

*Канд. техн. наук В. В. Мартыненко,
д-р техн. наук В. В. Примаченко, канд. техн. наук К. И. Куценко,
канд. техн. наук Ю. А. Крахмаль,
канд. техн. наук Ю. Е. Мишинева
(АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного», г. Харьков, Украина)*

Исследование влияния температуры и режима термообработки на свойства корундовой керамики, изготавливаемой шликерным литьем из реактивного глинозема

Введение

Изделия из особоплотной корундовой керамики нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1—4]. В АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного» также разработана и внедрена технология высокоогнеупорной корундовой особоплотной керамики [1, 5—14], в том числе с применением реактивного глинозема [8—15]. Корундовую керамику в зависимости от формы и размеров изготавливают различными методами формования, в том числе шликерным литьем, для чего используют различные составы глиноземистых шликеров.

Известно, что структура и свойства корундовой керамики во многом зависят от температуры ее обжига, времени выдержки при конечной температуре, теплового агрегата, одностадийного либо многостадийного обжига и ряда иных факторов [1]. Поэтому с целью доработки технологии корундовой керамики методом шликерного литья в гипсовые формы проведение исследований влияния температуры и режима термообработки на свойства корундовой керамики является актуальным и представляет научный и практический интерес.

Экспериментальная часть

Для проведения исследований в качестве основного сырьевого компонента использовали реактивный глинозем с удельной поверхностью 6—10 м²/г, насыпной плотностью 900 кг/м³ (последнюю определяли по ГОСТ 27801—93). Химический состав реактивного глинозема определяли спектральным методом

по ГОСТ 23201.0—78 — ГОСТ 23201.2—78, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав глинозема

Наименование материала	Массовая доля, %					
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Δm _{прк}
Реактивный глинозем	99,62	0,06	0,02	0,06	0,06	0,18

Фазовый состав и структуру реактивного глинозема определяли петрографическим с применением микроскопа МИН-8 и электронномикроскопическим с использованием электронного микроскопа просвечивающего типа ЭМВ-100 А методами анализа, которые показали, что глинозем состоит из мелкодисперсных частиц α-Al₂O₃ разнообразной морфологии и дисперсности, с преимущественным размером частиц ~ 0,2—1,5 мкм.

Для проведения исследований готовили шликеры влажностью 30 % для изготовления тонкостенных изделий сливным способом (состав 1 с диспергирующей и упрочняющей добавками) и влажностью 20 % для изготовления толстостенных изделий наливным способом (состав 2 только с диспергирующей добавкой) путем добавления к дистиллированной воде глинозема. В качестве диспергирующей добавки использовали добавку на основе карбоновой кислоты — жидкость желтого цвета с pH = 7 и плотностью 1,20 г/см³, а в качестве упрочняющей добавки — водный дисперсный полимер, который представляет собой жидкость белого цвета с pH = 7, вязкостью при 20 °С — 20 мПа·с и плотностью 1,07 г/см³.

Из шликеров составов 1 и 2 методом шликерного литья в гипсовые формы изготавливали образцы в виде цилиндров диаметром и высотой 36 мм и балочек размером 25×25×150 мм. Образцы сушили при комнатной температуре (18—20 °С) в течение 1—2 суток, затем при температуре 110 °С — до постоянного веса. Термообработку образцов проводили в интервале температур 200—1580 °С, причем всех образцов (и цилиндров и балочек) при температурах 200, 400, 600, 800, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350, 1400 и 1450 °С — в лабораторной электрической печи с карбидкремниевыми нагревателями, а цилиндров (без балочек) при 1580 °С — в лабораторной электрической криптоловой печи и в промышленной газопламенной печи периодического действия опытного производства АО «УкрНИИО имени А. С. Бережного». В лабораторных электрических печах подъем

