на стойкость футеровки, позволяет в несколько раз увеличить рабочую кампанию агрегатов. Даже не меняя вид используемого огнеупора, совершенствуя лишь условия эксплуатации (температурные режимы), можно добиться значительного результата.

При температурном воздействии на футеровку печи возникают такие физические явления, как расширение и растрескивание. Возникает необходимость непрерывного процесса работы агрегата без нарушения целостности футеровки рабочей камеры и технико-экономических показателей процесса.

Для предотвращения разрушения футеровки под действием возникающих при нагревании напряжений следует эксплуатировать ее в режиме, обеспечивающем скорость роста напряжений ниже скорости их релаксирования. Подсчет значений термических напряжений важен при выборе скорости нагрева. Рассчитанные по формулам значения напряжения сравнивают с допустимыми значениями, на основании чего делают вывод о скорости разогрева агрегата. Средняя скорость разогрева высокотемпературных агрегатов составляет около 60 °С/мин [1].

В расчетах в качестве допустимых значений напряжений, возникающих при изменении температурного поля, используют предел прочности ма-

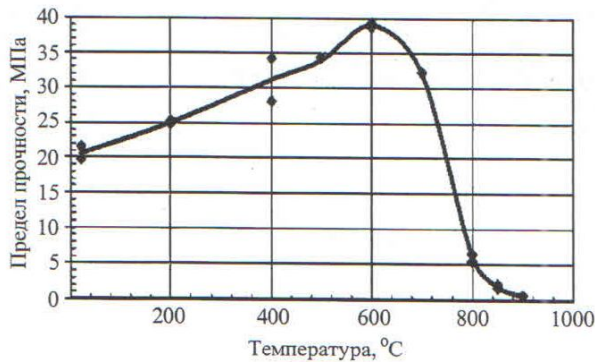
териала. Зная точную зависимость предела прочности используемых материалов от температуры, можно добиться максимальной скорости разогрева агрегата (по условиям возникновения термических напряжений).

В работе [2] приведены результаты испытаний углеродсодержащих огнеупоров производства ОАО «Комбинат Магнезит». В статье указаны характеристики изделий, их стойкость, а также отмечена повышенная устойчивость огнеупоров к термическому скалыванию при колебаниях температуры. При этом стоит отметить, что такая характеристика, как предел прочности при сжатии (принимающий значения от 19 до 61 МПа для разных видов огнеупоров) приведена только при температуре 20 °С. Таким образом, в заводских данных не показана динамика изменения этого параметра в зависимости от температуры.

При разработке тепловых режимов разогрева высокотемпературных агрегатов значения многих параметров принимают постоянными, т.е. не зависящими от температуры. Так, например, зачастую принимают постоянными для расчетов значения удельной объемной теплоемкости  $c$ , коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и предела прочности  $\sigma$ . Между тем значение такого параметра, как предел прочности материала при сжатии, существенно зависит от температуры.

Изучение зависимости предела прочности керамического материала, используемого в качестве





**Рис. 1.** Зависимость предела прочности при сжатии шамотного огнеупора (ШБ-5) материала от температуры

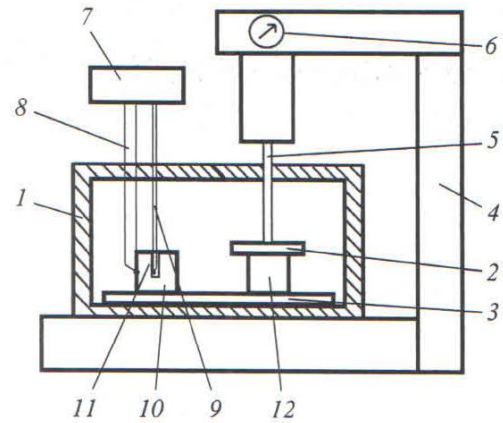
футеровки, от температуры имеет большое значение для разработки графиков разогрева высокотемпературных агрегатов.

В работе [3] приведена установка для измерения модуля упругости и предела прочности при сжатии, входящая в состав комплекса ИК-4. Установка позволяет определять прочность при сжатии и модуль упругости формованных материалов и набивных масс. В работе приведены зависимости предела прочности и модуля упругости шамотного огнеупора (ШБ-5) от температуры испытания. Показано, что если при температуре 20 °C предел прочности при сжатии огнеупорного материала составляет 20 МПа, то при 600 °C предел прочности равен уже 40 МПа. При этом на участке температур 20 – 600 °C предел прочности возрастает практически линейно, но после максимальной прочности при 600 °C его значение падает при 800 °C до 5 МПа.

Иная картина наблюдается для диносовых изделий [4]. Значение предела прочности при сжатии при нагревании падает до температуры 230 – 270 °C, затем возрастает до 600 °C и далее вновь уменьшается.

