

## КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА ДЛЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ С Пониженной Температурой Спекания

Д.А. Антонов, С.С. Павлов, Н.А. Макаров

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева  
г. Москва, Российская Федерация

*Разработан материал Ш-4 перспективный для изготовления мелющих тел и футеровок мельниц. Материал обладает высоким уровнем физико-механических характеристик, превосходящих промышленно используемый уралит. Температура спекания материала в воздушной среде не превышает 1550 °С. Средняя плотность материала 3,63 г/см<sup>3</sup>; закрытая пористость не превышает 2 % об; предел прочности при трехточечном изгибе 360 МПа. Выявлены факторы, которые влияют на износостойкость керамики.*

**Ключевые слова:** оксид алюминия, эвтектические добавки, спекание, керамические мелющие тела, износостойкость, размолоспособность

## ALUMINA CERAMICS FOR GRINDING BODIES WITH LOWER SINTERING TEMPERATURE

D.A. Antonov, S.S. Pavlov, N.A. Makarov

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
Moscow, Russian Federation

*The developed material is promising for the manufacture of grinding bodies and lining of mills. The material has a high level of physico-mechanical characteristics, superior to the industrially used uralite. The sintering temperature of the material in the air does not exceed 1550 °C. The average density of the material is 3.63 g/cm<sup>3</sup>; internal porosity of 2 %; average flexural strength of 360 MPa. Factors that affect the wear resistance of ceramics are revealed.*

**Keywords:** aluminum oxide, eutectic additives, sintering, ceramic grinding bodies, wearability, grindability

**E-mail:** dimantonoff@gmail.com, nikmak-ivmt@mail.ru

### 1. Введение

Керамика на основе корунда широко применяется во многих областях техники благодаря совокупности ценных физико-технических свойств. Материалы на основе

оксида алюминия обладают мелкокристаллической структурой, пределом прочности при изгибе 300–800 МПа, хорошими электроизоляционными свойствами, высокой теплопроводностью, радиационной и химической стойкостью. Корундовая керамика обладает высокой износостойкостью и может использоваться при температурах до 1750–850 °С. Существенным недостатком корундовых материалов является высокая температура спекания, которая находится на уровне 1750–1800 °С, что приводит к износу печного оборудования и увеличению энергозатрат [1, 2, 4].

Целью данной работы является разработка износостойких керамических материалов с температурой спекания не превышающей 1550 °С. Снижение температуры спекания керамического материала достигается тремя основными способами: увеличение дисперсности порошка, внесение дефектов в кристаллическую решетку и введение модифицирующих добавок. Использование в качестве модификаторов добавок эвтектических составов за счет образования жидкости в ходе обжига позволяет снизить температуру спекания до уровня 1350–1500 °С. В процессе охлаждения происходит кристаллизация расплава благодаря «генетической» памяти эвтектики о кристаллических фазах, что способствует получению плотных мелкокристаллических материалов.

## **2. Аналитическая часть**

### **2.1 Свойства керамики на основе оксида алюминия**

Значительная прочность и мелкокристаллическое строение создают предпосылки для создания изделий с хорошими эксплуатационными свойствами – твердостью, износостойкостью, долговечностью.

Важным свойством керамики на основе корунда является ее высокая износостойкость. Алумооксидные материалы подразделяются на высокоглиноземистые и корундовые в зависимости от содержания корунда. Высокоглиноземистые содержат от 73 до 90 мас. %  $Al_2O_3$ , их истираемость в различных мельницах колеблется в пределах от 0,10 до 0,15 %/час (например, уралит). Корундовые материалы содержат от 90,0 до 99,9 мас. %  $Al_2O_3$ , их истираемость в тех же условиях составляет от 0,05 до  $6 \cdot 10^{-4}$  %/час (например, ГБ-15, ГБ-15М). Во многом, граница между высокоглиноземистыми и корундовыми материалами весьма условна. В целом необходимо отметить, что износостойкость керамики определяется двумя группами факторов, которые могут быть классифицированы на внутренние и внешние. К внешним факторам относят характеристики технологического процесса, конструктивные особенности помольных агрегатов форму и размеры мелющих тел. Внутренние факторы включают структуру, состав и свойства керамики. Первостепенное влияние на износостойкость однотипных материалов, по-видимому, оказывают структура и фазовый состав материала [5].