температуры до заданной в интервале 200—1450 °С был произвольным, а до 1580 °С — за 5 ч, при этом выдержка при заданной максимальной температуре в лабораторных печах составила 2 ч. Подъем температуры в промышленной печи периодического действия составил 78 ч, а выдержка при максимальной — 8 ч. После термообработки при 200 °С часть образцов (по 5 штук цилиндров и балочек) отбирали для определения их свойств, другую часть термообработывали при последующей температуре (400 °С) совместно с сырцом (по 5 цилиндров и балочек). Последние 5 цилиндров и 5 балочек также отбирали для определения их свойств после термообработки при 400 °С. Подобную термообработку образцов проводили при каждой последующей температуре (600, 800 °С и т. д.), то есть при заданной температуре в лабораторных электрических печах одновременно термообработывали предварительно термообработанные при всех более низких температурах образцы (длительная многостадийная термообработка, при которой образцы, окончательно термообработанные при 1580 °С, прошли, как отмечено выше, последовательно термообработку при 200, 400, 600, 800, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350, 1400 и 1450 °С) и сырец (кратковременная одностадийная термообработка). Режим термообработки в промышленной периодической печи — длительный одностадийный.

Кажущуюся плотность ($\rho_{\text{каж}}$) и открытую пористость ($P_{\text{откр.}}$) образцов после термообработки определяли в соответствии с ГОСТ 2409—95; изменение линейных размеров образцов при термообработке (усадка) определяли как отношение разницы линейных размеров образцов до и после термообработки к их линейным размерам до термообработки ($\Delta l/l$); предел прочности при сжатии ($\sigma_{\text{сж}}$) образцов ввиду их высоких значений определяли после их термообработки при 200, 400, 600, 800, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350, 1400, 1450 °С по ГОСТ 4071.1—94; предел прочности при изгибе ($\sigma_{\text{изг}}$) ввиду ограниченного пространства криптоловой печи и невозможности термообработки в ней балочек с вышеуказанными размерами определяли также после термообработки при 200, 400, 600, 800, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350, 1400, 1450 °С по МИ 322-49-2012. Сущность указанной методики заключается в том, что испытуемый образец — балочка помещается в нагружающее устройство для трехточечного изгиба и нагружается при постоянной скорости нагружения до разрушения образца.

Результаты и их обсуждение

Зависимости кажущейся плотности, открытой пористости, изменения линейных размеров, предела прочности при сжатии и предела прочности при изгибе образцов корундовой керамики обоих составов после одностадийной и многостадийной термообработки в лабораторных электрических печах от температуры приведены на рис. 1—5.

Из рис. 1, 2 и 3 видно, что кажущаяся плотность и изменение линейных размеров (усадка) всех образцов обоих составов (1 и 2) как при одностадийном, так и при многостадийном режимах термообработки в интервале температур 200—1200 °С плавно, практически прямолинейно, незначительно увеличиваются,