Авторы работы [5] приводят зависимость предела прочности при сжатии при высоких температурах для различных огнеупорных изделий. В работе не приводится состав и теплофизические характеристики испытуемых материалов, что затрудняет сравнительный анализ полученных данных. Представленная зависимость для диносовых огнеупоров имеет экстремумы при других значениях температур, нежели приводит источник [4]. Предел прочности магнетитовых же огнеупоров в зависимости от температуры имеет тенденцию плавного снижения.

Поскольку тепломеханические характеристики у различных видов огнеупоров отличаются, при



**Рис. 2.** Схема устройства для термомеханических испытаний материалов

использовании огнеупоров в высокотемпературных агрегатах необходимо знание таких характеристик. Поэтому вопрос экспериментального определения зависимости предела прочности от температуры для конкретного вида огнеупора является актуальным.

В связи с этим была поставлена задача разработки способа определения предела прочности материалов при повышенных температурах и нахождения зависимости предела прочности от температуры для периклазоуглеродистых огнеупоров.

Для решения этой задачи была разработана методика и создана установка по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах [6].

На рис. 2 изображена схема устройства для термомеханических испытаний материалов.

Измерение предела прочности при сжатии осуществляется следующим образом. Из исследуемого материала изготавливают два одинаковых образца в форме цилиндра или прямоугольного параллелепипеда: контрольный 1 и испытуемый 2. В контрольном образце 1 размещают термопару 4, горячий спай которой максимально приближен к геометрическому центру (по вертикальной оси симметрии высверливают канал 3 до половины высоты контрольного образца). Термопару 5 для измерения температуры на поверхности контрольного образца 1 устанавливают в любой точке на боковой поверхности. Контрольный образец 1 с закрепленными термопарами и испытуемый образец 2 помещают в печь 6 на нижнюю плиту 7. При этом цилиндрические образцы устанавливают на любое основание, а образцы в виде прямоугольного параллелепипеда – на любую грань.



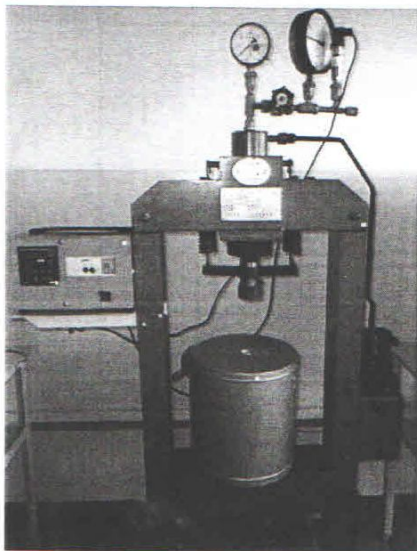


Рис. 3. Схема для исследования зависимости предела прочности при сжатии от температуры

Термопары подключают к вторичному прибору для измерения температуры – сумматору  $\delta$ , который показывает значение температуры  $t$ , определяемое по формуле

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2},$$

где  $t_1, t_2$  – показания термопары соответственно внутри и на поверхности контрольного образца.

После включения в работу печи  $6$  следят за величиной значения температуры  $t$ , которая определяет достижение заданной температуры испытания. Температура  $t$  считается температурой испытания.

После достижения такого температурного состояния испытуемый образец  $2$  подвергают одноосному нагружению прессом  $9$  посредством воздействия силовой тяги  $10$  на верхнюю плиту  $11$  до разрушения испытуемого образца  $2$ . Нагрузка на образец определяется по силоизмерительному устройству  $12$ . При этом нагрузка должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20 – 60 с после начала испытания.

Предел прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  ( $\text{Н/м}^2$ ) испытуемого образца вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{F},$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при сжатии,  $\text{Н/м}^2$ ;

$P$  – наибольшая нагрузка, при которой произошло разрушение образца,  $\text{Н}$ ;

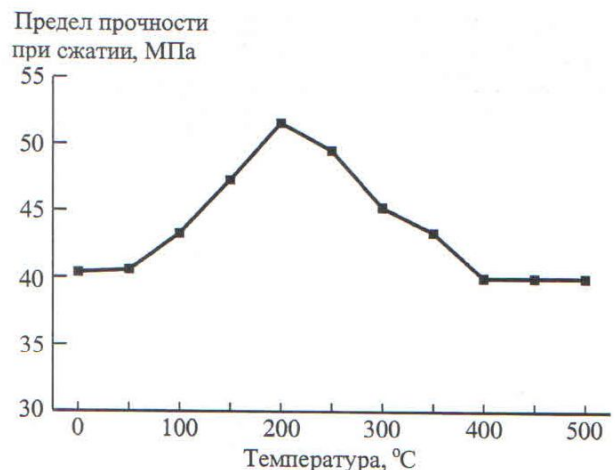


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  от температуры

$F$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ .

При определении предела прочности при сжатии повышается точность измерений вследствие того, что в качестве температуры испытания используется средняя температура материала, а не температура вблизи средней точки поверхности образца (в отличие от ГОСТ Р 50523–93). Устройство для исследования зависимости предела прочности при сжатии от температуры показано на рис. 3.