Таким образом, следует заключить, что любое физико-механическое свойство конструкционной керамики напрямую зависит от какого-либо параметра структуры, основными среди которых являются пористость, средний размер кристаллов, критическая длина трещины, толщина прослойки второй фазы. Регулируя значения этих величин, можно добиться существенного прогресса в прогнозировании свойств керамических материалов и осознанно подойти к установлению взаимосвязи состав – структура – свойства – технология.

### **2.2 Особенности структуры и свойства керамики в системе $Al_2O_3$ – модифицирующая добавка**

Микроструктура зависит от строения исходного порошка, вида и содержания добавок, механизма спекания [1, 2, 7]. Размер кристаллов изделий технических марок составляет 1–5 мкм, таким образом, рекристаллизация при спекании незначительна.

Поэтому при проведении высокотемпературной термообработки основная задача состоит в максимальной степени ограничения степени вторичной рекристаллизации [1].

Для корундовой керамики без добавок характерна длиннопризматическая форма кристаллов, размер которых составляет 15–40 мкм. Некоторые кристаллы достигают размеров 300–500 мкм. Структура отличается пористостью, достигающей значительных величин, как внутрикристаллической, так и межкристаллической. Вследствие этого невозможно получить материалы с высоким уровнем свойств из чистого корунда.

Выпускаемая промышленностью корундовая керамика содержит разнообразные модификаторы. Поскольку MgO благоприятно регулирует микроструктуру корунда, он применяется практически во всех случаях при изготовлении высокоплотных алюмооксидных материалов. Введение периклаза в оксид корунд позволяет получить мелкокристаллическую плотноупакованную структуру с изометрической формой зерен. Пористость такой керамики в основном межзеренная, составляет менее 0,5 % [4]. Установлено [1, 4], что при введении в корунд до 0,25 мас. % MgO удается получить мелкокристаллическую структуру с изометрической формой зерен и размером кристаллов 3–30 мкм, с преобладающим размером 7–22 мкм. Пористость таких материалов 2–3 % [1, 2].

В середине 20 века в СССР разработана керамика ВК 100 – 1 (поликор), которая представляет собой оксид алюминия с добавкой 0,25 мас. % MgO. Керамика используется для изготовления высококачественных изделий из корунда электротехнического назначения [4].

Современные виды корундовой керамики изготавливают, в основном, на основе глинозема, легированного 0,25 мас. % MgO, ГН -1, Г-00, Г-000 и др. [5].

Одним из путей улучшения качества корундовой керамики с добавкой оксида магния является обеспечение равномерного распределения модификатора и применение дисперсного исходного сырья. В этом случае можно получать материалы с равномерной микроструктурой и высоким уровнем физико-механических, а также электрофизических и деформационных свойств.

Другим способом улучшения свойств керамики является использование в качестве одного из компонентов частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) [2]. Показано, что при этом удается добиться более равномерной кристаллизации, ограничить рекристаллизацию, и, как следствие, повысить прочностные свойства [2, 8].

На основе глинозема ГЛМК разработан материал корал-2, содержащий в своем составе небольшое количество модификатора высокодисперсных частиц системы  $Al_2O_3 - ZrO_2$  с размером частиц до 0,5 мкм. Введение диоксида циркония позволяет регулировать процесс роста кристаллов корунда (размер на уровне 5–10 мкм) и создать керамику с равномерной структурой [1, 2].

### **2.3. Особенности технологии корундовой керамики с пониженной температурой спекания**

На основе корунда созданы материалы с мелкокристаллической структурой, пределом прочности при трехточечном изгибе 400–800 МПа, трещиностойкостью на уровне 5–6 МПа·м<sup>1/2</sup> [6, 9]. Однако подобная керамика имеет температуру спекания, достигающую 1750–1800 °С.

Необходимость проведения обжига при таких температурах повышает требования к футеровкам, значительно уменьшает время службы тепловых агрегатов.

В современных условиях производство вышеуказанных материалов стало дорогостоящим, поэтому основной задачей является снижение температуры спекания рассматриваемой керамики до уровня 1400–1550 °С.