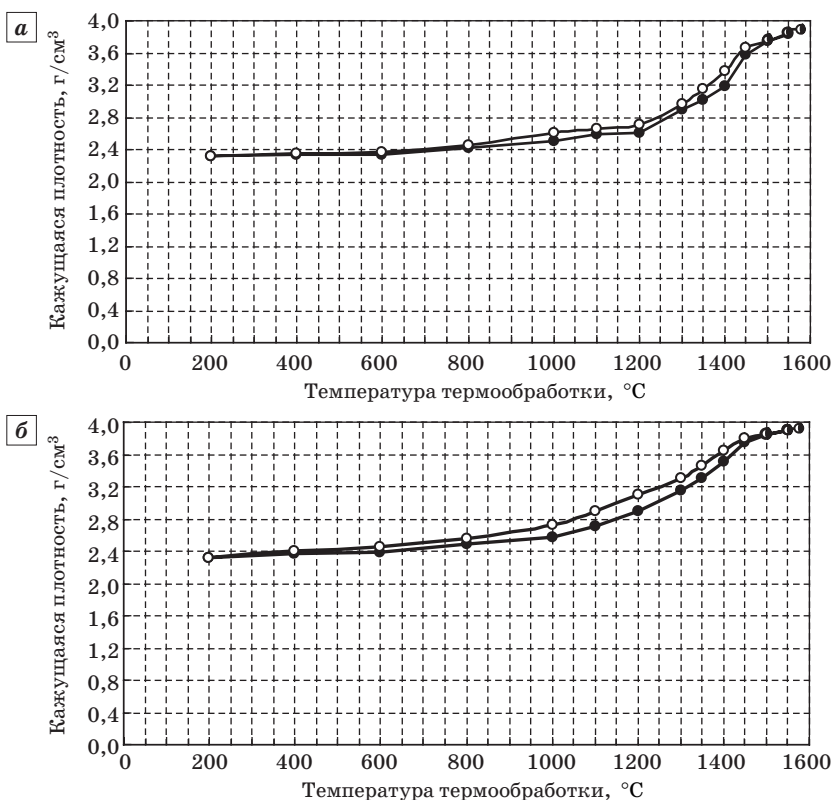


Рис. 1. Зависимость кажущейся плотности образцов корундовой керамики от температуры при одностадийной (а) и многостадийной (б) термообработке в лабораторных электрических печах, где: ○ — состав 1, ● — состав 2

а пористость открытая соответственно плавно, практически прямолинейно, незначительно уменьшается.

При одностадийном режиме кажущаяся плотность увеличивается с 2,31 и 2,32 г/см³ до 2,71 и 2,61 г/см³ (на 0,40 и 0,29 г/см³), линейная усадка увеличивается с 0,2 и 0,1 % до 3,9 и 3,1 % (на 3,7 и 3,0 абс. %), открытая пористость уменьшается с 41,5 и 43,0 % до 31,4 и 34,1 % (на 7,1 и 8,9 абс. %); при многостадийном режиме указанные свойства изменяются несколько более интенсивно, чем при одностадийном режиме — кажущаяся плотность увеличивается с 2,31 и 2,32 г/см³ до 3,1 и 2,9 г/см³ (на 0,79 и 0,58 г/см³), линейная усадка увеличивается с 0,2 и 0,1 % до 4,2 и 3,4 % (на 4,0 и 3,3 абс. %), открытая пористость уменьшается с 39,0 и 41,0 % до 28,0 и 30,5 % (на 11,0 и 10,5 абс. %).