В качестве исследуемых образцов использовали периклазоуглеродистые огнеупоры состава:  $\text{MgO} \geq 80\%$ ;  $\text{C} \geq 8\%$ . При этом заявляемый предел прочности при сжатии равен 40 МПа (паспортные данные завода-изготовителя).

Определение предела прочности проводили в диапазоне температур 20 – 500 °С. Результаты измерений приведены на рис. 4.

Коэффициент корреляции представленной зависимости составил 0,966.

Кривая зависимости предела прочности от температуры имеет следующие тенденции: начиная с температуры ~90 °С предел прочности огнеупора растет до температуры ~200 °С, затем значение предела прочности начинает плавно снижаться, доходя до 40 МПа (при ~400 °С).

Зависимость напряжения от температуры у огнеупорных материалов очень сложная, поскольку имеют место не только обратимые упругие деформации, но и необратимые пластические, зависящие от времени деформации.

Прочность огнеупоров с повышением температуры снижается, что обусловлено увеличением расстояний между атомами, ослаблением межатомных связей, образованием жидкой фазы, появлением



пластической деформации. Образование жидкой фазы по границам кристаллов и между зёрнами является главным фактором уменьшения прочности промышленной группы огнеупоров. С образованием жидкой фазы уменьшается концентрация напряжений в материале и происходит смена механизмов деформации от упругого к вязкопластичному [7].

В данном случае увеличение предела прочности образцов в температурном диапазоне 150 – 300 °С можно объяснить снижением общей пористости при невысоких температурах без химических превращений.

Снижение предела прочности при нагреве выше 400 °С объясняется началом разложения гидратов магния, при котором и возникают трещины в огнеупоре и теряется прочность.

Полученные данные по снижению прочности подтверждаются авторами работы [8], которые проводили исследования структурно-фазовых изменений магниевых огнеупоров. На кривой ДТА периклазового огнеупора были зафиксированы эндоэффекты с экстремумами при 150 и 375 °С. Кроме того, на кривой ДТГ фиксируется четкий двойной эндоэффект потери массы при температуре 550 и 615 °С. Первые два эндоэффекта авторы связывают с удалением физически связанной и кристаллизационной воды, а два высокотемпературных – с дегидратацией слабозакристаллизованных гидросиликатов магния.

Полученные нами экспериментальные данные позволяют говорить об увеличении значения предела прочности при сжатии в интервале температур

150 – 300 °С (до 20 %) исследованных огнеупоров, что дает дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энерго-ресурсов на процесс разогрева.

Разработанная методика и устройство для определения предела прочности материалов при повышенных температурах позволяют с достаточной точностью определить этот теплофизический параметр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кингери У. Д.* Введение в керамику. М.: Стройиздат, 1969.
2. *Огнеупорные материалы* для рабочей футеровки сталеразливочного ковша. URL: <http://magnezit.ru/ru/products/iron-and-steel/steel-teeming-ladles/data/?tab=4> (дата обращения 07.05.2013).
3. *Модуль упругости* и прочность на сжатие. URL: [http://www.elter.ru/measuring/modul\\_Yunga](http://www.elter.ru/measuring/modul_Yunga) (дата обращения 07.05.2013).
4. *Разновидности кремнеземистых* материалов. URL: <http://arxipedia.ru/teploizolyacionnye-i-ogneupornye-materialy/raznovidnosti-kremnezemistykh-materialov.html> (дата обращения 01.05.2013).
5. *Огнеупоры* и футеровки / пер. с яп. С. И. Жужи и Б. В. Крылова; под ред. И. С. Кайнарского. М.: Металлургия, 1976.
6. *Инновационный пат. 21807 Республика Казахстан.* Способ термомеханических испытаний материалов и устройство для его осуществления / Е. В. Приходько, А. С. Никифоров, И. В. Шанов; опубл. 15.10.2009 // Бюл. 2009. № 10. 4 с.
7. *Суворов С. А.* Научные принципы технологии огнеупоров. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2009.
8. *Ефремов А. Н., Бородай Е. Т.* Структурно-фазовые изменения камня огнеупорных щелочных магниевых вяжущих при нагреве // Вісник Донбаської нац. Академії будівництва і архітектури. 2007. № 6. С. 133 – 138.

## Вниманию зарубежных подписчиков журнала “Стекло и керамика”

Подписка журнала (на русском языке) за рубежом оформляется через фирмы-партнеры ЗАО “МК – Периодика” или непосредственно в ЗАО “МК-Периодика” по адресу:

11524, Москва, ул. Электродная, 10, ЗАО “МК-Периодика”

Тел.: (495) 672-70-12, 672-70-42 Факс: (495) 306-37-57

E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)

Internet: <http://www.periodicals.ru>

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC “Mezhdunarodnaya kniga – Periodica” in your country or to JSC “MK-Periodica” directly.

Address: Russia, 11524 Moscow; 10, Élektrodnaya Street, JSC “MK-Periodica”

Tel.: (495) 672-70-12, 672-70-42 Fax: (495) 306-37-57

E-mail: [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)

Internet: <http://www.periodicals.ru>