Многими исследованиями показано, что снижение температуры спекания может быть достигнуто за счет увеличения дисперсности частиц исходного порошка, повышения энергии кристаллической решетки, а также при введении добавок [2, 10].

Размер частиц является основным фактором, определяющим особенности спекания. С повышением дисперсности увеличивается площадь соприкосновения частиц, возрастает их суммарная поверхностная энергия [10, 11]. Максимальный размер частиц, способных к активному спеканию, не должен превышать 5 мкм [3]. Более благоприятным является размер менее 1 мкм [2, 10, 11]. Данные, приведенные в [3], свидетельствуют, что только при размере частиц <1 мкм поверхностной энергии достаточно для уплотнения материала при температуре обжига 1650–1750 °С.

Исследования влияния строения порошков на микроструктуру керамики и ее свойства позволили сформулировать основные требования к порошкам для изготовления высококачественных материалов [1, 2, 11]:

- равномерное распределение компонентов;
- узкое распределение частиц по размерам;
- шарообразная форма частиц;
- постоянство размеров частиц.

Рассмотрение традиционных способов получения исходных материалов из-за повышающихся требований к порошкам вновь становится актуальным. К ним можно отнести измельчение в шаровых и вибрационных мельницах.

Проблемой, возникающей при подготовке порошков, является агрегация [11]. Поэтому основной задачей является предотвращение или уменьшение агрегации порошков, а также проведение помола.

На степень агрегации порошка влияет природа соли – предшественника получаемого в дальнейшем оксида. Оксиды, изготовленные из хлоридов, сульфатов, нитратов, агрегируют. Материалы, синтезированные из кристаллогидратов, также подвержены агрегации вследствие появления жидкой фазы при плавлении в собственной кристаллизационной воде. Эффективным методом дезагрегации порошка является измельчение в воде или органических жидкостях перед прокаливанием.

Обобщая работы по спеканию керамики на основе чистых оксидных и бескислородных соединений с добавками, все модификаторы по характеру взаимодействия с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  разделены на 4 группы [1]:

- 1) полностью растворимые в кристаллической решетке оксида ( $\text{HfO}_2$  в  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  в  $\text{ZrO}_2$ );
- 2) нерастворимые в кристаллической решетке основного оксида, образующие жидкую фазу за счет плавления или взаимодействия с основным оксидом с образованием эвтектического расплава ( $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и др.);
- 3) нерастворимые в кристаллической решетке основного оксида и не взаимодействующие с ним (эвтектики в системах  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ ,  $\text{BeO} - \text{ZrO}_2$  и др.);
- 4) вступающие в химическое взаимодействие с основным оксидом с образованием соединения ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  в  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и др.).

Широко в технологии современных керамических материалов применяют модификаторы первой и второй групп. Действие добавок первой группы определяется изменением концентрации вакансий в материале. Добавка должна повышать концентрацию тех дефектов, которые лимитируют скорость спекания [12].

При введении растворимых добавок возможно образование твердых растворов внедрения или замещения с основным оксидом. Для образования непрерывного ряда твердых растворов замещения должны выполняться следующие условия [12]: близость параметров решеток основного оксида и модификатора, различие ионных радиусов

катионов не более 15 %, совпадение зарядов катионов оксидов, образующих твердые растворы. Образование растворов внедрения возможно при разном радиусе катиона модификатора и основного оксида, причем размер катиона модификатора должен быть существенно меньшим.

Влияние добавок на уплотнение  $Al_2O_3$ , рассмотренное Н. М. Павлушкиным [4], позволило разделить изученные соединения на 3 группы:

- модификаторы, облегчающие спекание и ускоряющие рост кристаллов ( $Ti^{4+}$ ,  $Ti^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ );
- модификаторы, замедляющие спекание и рост кристаллов ( $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ );
- модификаторы промежуточного типа ( $B^{3+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Au^+$ ).

Разработчики материалов сходятся во мнении, что наиболее эффективна добавка  $Mg^{2+}$ , реализующая мелкокристаллическую микроструктуру [4].  $MgO$  взаимодействует с  $Al_2O_3$ , образуя шпинель, которая препятствует росту кристаллов корунда. Однако имеются сведения и о распределении оксида магния по объему кристаллов [12].

