

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

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

УДК 666.3-127:549.517.1]:666.368

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ФАРФОРА НА СВОЙСТВА ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОПЛАВЛЕННОГО КОРУНДА

Получена пористая проницаемая керамика из электроплавленного корунда (ЭПК) дисперсностью около 0,5 мм с добавкой фарфора. Изучены составы с различным соотношением ЭПК / фарфор: 99/1, 97/3, 95/5, 93/7 и 90/10. Образцы в виде балочек размерами 40×7×6,5 мм получали одноосным полусухим прессованием под давлением 25 и 50 МПа и обжигали при 1350 и 1450 °С. Открытая пористость образцов изменялась от 22 до 33 %, а предел прочности при изгибе от 1,1 до 9,3 МПа. Пористая керамика перспективна для фильтров и подложек керамических мембран.

Ключевые слова: пористая керамика, электроплавленный корунд (ЭПК), фарфор, фильтрующие элементы.

ВВЕДЕНИЕ

Пористую керамику все шире применяют для фильтрования, теплоизоляции и теплозащиты. При фильтровании важнейшими параметрами являются пористая структура и связанные с ней свойства — размеры пор, распределение пор по размерам, средний диаметр капилляров, проницаемость, удельная поверхность. Возрастающий интерес к пористым керамическим материалам объясняется их способностью работать при высоких температурах, в агрессивных и абразивных средах. Эти материалы можно использовать для фильтрования различных жидкостей (жидких растворов в различных растворителях практически при любых рН среды и расплавов, включая металлы, полимеры, соли), а также газов [1–4].

В статье [5]^{*1} приведено исследование влияния соотношения двух фракций (2–3 и 0,5 мм) электроплавленного корунда (ЭПК) с постоянным содержанием фарфоровой связки из массы ПФЛ-1 (5 %^{*2}) на свойства пористой керамики. Образцы прессовали под давлением 25, 50 и 100 МПа, а затем обжигали при 1350 и 1450 °С. Цель данной работы — получение пористой прони-

цаемой керамики на основе ЭПК со связкой из фарфора и исследование свойств керамики в зависимости от содержания связки. Для использования в качестве фильтрующего элемента особенно подходящей является пористая керамика с узким распределением пор по размерам и средним размером пор 4–6 мкм [6].

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве наполнителя применяли ЭПК F20 (~0,5 мм), в качестве связки — порошок фарфоровой массы (гжельская фарфоровая масса марки ПФЛ-1 (ПФЛ — полуфарфор литейный [7])). Химический состав ПФЛ-1, %: SiO₂ 67,0, Al₂O₃ 21,8, Fe₂O₃ 0,47, TiO₂ 0,5, CaO 0,45, MgO 0,3, K₂O 1,7, Na₂O 0,9; потери при прокаливании 6,8 %. По сравнению с ЭПК размер частиц в массе намного меньше, остаток на сите с размером ячейки 63 мкм не более 2,0 %. Общая усадка после сушки и обжига не более 13,0 %. Рекомендуемая температура обжига 1200–1220 °С.

Высушенную фарфоровую массу (далее фарфор) смешивали с ЭПК сухим способом в корундовом барабане с корундовыми мелющими телами в течение 3 ч, соотношение мелющие шары : материал = 1 : 1. Были приготовлены составы с добавками к порошку ЭПК фарфора в количестве 1, 3, 5, 7 и 10 %. После смешивания и введения временной технологической связки получали порошковую формовочную массу. В качестве временной технологической связки применяли 5 %-ный водный раствор поливинилового спирта (ПВС); связку вводили в количестве 7 % от массы шихты. Раствор ПВС добавляли небольшими порциями к сухой смеси компонентов при непрерывном перемешивании. Увлажненную

^{*1} В статье имеются опечатки. Фарфоровая масса не ЛТ, а ПФЛ-1. Значения прочности при изгибе приведены в кг/см², а написано МПа, т. е. в 10 раз больше.

^{*2} Здесь и далее указаны мас. %.