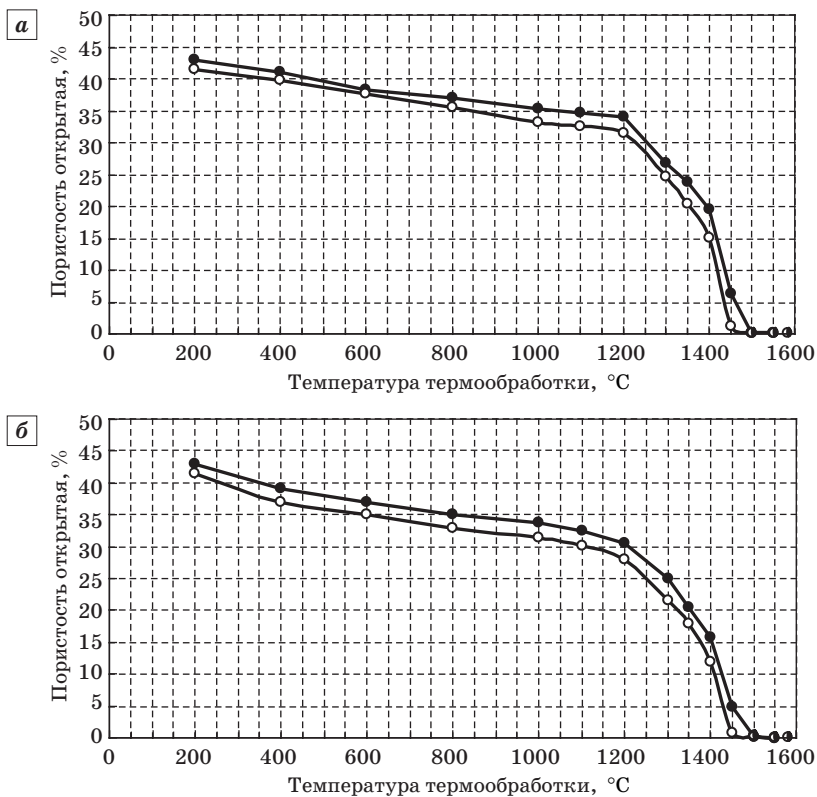


Рис. 2. Зависимость пористости открытой образцов корундовой керамики от температуры при одностадийной (а) и многостадийной (б) термообработке в лабораторных электрических печах, где: ○ — состав 1, ● — состав 2

При температуре $\sim 1100\text{--}1200^\circ\text{C}$ начинается резкое увеличение кажущейся плотности и линейной усадки и соответствующее уменьшение открытой пористости, и это протекает практически прямолинейно до температуры $\sim 1450^\circ\text{C}$: при одностадийном режиме кажущаяся плотность увеличивается с $2,71$ и $2,61\text{ г/см}^3$ до $3,68$ и $3,59\text{ г/см}^3$ (на $0,97$ и $0,88\text{ г/см}^3$), линейная усадка увеличивается с $3,9$ и $3,1\%$ до $13,9$ и $12,6\%$ (на $10,8$ и $9,3\%$ абс. %), пористость открытая уменьшается с $31,4$ и $34,1\%$ до $1,3$ и $6,3\%$ (на $30,1$ и $27,8\%$ абс. %); при многостадийном режиме в указанном температурном интервале ($\sim 1100, 1200, 1300, 1350, 1400, \sim 1450^\circ\text{C}$) свойства изменяются уже менее интенсивно, чем при одностадийном режиме — кажущаяся

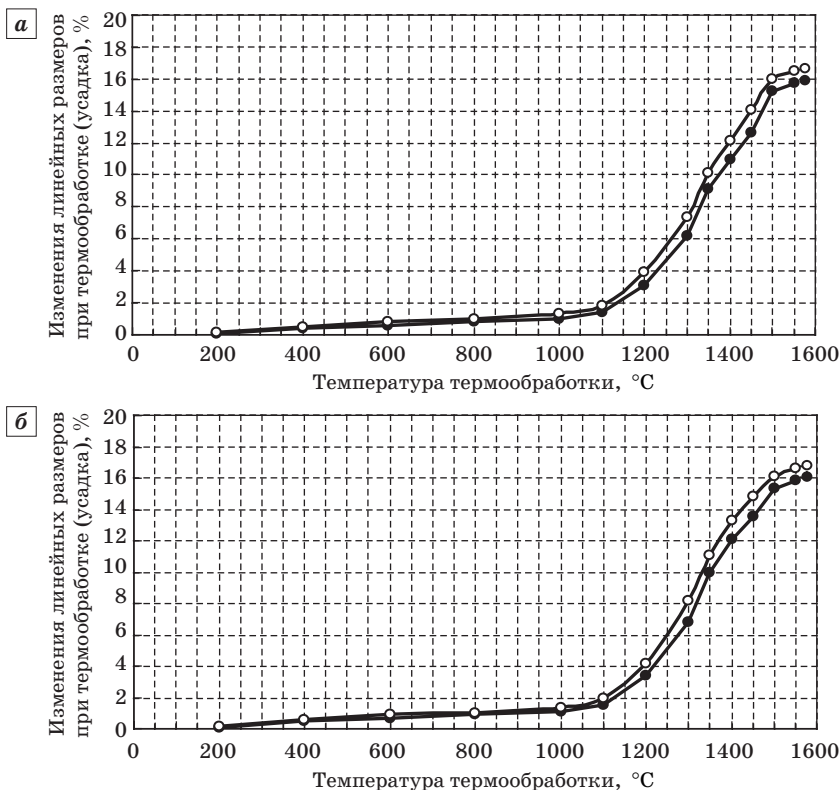


Рис. 3. Зависимость изменения линейных размеров при термообработке (усадка) образцов корундовой керамики от температуры при одностадийной (а) и многостадийной (б) термообработке в лабораторных электрических печах, где:

○ — состав 1, ● — состав 2

плотность увеличивается с 3,1 и 2,9 г/см³ до 3,80 и 3,75 г/см³ (на 0,7 и 0,85 г/см³), линейная усадка увеличивается с 4,2 и 3,4 % до 14,8 и 13,5 % (на 10,6 и 10,1 абс. %), открытая пористость уменьшается с 28,0 и 30,5 % до 0,8 и 6,3 % (на 27,2 и 24,2 абс. %). При температурах термообработки 1500, 1550 и 1580 °С кажущаяся плотность и открытая пористость образцов уже не зависят от их состава как при одностадийном, так и при многостадийном режимах термообработки, но уравнивание значений этих свойств согласуется со значительным уменьшением разницы в абсолютных значениях линейной усадки образцов при повышении температуры термообработки. Так, указанная разница для образцов составов 1 и 2 при одностадийном

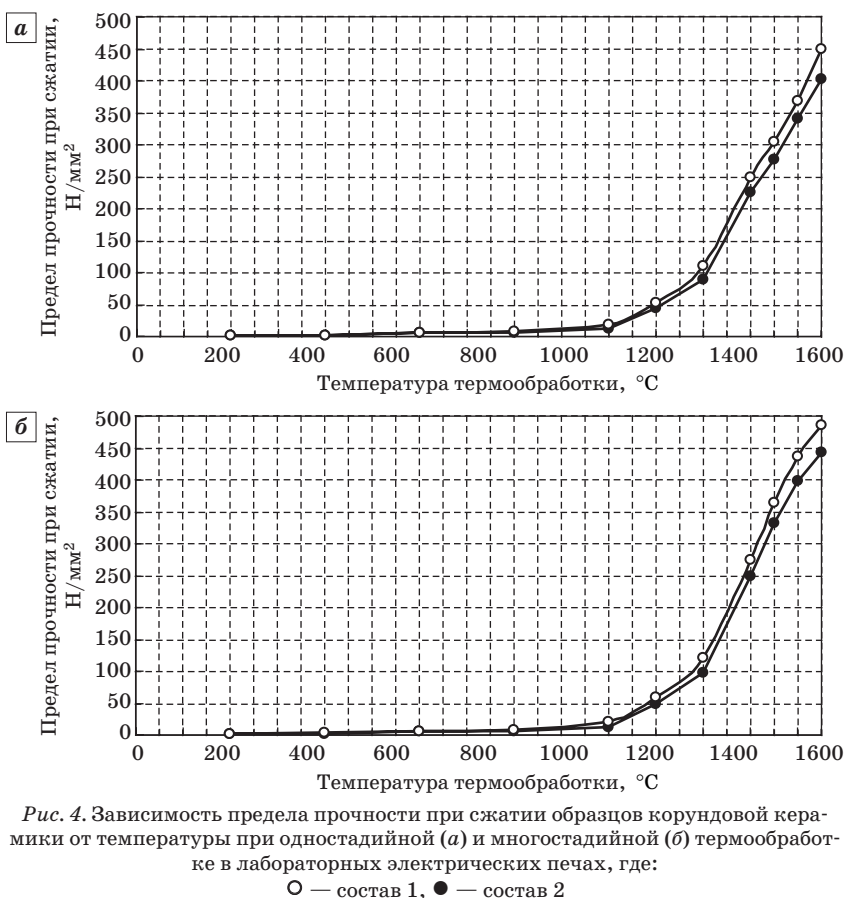


Рис. 4. Зависимость предела прочности при сжатии образцов корундовой керамики от температуры при одностадийной (а) и многостадийной (б) термообработке в лабораторных электрических печах, где:

○ — состав 1, ● — состав 2

режиме в температурном интервале 1300—1450 °С составляет 1,0—1,3 абс. %, а в температурном интервале 1500—1580 °С она уменьшается до 0,2—0,8 абс. %, при многостадийном режиме она уменьшается одинаково (соответственно с 1,1—1,4 абс. % до 0,2—0,8 абс. %), т. е. интенсивность спекания образцов обоих составов выравнивается при приближении к 1580 °С по обоим режимам. Кажущаяся плотность и открытая пористость образцов при температуре термообработки 1580 °С уже практически не зависят от их состава и режима термообработки (одностадийной или многостадийной). Общая пористость образцов (она рассчитывается из соотношения между их кажущейся плотностью и истинной плотностью корунда — последняя составляет 3,96 г/см³)

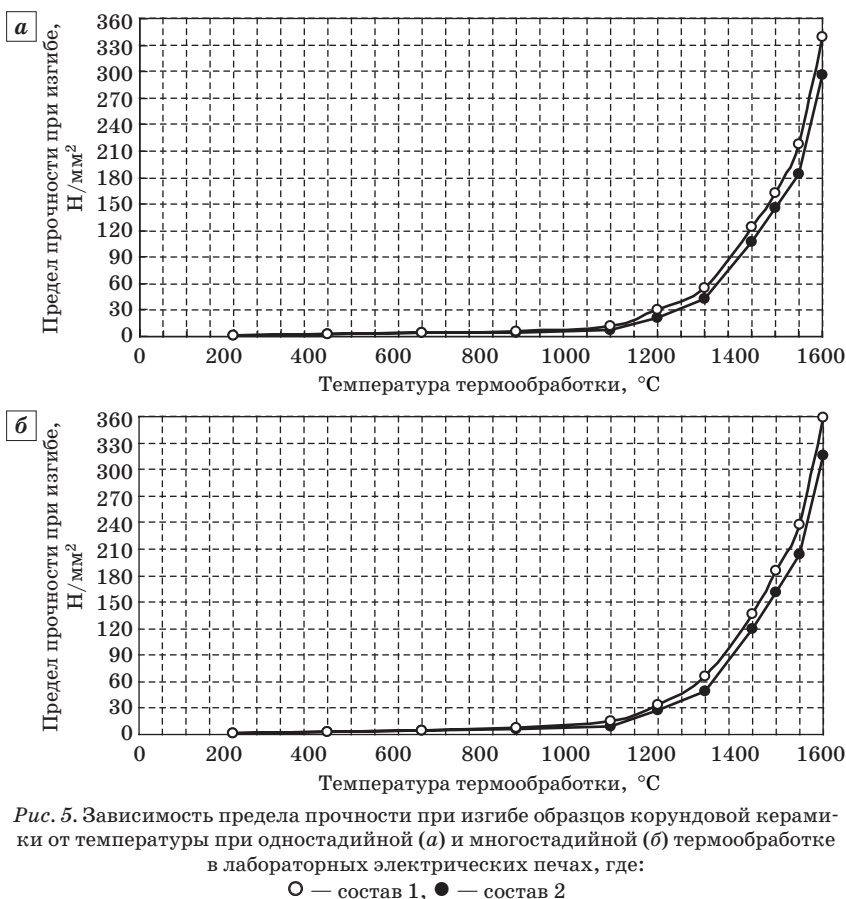


Рис. 5. Зависимость предела прочности при изгибе образцов корундовой керамики от температуры при одностадийной (а) и многостадийной (б) термообработке в лабораторных электрических печах, где:

○ — состав 1, ● — состав 2

при кажущейся плотности 3,75; 3,85; 3,89; 3,90; 3,91 и 3,92 г/см³ составляет соответственно 5,30; 2,78; 1,77; 1,52; 1,27 и 1,02 %, т. е. при использовании исследованного реактивного глинозема возможно получение шликерным литьем корундовых образцов обоих составов, даже при одностадийной кратковременной термообработке при 1500 °С в лабораторных электрических печах, с общей пористостью 5,3 % (открытая пористость 0,3 %), а при 1580 °С — с общей пористостью 1,52—1,57 % (открытая пористость 0,2 %).