Большое внимание стоит уделить добавкам, образующим в ходе спекания жидкую фазу. Анализ данных позволяет разделить их на несколько подгрупп.

К первой подгруппе отнесены модификаторы типа  $R^+O - Al_2O_3 - SiO_2$  и  $R^{2+}O - Al_2O_3 - SiO_2$  (где  $R^+$  и  $R^{2+}$  – катионы щелочного и щелочноземельного металлов). Модификаторы  $R_2O - Al_2O_3 - SiO_2$  не нашли применения, поскольку с их использованием не удалось изготовить плотной керамики. Модификаторы  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$  исследовали вплоть до 80-х годов; совершенствование методов их получения позволило разработать керамические материалы, обладающие открытой пористостью на уровне 2 % и температурой спекания 1450 °С. Предел прочности при изгибе, такой керамики, составляет ~300 МПа.

Среди добавок данной подгруппы необходимо выделить эвтектику  $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ , которой посвящено максимальное количество исследований.

При выборе модификаторов, плавящихся в ходе обжига, необходимо учитывать ряд требований, сводящихся к следующему [13]:

- равенство координационных чисел иона алюминия в расплаве и тугоплавкой фазе;
- использование добавок, имеющих минимальную температуру спекания;
- применение таких легкоплавких систем, которые обеспечивают кристаллизацию расплава в процессе охлаждения.
- учет стерического фактора на поверхности раздела твердой и жидкой фаз.

Исследования закономерностей спекания керамики на основе корунда, содержащей эвтектические модификаторы, продолжаются и в настоящее время.

#### **2.4. Основные закономерности измельчения**

Основной задачей теории измельчения является установление взаимосвязи между дисперсностью измельчаемого материала, и затратами энергии мельницей с заданными конструктивными характеристиками. Измельчение представляет собой чрезвычайно сложный процесс, кинетика которого зависит от одновременного влияния многих факторов, таких, как пластическое и упругое деформирование частиц материала, их взаимодействие между собой и со средой, изменением прочности, конструктивными характеристиками измельчителей и др. Это обуславливает сложность задач теории измельчения, которые до настоящего времени полностью не решены. Известные соотношения Риттингера, Кика, Бонда и многие другие основаны на учете какого-либо одного из указанных параметров и весьма ограниченно применимы для описания экспериментальных данных [14].

Исследования проблем измельчения можно условно разделить на три группы [14]. Первое – исследования процесса разрушения твердых тел под действием внеш-

них ударных и сдавливающих воздействий, в какой-то мере моделирующих таковые при измельчении. Этот цикл исследований базируется на законах физики твердого тела – физики прочности и пластичности. Во вторую группу входят исследования гранулометрического состава порошков. Их целью является установление закономерностей распределения частиц по размерам в зависимости от условий измельчения. В третью группу включают исследования, посвященные непосредственно установлению взаимосвязи между одной из характеристик дисперсности порошков и затратами энергии на помол. Все три группы исследований тесно связаны между собой, но каждая из них имеет и самостоятельное значение для конструирования мельниц, отработки технологических режимов измельчения и технологии использования его продуктов.

В мельницах частицы разрушаются в результате воздействий разного рода, различных по масштабу приложений внешней силы – разлом, раздавливание, раскалывание, резание; а также скоростью нарастания напряжений – от медленного сжатия до высокоскоростного удара. Причем удар может быть приложен как к свободным частицам, движение которых в момент удара не ограничено препятствием, так и к частицам, перед ударом, покоящимся на каком-либо препятствии, полностью или частично ограничивающим возможность их перемещения после удара [14]. В каждом из названных типов воздействий для осуществления разрушения частиц затрачивается определенное количество энергии. Наиболее экономичны из них те, для которых максимальное напряженное состояние локализовано в ограниченном объеме тела. Это резание, разлом и раскалывание острым инструментом. Создать такие локализованные предельные напряжения в машинах, предназначенных для измельчения, когда размеры мельющих тел велики по сравнению с размерами частиц, весьма затруднительно.