А. В. Беляков
E-mail: av_bel@bk.ru

тщательно перемешанную массу подвергали дополнительной гомогенизации, протирая через сито № 3. Из полученных формовочных масс прессовали образцы в виде балочек размерами 40×7×6,5 мм. Образцы сушили при 80 °С в те-

чение 24 ч, а затем обжигали на воздухе в печи с нагревателями из хромита лантана. Образцы нагревали до 700 °С со скоростью 2 °С/мин, затем делали выдержку в течение 30 мин, далее с такой же скоростью нагревали до конечной температуры (1350 или 1450 °С) и выдерживали 2 ч. У спеченных образцов определяли открытую пористость, плотность и прочность при 3-точечном изгибе по известным методикам [8].

Результаты определения открытой пористости $P_{отк}$ образцов, отпрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1350 °С, показаны на рис. 1, а. С увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $P_{отк}$ уменьшалась от 33 до 22 % (для 25 МПа) и от 31 до 21 % (для 50 МПа). Следует отметить, что при повышении содержания фарфора в формовочной массе от 1 до 5 % $P_{отк}$ уменьшалась меньше — от 33 до 30 % (для 25 МПа) и от 31 до 29 % (для 50 МПа), чем при увеличении содержания фарфора от 5 до 10 % — от 30 до 22 % (для 25 МПа) и от 29 до 21 % (для 50 МПа). Причем особенно значительно $P_{отк}$ образцов уменьшалась при содержании добавки в интервале от 5 до 7 %.

Результаты определения средней плотности $\rho_{ср}$ образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1350 °С, показаны на рис. 2, а. С увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $\rho_{ср}$ увеличивалась от 2,59 до 2,91 г/см³ (для 25 МПа) и от 2,65 до 2,91 г/см³ (для 50 МПа). Как и при изменении пористости, при повышении содержания фарфора в массе от 1 до 5 % $\rho_{ср}$ повышалась меньше — от 2,59 до 2,67 г/см³ (для 25 МПа) и от 2,65 до 2,74 г/см³ (для 50 МПа), чем при увеличении содержания добавки фарфора от 5 до 10 % (от 2,67 до 2,91 г/см³ (для 25 МПа) и от 2,74 до 2,91 г/см³ (для 50 МПа)). Причем при давлении прессования 25 МПа повышение $\rho_{ср}$ при увеличении содержания добавки от 5 до 10 % более значительно, особенно в интервале от 5 до 7 %, что подтверждается и изменением $P_{отк}$.

Результаты определения предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1350 °С, показаны на рис. 3, а. С увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $\sigma_{изг}$ образцов увеличивался от 1,1 до 4,5 МПа (для 25 МПа) и от 3,4 до 9,3 МПа (для 50 МПа). У образцов, спрессованных под давлением 25 МПа, увеличение содержания фарфора до 5 % приводило к росту $\sigma_{изг}$ от 1,1 до 3,5 МПа (т. е. в ~ 3,2 раза), а при увеличении от 5 до 10 % $\sigma_{изг}$ возрос от 3,5 до 4,5 (т. е. в ~ 1,3 раза). У образцов, спрессованных при 50 МПа, увеличение содержания фарфора до 5 % приводило к росту $\sigma_{изг}$ от 3,4 до 6,6 МПа (т. е. в ~ 1,9 раза), а от 5 до 10 % — к росту $\sigma_{изг}$ от 6,6 до 9,3 МПа (т. е. в ~ 1,4 раза). Изменение $\sigma_{изг}$ с увеличением содержания фарфора от 1 до 5 % и от 5 до 10 % было намного значительнее, чем изменения $\rho_{ср}$ и $P_{отк}$.