Из рис. 4 и 5 видно, что для образцов обоих составов характер изменения предела прочности при сжатии и изгибе при повышении температуры термообработки как при одностадийном, так и многостадийном режиме, согласовывается с данными для кажущейся плотности, линейной усадки и открытой пористости (рис. 1, 2 и 3). После термообработки как по одностадийному, так и по многостадийному режиму, даже при 1450 °С, образцы имеют высокие значения показателей предела прочности при сжатии (для образцов состава 1 — 450 и 486 Н/мм², а для состава 2 — 402 и 442 Н/мм² соответственно) и при изгибе (338 и 358 Н/мм² и 295 и 315 Н/мм² соответственно).

В результате петрографических исследований установлено, что в интервале температур от 200 до 1200 °С независимо от состава образцов, режима термообработки (кратковременная одностадийная или длительная многостадийная) существенных отличий в их структуре не наблюдается. С повышением температуры термообработки до 1400 °С и выше отмечается последовательный рост зерен корунда, средний размер пор уменьшается, что свидетельствует о протекании процесса спекания, а после термообработки при температуре 1580 °С (даже при кратковременном одностадийном режиме) образцы характеризуются плотноспеченной структурой (рис. 6).

Таким образом, в результате исследований влияния кратковременной одностадийной и длительной многостадийной термообработки в интервале температур 200—1580 °С в лабораторных электрических печах на спекание корундовой керамики, изготовленной из реактивного глинозема методом литья из шликеров двух составов (с различной влажностью и разными добавками), установлено, что при термообработке при температурах до 1450 °С как по одностадийному, так и по многостадийному режиму имеется тенденция к улучшению свойств образцов корундовой керамики, изготовленных из шликера влажностью 30 %, содержащего диспергирующую и упрочняющую добавки

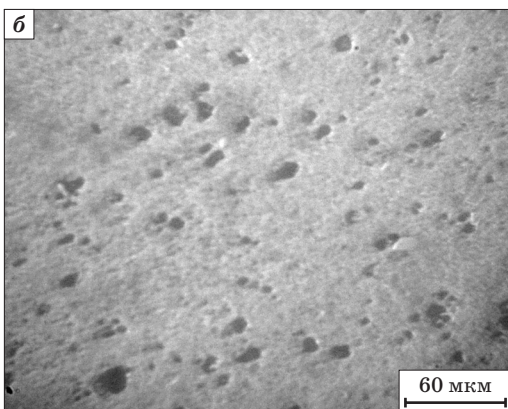
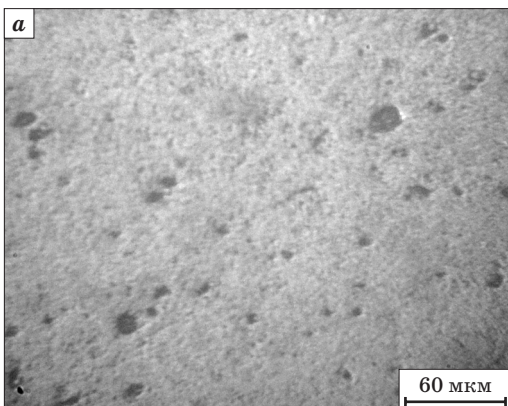


Рис. 6. Структура образцов корундовой керамики состава 1 (а) и состава 2 (б) после кратковременной одностадийной термообработки при 1580 °С