Для теории измельчения чрезвычайно важное значение имеет критерий оценки размера частиц измельчаемого материала. Наиболее полной характеристикой дисперсности является, как известно, функция распределения частиц по размерам. Применительно к процессам измельчения и дробления такая функция будет двухпараметрической, однозначно определяемой каким-либо средним или характеристическим значением размера частиц и дисперсией распределения. Ввиду сложности учета в расчетах функции распределения часто пользуются только значением среднего и наиболее характерного размера или удельной поверхностью.

В основе ряда вариантов измельчения лежит экспериментальное соотношение между дисперсностью продуктов единичного акта разрушения отдельной частицы и энергией прилагаемых воздействий. Естественно, что средняя по статистическим данным величина такого соотношения зависит от свойств измельчаемого материала и условий разрушения [14]. Экспериментально установлено, что при прочих равных условиях разрушение сжатием выгоднее удара [14]. Размеры частиц также оказывают заметное влияние на величину этого соотношения.

Следует отметить, что в области очень малых размеров частиц, где можно ожидать заметное увеличение удельных затрат энергии на разрушение, эксперименты крайне затруднительны, и получить достаточно надежные данные о единичных частицах весьма проблематично.

Можно также полагать, что упрочнение не играет существенной роли в процессе измельчения. Действительно, частицы разрушаются последовательными процессами, то есть разрушаются осколки, предварительно многократно испытывавшие напряжения, близкие к предельным. Такие воздействия несомненно вызывают в них развитие и образование новых неоднородностей. Следовательно, в расчетах следует предусмотреть возможность разупрочнения частиц. Экспериментальных данных по этому

вопросу не имеется, а величина и знак масштабного упрочнения и в более простых случаях неоднозначны.

Подводя итог, можно констатировать, что в настоящее время известны различные соотношения, описывающие кинетику измельчения, ограниченно справедливые в узких диапазонах сравнительно больших размеров. Решения, достаточно обоснованного теоретически или экспериментально и справедливого в широком интервале дисперсности и в области очень высоких ее значений, все еще не найдено.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Исходные компоненты

Исходным компонентом для изготовления материала является глинозем марки ГН-1, содержащий до 95 %  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В качестве аксессуарных примесей в связанном состоянии содержатся оксиды железа, кремния, кальция и щелочноземельных металлов. Количество примесей – 1–2 %. Модифицирующая добавка синтезируется из: оксида цинка, каолина, основной минерал которого – каолинит ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), талька ( $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), бентонита и доломита  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Общее содержание добавки составляет 10,09 мас. %.

#### 3.2. Подготовка образцов

Опыты проводили на образцах в виде балочек размером 40х6х4 мм, цилиндров диаметром  $\varnothing = 24$ , высотой  $h = 24$  мм, и дисков  $\varnothing = 25$ ,  $h = 5$  мм. Изделия формовали методом одноосного двустороннего полусухого прессования при давлении 100 МПа. В качестве временной технологической связки использовался 5 % поливиниловый спирт (ПВС). Обжиг образцов производили в воздушной среде.

#### 3.3. Исследование закономерностей спекания

Для исследования закономерностей спекания разработанной керамики обжиг материала проводили в интервале температур 1350–1550 °С. Одновременно с этим проводили анализ линейной усадки в обжиге, средней плотности, открытой пористости и предела прочности образцов при трехточечном изгибе.

Полученные данные свидетельствуют о том, что с повышением температуры обжига наблюдается закономерный рост линейной усадки, составляющей 21,5 % при 1550 °С. У обожженных при 1550 °С изделий наблюдается полное отсутствие открытой пористости. Средняя плотность разработанного материала 3,63 г/см<sup>3</sup>. Открытую пористость ( $\Pi_0$ ), и среднюю плотность ( $\rho_{\text{ср}}$ ) определяли методом гидростатического взвешивания

$$\rho_{\text{ср}} = m_0 / (m_1 - m_2);$$

$$\Pi_0 = (m_1 - m_0) / (m_1 - m_2),$$

где  $m_0$  – масса сухого образца, [г];  $m_1$  – масса образца, насыщенного водой, [г];  $m_2$  – масса образца, взвешенного в воде, [г].

Точность определения средней плотности составляет 0,01 г/см<sup>3</sup>, открытой пористости – 0,1 %.