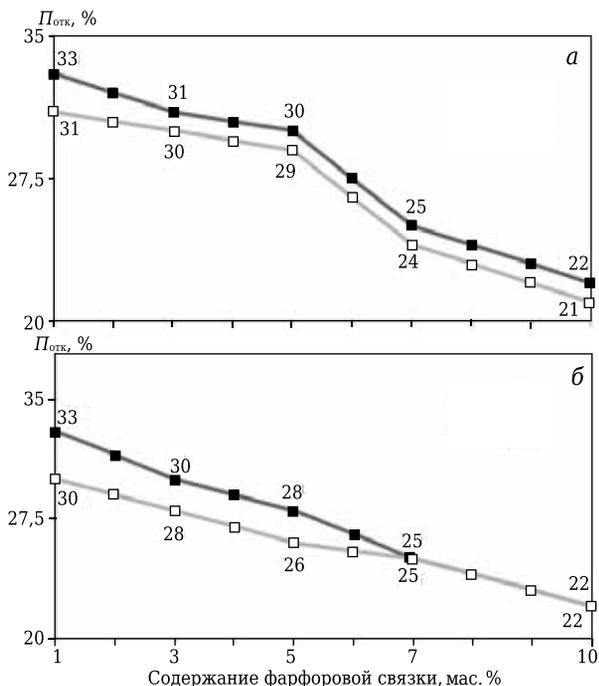


Рис. 1. Влияние добавки фарфора к порошку ЭПК на открытую пористость $P_{отк}$ образцов, спрессованных под давлением 25 (■) и 50 МПа (□): а — обжиг при 1350 °С, 2 ч; б — обжиг при 1450 °С, 2 ч

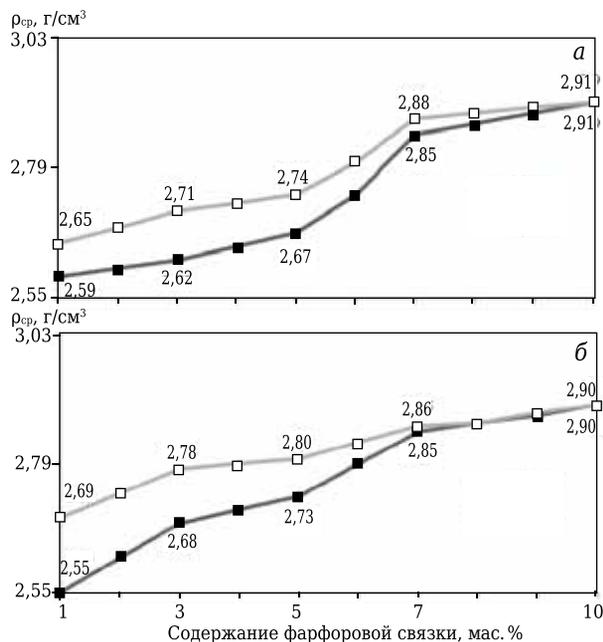


Рис. 2. Влияние добавки фарфора к порошку ЭПК на среднюю плотность $\rho_{ср}$ пористых образцов, спрессованных под давлением 25 (■) и 50 МПа (□): а — обжиг при 1350 °С, 2 ч; б — обжиг при 1450 °С, 2 ч

Увеличение давления прессования образцов от 25 до 50 МПа сильно повышало $\sigma_{изг}$. При этом $\sigma_{изг}$ возрос значительно больше при содержании фарфора 1 %, чем при его содержании 10 %. В первом случае $\sigma_{изг}$ увеличился примерно в 3,1 раза (от 1,1 до 3,4 МПа), во втором — в 2,1 раза (от 4,5 до 9,3 МПа). При повышении содержания фарфора от 1 до 7 % $\sigma_{изг}$ возрос быстрее, чем в интервале содержания добавки от 7 до 10 %.

Результаты определения $P_{отк}$ образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1450 °С, показаны на рис. 1, б. С увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $P_{отк}$ образцов уменьшилась от 33 до 22 % (для 25 МПа) и от 30 до 22 % (для 50 МПа). В образцах, спрессованных под давлением 50 МПа, зависимость близка к линейной. При повышении содержания фарфора от 1 до 5 % $P_{отк}$ уменьшилась от 33 до 28 % (для 25 МПа) и от 30 до 26 % (для 50 МПа), а при увеличении содержания фарфора от 5 до 10 % — от 28 до 22 % (для 25 МПа) и от 26 до 22 % (для 50 МПа). Однако эти закономерности выражены значительно слабее, чем после обжига при 1350 °С. После содержания фарфора 5 % влияние давления прессования на $P_{отк}$ начинало уменьшаться, и при содержании фарфора 7 и 10 % давление прессования не влияло на $P_{отк}$ образцов. Значения $P_{отк}$ (22 %) при содержании фарфора 10 % у образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1350 и 1450 °С, совпали.

Результаты определения $\rho_{ср}$ образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1450 °С, показаны на рис. 2, б. С увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $\rho_{ср}$ увеличивалась от 2,55 до 2,9 г/см³ (для 25 МПа) и от 2,69 до 2,9 г/см³ (для 50 МПа). Как и для $P_{отк}$, при содержании фарфора более 5 % влияние давления прессования на $\rho_{ср}$ начинало уменьшаться, и при содержании фарфора 7 и 10 % оно не влияло на $\rho_{ср}$ образцов. Как и для $P_{отк}$, эти закономерности выражены значительно слабее, чем после обжига при 1350 °С. Значения $\rho_{ср}$ при содержании фарфора 10 % у образцов, спрессованных при 25 и 50 МПа и обожженных при 1350 и 1450 °С, практически совпали (2,91–2,90 г/см³).

Результаты определения $\sigma_{изг}$ образцов, спрессованных под давлением 25 и 50 МПа и обожженных при 1450 °С, показаны на рис. 3, б. Как и после обжига при 1350 °С, с увеличением содержания добавки фарфора от 1 до 10 % $\sigma_{изг}$ увеличивался от 1,5 до 5,4 МПа (для 25 МПа) и от 4,1 до 9,8 МПа (для 50 МПа). У образцов, отпрессованных под давлением 25 МПа, увеличение содержания фарфора до 5 % приводило к росту $\sigma_{изг}$ от 1,5 до 3,7 МПа (т. е. в ~ 2,5 раза), а от 5 до 10 % — к росту $\sigma_{изг}$ от 3,7 до 5,4 МПа (т. е. в ~ 1,5 раза). У образцов, спрессованных под давлением 50 МПа, уве-

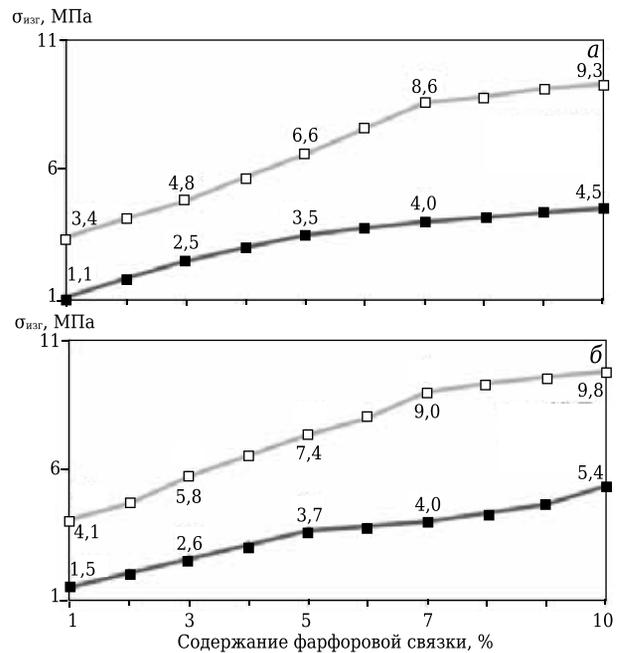


Рис. 3. Влияние добавки фарфора к порошку ЭПК на предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ образцов, спрессованных под давлением 25 (■) и 50 МПа (□): а — обжиг при 1350 °С, 2 ч; б — обжиг при 1450 °С, 2 ч

личение содержания фарфора до 5 % приводило к росту $\sigma_{изг}$ от 4,1 до 7,4 МПа (т. е. в ~ 1,8 раза), а от 5 до 10 % — к росту $\sigma_{изг}$ от 7,4 до 9,8 МПа (т. е. в ~ 1,3 раза). Как и после обжига при 1350 °С, изменение $\sigma_{изг}$ с увеличением содержания фарфора от 1 до 5 % и от 5 до 10 % намного значительнее, чем изменение $\rho_{ср}$ и $P_{отк}$ образцов.