Материал обладает пределом прочности при трехточечном изгибе 360 МПа, который определяли на разрывной машине FM-500. Расстояние между опорами  $l$  для образцов составляло 25 мм. Расчет проводили по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = 3Pl/2bh^2,$$

где  $P$  – разрушающее усилие;  $b$  и  $h$  – ширина и высота образца, соответственно.

#### 3.4. Исследование структуры керамики

Микроструктура материала Ш-4 представлена на рис. 1, матрица слагается из зерен корунда, форма которых изменяется от изометрической до короткопризматиче-

ской, преобладающий размер зерен –  $4 \div 6$  мкм. Модифицирующие добавки образуют сетчатую структуру по периферии кристаллов корунда. Связка, цементирующая зерна корунда, составляет  $8 \div 9$  % об. Фазовый состав цементирующей связки представлен кристаллическими и стекловидной фазами, содержание которой составляет  $1 \div 1,5$  %. Стекловидная фаза однородна по составу, показатель преломления  $n = 1,530 \div 1,545$ . Добавка кристаллизуются с размером зерен –  $1 \div 2$  мкм, в кубической сингонии. Материал обладает закрытой межкристаллической пористостью, распределенной в объеме материала в виде округлых скоплений размером  $8 \div 12$  мкм. Закрытая пористость не превышает 2,0 % об.

### **3.5. Исследование износостойкости и размолоспособности**

Для установления уровня истираемости и оценки размолоспособности разработанной керамики проводились модельные эксперименты по измельчению кварцевого песка и электроплавленного корунда в шаровых мельницах. Истираемость шаров контролировали по потере их массы через каждые 10 ч от начала испытаний, одновременно оценивали удельную поверхность измельчаемого материала. Для сравнения используется промышленно применяемая керамика “Alubit-90” производства Италии, содержащая 90 мас. % оксида алюминия в своем составе, соответствующего количеству оксида алюминия в материале Ш-4. Исследования проводились с использованием цилиндрических мелющих тел из разработанной керамики с  $\varnothing = 24$  мм,  $h = 24$  мм и шарами из Alubit’a  $\varnothing 25,4$  мм.

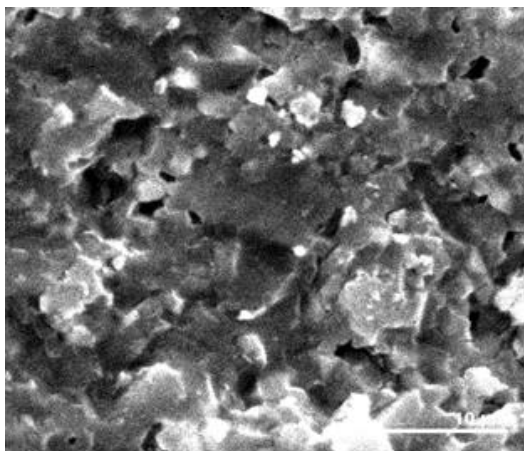


Рис. 1. Фотографии микроструктуры Ш-4. Увеличение снимка 3000х

Полученные данные свидетельствуют о том, что скорость истирания материала Ш-4 и Alubit-90 практически одинаковы и составляют  $36 \cdot 10^{-3}$  %/ч и  $35,5 \cdot 10^{-3}$  %/ч соответственно.

Динамику измельчения оценивали по изменению удельной поверхности с течением времени в модельном эксперименте по измельчению кварцевого песка и электроплавленного (рис. 2 и рис. 3). В промежутке времени от 0 до 50 ч наблюдается рост удельной поверхности с наибольшей скоростью. Далее скорость изменения удельной поверхности заметно уменьшается. Максимальной удельной поверхности при измельчении кварцевого песка ( $\sim 9400$  см<sup>2</sup>/г) удается достичь при использовании мелющих тел, изготовленных из материала Alubit-90. В эксперименте с измельчением электрокорунда достижение максимальной удельной поверхности ( $\sim 7200$  см<sup>2</sup>/г) возможно при использовании мелющих тел из разработанного материала. При измельчении одним видом мелющих тел кварцевого песка и электроплавленного корунда удельная поверхность, достигнутая на кварцевом песке, больше поверхности, полученной на электроплавленном корунде за 200 ч помола.