Повышение давления прессования образцов от 25 до 50 МПа сильно повышало $\sigma_{изг}$. При этом $\sigma_{изг}$ увеличивался значительно больше при содержании фарфора 1 %, чем при его содержании 10 %. В первом случае он возрос примерно в 2,7 раза (от 1,5 до 4,1 МПа), во втором — примерно в 1,8 раза (от 5,4 до 9,8 МПа). Повышение температуры обжига от 1350 до 1450 °С привело к росту $\sigma_{изг}$ образцов. У образцов с 1 % фарфора, спрессованных под давлением 25 МПа, $\sigma_{изг}$ повысился от 1,1 до 1,5 МПа (в ~ 1,4 раза), а у образцов с 10 % фарфора — от 4,5 до 5,4 МПа (в 1,2 раза). У образцов с 1 % фарфора, отпрессованных под давлением 50 МПа, $\sigma_{изг}$ возрос от 3,4 до 4,1 МПа (в 1,2 раза), а у образцов с 10 % фарфора — от 9,3 до 9,8 МПа (в ~ 1,1 раза). Повышение температуры обжига от 1350 до 1450 °С сильнее сказывается на увеличении $\sigma_{изг}$ образцов, содержащих небольшое количество фарфоровой связки (1 %) и отпрессованных под более низким давлением прессования (25 МПа).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С повышением прилагаемого давления каркас уплотняется и упрочняется, защищая не вхо-

дающие в него области от уплотнения. Эволюция структуры каркаса происходит таким образом, чтобы максимально передать энергию в окружающую среду (стенки пресс-формы). Структуры, позволяющие открытым системам эффективно передавать энергию в окружающую среду, называют диссипативными. Энергию, которую заготовка не сможет передать в окружающую среду, открытая система (заготовка) будет вынуждена запастись внутри себя путем создания аккумулирующих структур [9–11]. Чаще всего это различные виды дефектов от точечных дефектов структуры и нано- до макропор и трещин. Образующийся при формовании заготовки каркас является диссипативной структурой, а более пористые области, располагающиеся между локальными уплотнениями, можно отнести к аккумулирующим структурам. Это деление достаточно условно, поскольку в зависимости от складывающихся условий диссипативные структуры могут играть роль аккумулирующих и наоборот [9].

Каркас образуют наиболее плотные и прочные области заготовки. Структура каркаса определяется силами трения между частицами формируемой массы (внутреннее трение) и частицами и стенками формы (внешнее трение). При формовании заготовок методом сухого прессования роль внешнего трения очень существенна. Именно каркас сформированной заготовки и его эволюция в течение сушки и спекания вносят основной вклад в прочностные свойства и заготовки, и спеченного керамического изделия. Площадь сечения каркаса меньше, чем площадь сечения прессуемого образца, поэтому давление прессования на материал, входящий в каркас, будет больше, чем рассчитанное на все сечение образца.

Фарфоровая связка содержит более мелкие частицы порошка (не менее 98 % <0,63 мкм), чем наполнитель из ЭПК (~0,5 мм). Увеличение содержания мелких частиц будет увеличивать внешнее и внутреннее трение, способствующее образованию каркаса. В то же время фарфор содержит глинистые компоненты, которые вместе с временной технологической связкой (ПВС) повышают пластичность и понижают трение. Это будет несколько увеличивать деформацию каркаса и площадь сечения входящих в него областей, что приведет к уменьшению давления прессования на материал каркаса. Повышение содержания фарфора способствует выдавливанию частиц фарфора из каркаса в прилегающие менее плотные области. Поэтому при высоком содержании добавки фарфора влияние увеличения количества связки на прочность уменьшается. Этим можно объяснить, что масса с 1 % фарфора оказывается значительно более чувствительной к повышению давления прессования, чем масса с 10 % фарфора. Повышение

давления от 25 до 50 МПа (обжиг при 1350 °С) приводит к росту $\sigma_{изг}$ образцов с 1 % фарфора примерно в 3,1 (от 1,1 до 3,4 МПа), а образцов с 10 % фарфора — примерно в 2,1 (от 4,5 до 9,3 МПа) раза, хотя абсолютное значение $\sigma_{изг}$ образцов с 10 % фарфора значительно выше. Давление прессования является важнейшим фактором, влияющим на формирование структуры каркаса. Повышение температуры обжига от 1350 до 1450 °С приводит к некоторому перераспределению жидких компонентов фарфора и диффузионному массопереносу между каркасом и прилегающими к нему областями. Тем не менее образующаяся при прессовании образцов структура каркаса (под давлением прессования) оказывает определяющее влияние на их прочностные свойства.

Прочность спеченных образцов не очень высока. Причиной этого может быть различие ТКЛР фарфора ($4 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) и корунда ($8 \cdot 10^{-6}$ – $8,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Возникающие при охлаждении спеченных образцов напряжения на границе корунд – фарфор могут приводить к образованию на границе частиц ЭПК напряжений и микротрещин, понижающих прочность керамики. При давлении прессования 50 МПа $\sigma_{изг}$ образцов с 10 % фарфора с повышением температуры обжига возрос лишь от 9,3 до 9,8 МПа (примерно в 1,1 раза). При давлении прессования 25 МПа $\sigma_{изг}$ образцов с 10 % фарфора с повышением температуры обжига также возрос незначительно — от 4,5 до 5,4 МПа (в 1,2 раза). Это подтверждает определяющую роль повышения давления прессования от 25 до 50 МПа на структуру и прочность каркаса.

При уменьшении количества фарфоровой связки влияние температуры спекания усиливалось, хотя и в меньшей степени, чем давления прессования. У образцов с 1 % фарфора, спрессованных под давлением 25 МПа, $\sigma_{изг}$ возрос от 1,1 до 1,5 МПа (примерно в 1,4 раза), а у образцов, спрессованных под давлением 50 МПа, от 3,4 до 4,1 МПа (в 1,2 раза). Появление жидкой фазы при спекании значительно облегчает перемещение компонентов фарфора. Часть этих компонентов может переместиться из каркаса в окружающие более пористые области. В то же время хорошее смачивание оксидов силикатными расплавами может приводить и к втягиванию расплава в мелкие поры каркаса.

Если в прочность материала основной вклад вносит каркас, то в пористость — области, располагающиеся в пустотах каркаса. При увеличении давления прессования в областях, образующих каркас, плотность возрастает, а пористость уменьшается. В областях, не входящих в каркас, эти процессы происходят значительно менее интенсивно, поскольку их защищает каркас. Именно эти области вносят основной вклад в пористость керамических образцов.

При увеличении содержания фарфора пористость начинает уменьшаться. В процессе прессования фарфоровая связка может перераспределяться и выдавливаться из каркаса в окружающие его области. Этому способствуют присутствие ПВС и глинистых компонентов фарфора, а препятствуют силы трения. После обжига образцов при 1350 °С повышение содержания фарфора в формовочной массе от 1 до 5 % меньше снижает $P_{отк}$ — от 33 до 30 % (для 25 МПа) и от 31 до 29 % (для 50 МПа), чем при увеличении содержания фарфора от 5 до 10 % — от 30 до 22 % (для 25 МПа) и от 29 до 21 % (для 50 МПа). После обжига образцов при 1450 °С увеличение количества жидкой фазы приводит к тому, что эта закономерность слабо просматривается лишь у образцов, спрессованных под давлением 25 МПа. Перераспределение жидкой фазы между каркасом и не входящими в него областями выравнивает структуру керамики. Это позволяет объяснить тот факт, что после обжига при 1450 °С $P_{отк}$ образцов с 7 и 10 % фарфора не зависела от повышения давления прессования от 25 до 50 МПа. При увеличении содержания фарфора в формовочной массе от 1 до 5 % $P_{отк}$ уменьшалась от 33 до 28 %, а при увеличении от 5 до 10 % — от 28 до 22 %. У образцов, спрес-

сованных под давлением 50 МПа, зависимость уменьшения $P_{отк}$ от содержания фарфора приближается к линейной.