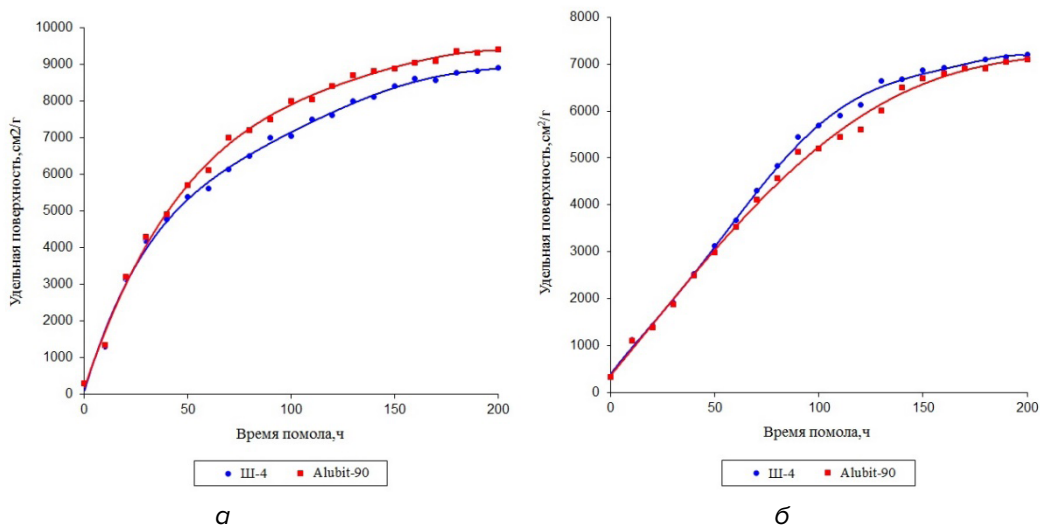


Рис. 2 Динамика измельчения кварцевого песка (а) и электрокорунда (б) мелющими телами Ш-4 и Alubit-90

#### 4. Выводы

Разработан керамический материал с температурой спекания 1550 °С., средней плотностью 3,63 г/см<sup>3</sup>; закрытой пористостью ~2 %; характеризующиеся средним пределом прочности при трехточечном изгибе 360 МПа. Проведен анализ истираемости и размолоспособности разработанного материала в модельных экспериментах по измельчению кварцевого песка и электроплавленного корунда. Доказано, что разработанный материал не уступает зарубежному аналогу. Полученные данные свидетельствуют о том, что данный материал соответствует всем необходимым требованиям и с успехом может быть применен в качестве футеровочных элементов помольных агрегатов и мелющих тел.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О проблемах получения оксидной керамики с регулируемой структурой / Е.С. Лукин [и др.]. – Огнеупоры. 1993. №5. – С. 11–15.
2. Лукин, Е.С. Прочная керамика на основе оксида алюминия и диоксида циркония / Е.С. Лукин, Н.А. Попова, Н.И. Здвижкова. – Стекло и керамика, 1993. №9–10. – С. 25–30.
3. Полуобяринов, Д.Н. Керамика из высокоогнеупорных окислов / Д.Н. Полуобяринов, Р.Я. Попильский. – М.: Металлургия, 1977. – 304 с.
4. Павлушкин, Н.М. Спеченый корунд / Н.М. Павлушкин. – М.: Стройиздат, 1961. – 210 с.
5. Балкевич, В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
6. Новая керамика. – М.: Стройиздат, 1969. – 312 с.
7. Прочная корундовая керамика с пониженной температурой спекания / Е.С. Лукин [и др.]. – Огнеупоры и техническая керамика. 1996. №10. – С. 2–5.
8. Особенности получения прочной керамики, содержащей диоксид циркония / Е.С. Лукин [и др.]. – Огнеупоры. 1991. №9. – С. 5–7.
9. Беляков, А.В. Технология конструкционной керамики / А.В. Беляков. – ВИНТИ – Итоги науки и техники. 1988. Т. 1. – С. 2–60.
10. Смирнов, В.В. Корундовая керамика с низкой температурой спекания / В.В. Смирнов, И.В. Синица. – Огнеупоры. 1994. №10. – С. 7–9.
11. Лукин, Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой / Е.С. Лукин // Часть I. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики – Огнеупоры. 1996. №1. – С. 5–14.
12. Лукин, Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой / Е.С. Лукин // Часть II. Обоснование принципов выбора добавок, влияющих на степень спекания оксидной керамики – Огнеупоры и техническая керамика. 1996. №4. – С. 2–13.