Анализ результатов показывает, что давление прессования способствует формированию каркаса, обеспечивающего прочность образцов после спекания. Области, не входящие в каркас, вносят основной вклад в пористость керамики. Увеличение количества фарфора меняет структуру каркаса и окружающих его областей. Присутствие ПВС и глинистых компонентов способствует при прессовании перераспределению компонентов фарфора между каркасом и окружающими его областями. При спекании жидкая фаза (ее количество и свойства) также способствует процессам перераспределения компонентов фарфора. Это изменяет структуру керамики и уменьшает влияние давления прессования на пористость и среднюю плотность керамики.

Наиболее приемлемые результаты по пористости и прочности были получены при добавке к порошку ЭПК 5 % фарфора. При этом пористость образцов уменьшалась незначительно, а прочность повышалась заметно. Образцы, спрессованные под давлением 50 МПа и обожженные при 1350 °С, имели $P_{отк}$ 28 % и $\sigma_{изг}$ 6,6 МПа.

Библиографический список

1. **Гузман, И. Я.** Высокоогнеупорная пористая керамика / И. Я. Гузман. — М. : Металлургия, 1971. — 283 с.
2. **Беркман, А. С.** Пористая проницаемая керамика / А. С. Беркман. — М. : Стройиздат, 1969. — 170 с.
3. **Rice, R. W.** Porosity of ceramics / R. W. Rice. — New York : Marcel Dekker, Inc., 1998. — 539 p.
4. **Андрианов, Н. Т.** Химическая технология керамики: уч. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.]. — М. : Стройматериалы, 2011. — 496 с.
5. **Беляков, А. В.** Регулирование открытой пористости и прочности варьированием зернового состава в керамике на основе электроплавленного корунда с фарфоровой связкой / А. В. Беляков, Зо Е Мо У, Н. А. Попова, Йе Аунг Мин, Чжо Лвин У // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 34–37.
6. **Belyakov, A. V.** Varying the granulometric composition of an electrofused-corundum-based ceramic with a porcelain binder to control its open porosity and strength / A. V. Belyakov, Zaw Ye Maw Oo, N. A. Popova, Ye Aung Min, Kyaw Lwin Oo // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 77–80.
7. **Bruno, G.** Thermal and mechanical response of industrial porous ceramics / G. Bruno, I. Pozdnyakova, A. M. Efremov [et al.] // Mater. Sci. Forum. — 2010. — Vol. 652. — P. 191–196.
7. Официальный сайт. Производственно-торговая фирма «Керамика Гжели». — <http://ceramgzhel.ru/poleznaya-infor/markirovka-keramicheskix.html>

8. **Андрианов, Н. Т.** Практикум по химической технологии керамики : уч. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.] ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : Стройматериалы, 2005. — 336 с.
9. **Беляков, А. В.** Эволюция структуры в пределах технологии керамики / А. В. Беляков, В. С. Бакунов // Новые огнеупоры. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
10. **Belyakov, A. V.** Structural evolution in ceramic technology and processing / A. V. Belyakov, V. S. Bakunov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, № 1. — P. 48–52.
10. **Беляков, А. В.** Эволюция структуры в пределах технологии керамики / А. В. Беляков, В. С. Бакунов // Новые огнеупоры. — 2006. — № 2. — С. 55–62.
11. **Belyakov, A. V.** Structural evolution in ceramic technology and processing / A. V. Belyakov, V. S. Bakunov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, № 2. — P. 110–115.
11. **Беляков, А. В.** Синергетический и квазихимический подходы в технологии керамики / А. В. Беляков // Стекло и керамика. — 2003. — № 9. — С. 21–27.
12. **Belyakov, A. V.** Synergetic and Quasichemical Approaches in Ceramic Technology (A Review) / A. V. Belyakov // Glass and Ceramics. — 2003. — Vol. 60, № 9/10. — P. 274–279. ■

Получено 14.07.16

© А. В. Беляков, Зо Е Мо У, Н. А. Попова, Йе Аунг Мин, 2016 г.