13. Керамика в чистеме  $ZrO_2-Al_2O_3$  с добавками эвтектических составов / А.А. Евтеев [и др.]. – Стекло и керамика. 2011. №8. – С. 23–27.
14. Ходаков, Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г.С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.

#### REFERENCES

1. Lukin E.S., Andrianov N.T., Mamaeva N.B. O problemah polucheniya oksidnoj keramiki s reguliruemoj strukturoj [Problems of obtaining oxide ceramics with a regulated structure] Ogneupory. 1993. №5. pp. 11 – 15. (in Russian)
2. Lukin E.S., Popova N.A., Zdvizhkova N.I. Prochnaya keramika na osnove oksida alyuminiya i dioksida cirkoniya [Strong ceramics based on aluminum oxide and zirconium dioxide] Steklo i keramika. 1993. №9–10. pp. 25–30. (in Russian)
3. Poluboyarinov D.N., Popil'skij R.YA. Keramika iz vysokoogneupornyh okislov [Ceramics from high-refractory oxides]. Moscow, Metallurgiya, 1977. 304 pp. (in Russian)
4. Pavlushkin N.M. Spechenyj korund [Sintered corundum]. Moscow, Strojizdat, 1961. 210 pp. (in Russian)
5. Balkevich V.L. Tekhnicheskaya keramika [Technical ceramics]. Moscow, Strojizdat, 1984. 256 pp. (in Russian)
6. Novaya keramika [New ceramics]. Moscow, Strojizdat, 1969. 312 pp.
7. Lukin E.S., Ayadi M.B., Popova N.A. Prochnaya korundovaya keramika s ponizhennoj temperaturoj spekaniya [Strong corundum ceramics with reduced sintering temperature]. Ogneupory i tekhnicheskaya keramika. 1996. №10. pp. 2–5. (in Russian)
8. Lukin E.S., Popova N.A., Zdvizhkova N.I. Osobennosti polucheniya prochnoj keramiki, sodержashchej dioksid cirkoniya [Features of obtaining a strong ceramic containing zirconia]. Ogneupory. 1991. №9. pp. 5–7. (in Russian)
9. Belyakov A.V. Tekhnologiya konstrukcionnoj keramiki [Technology of structural ceramics]. VINITI – Itogi nauki i tekhniki. 1988. T. 1. pp. 2–60. (in Russian)
10. Smirnov V.V., Sinica I.V. Korundovaya keramika s nizkoj temperaturoj spekaniya [Corundum ceramics with low sintering temperature]. Ogneupory. 1994. №10. pp. 7–9. (in Russian)
11. Lukin E.S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoj mikrostrukturoj [Modern high-density oxide ceramics with a controlled microstructure]. CHast' I. Vliyanie agregacii poroshkov oksidov na spekanie i mikrostrukturu keramiki – Ogneupory. 1996. №1. pp. 5–14. (in Russian)
12. Lukin E. S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksidnaya keramika s reguliruemoj mikrostrukturoj [Modern high-density oxide ceramics with a controlled microstructure]. CHast' II. Obosnovanie principov vybora dobavok, vliyayushchih na stepen' spekaniya oksidnoj keramiki – Ogneupory i tekhnicheskaya keramika. 1996. №4. pp. 2–13. (in Russian)
13. Evteev A.A., Lemeshev D.O., Zhitnyuk S.V., Makarov N.A. Keramika v chisteme  $ZrO_2-Al_2O_3$ s dobavkami evtekticheskikh sostavov [Ceramics in the  $ZrO_2-Al_2O_3$  system with additives of eutectic compositions]. Steklo i keramika. 2011. №8. pp. 23–27. (in Russian)
14. Hodakov G.S. Tonkoe izmel'chenie stroitel'nyh materialov [Fine grinding of building materials]. Moscow, Strojizdat, 1972. 240 pp. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 03.05.18*