(состав 1), по сравнению с образцами из шликера с влажностью 20 %, содержащего только диспергирующую добавку (состав 2). Однако после термообработки при 1500, 1550 и 1580 °С кажущаяся плотность образцов уже практически не зависит от их состава. Тем не менее при всех температурах термообработки образцов по длительному многостадийному режиму имеется тенденция к улучшению их кажущейся плотности и открытой пористости по сравнению с кратковременным одностадийным режимом. Но эта тенденция также уменьшается при повышении температуры до 1500, 1550 и 1580 °С, и после термообработки при 1580 °С указанные свойства образцов уже практически не зависят от режима термообработки, т. е. кажущаяся плотность и открытая пористость образцов, термообработанных при 1580 °С, практически не зависят как от их состава, так и от режима термообработки.

Результаты определения свойств образцов корундовой керамики, термообработанных при 1580 °С по длительному одностадийному режиму (газопламенная печь периодического действия, подъем температуры за 78 ч, выдержка — 8 ч), приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что образцы обоих составов, термообработанные при температуре 1580 °С по длительному одностадийно-

му режиму в промышленной периодической печи, характеризуются следующими показателями свойств: пористость открытая 0 %, пористость общая 0,76 %, кажущаяся плотность 3,93 г/см³ (99,2 % от теоретической). Практически такие же свойства имеют образцы обоих составов, термообработанные при температуре 1580 °С по длительному многостадийному режиму в лабораторной электрической печи: пористость открытая 0,1 %, кажущаяся плотность 3,92 г/см³ для состава 1 и 3,91 г/см³ для состава 2 (при таких значениях кажущейся плотности общая пористость составляет, как показано выше, 1,02 и 1,27 % соответственно). Свойства образцов обоих составов, термообработанных по кратковременному одностадийному режиму в лабораторной электрической печи, приближаются к свойствам образцов, термообработанных по двум длительным режимам: пористость открытая 0,2 % (пористость общая 1,52 % для состава 1 и 1,77 % для состава 2), кажущаяся плотность 3,90 г/см³ для состава 1 (98,5 % от теоретической) и 3,89 г/см³ для состава 2 (98,2 % от теоретической).

Таблица 2

Свойства образцов корундовой керамики после термообработки при температуре 1580 °С по длительному одностадийному режиму в промышленной периодической печи (подъем температуры за 78 ч, выдержка при максимальной температуре — 8 ч)

Номер состава	Средние значения показателей свойств			
	Пористость, %		Кажущаяся плотность, г/см ³	Изменение линейных размеров (усадка), %
	открытая	общая		
1	0	0,76	3,93	16,7
2	0	0,76	3,93	16,7

Петрографическими исследованиями образцов корундовой керамики обоих составов после термообработки по длительному одностадийному режиму в промышленной периодической печи (подъем температуры за 78 ч до 1580 °С с последующей выдержкой 8 ч) установлено, что их структура представлена более плотно спеченными зернами α -Al₂O₃ по сравнению с образцами, термообработанными в лабораторных электрических печах.

Заключение

Исследовано влияние кратковременной одностадийной и длительной многостадийной термообработки в интервале температур 200—1580 °С в лабораторных электрических печах,

а также длительной одностадийной термообработки при 1580 °С (в промышленной периодической печи) на свойства корундовой керамики, изготавливаемой методом шликерного литья из реактивного глинозема из шликеров с различной влажностью и разными добавками (состав 1 с влажностью 30 % с диспергирующей и упрочняющей добавками и состав 2 с влажностью 20 % только с диспергирующей добавкой). Установлено, что как при кратковременном одностадийном, так и при длительном многостадийном режиме при температурах до 1450 °С имеется тенденция к улучшению кажущейся плотности и открытой пористости образцов состава 1 по сравнению с образцами состава 2, а также тенденция к улучшению этих свойств при длительном многостадийном режиме по сравнению с кратковременным одностадийным режимом. Однако эти тенденции уменьшаются при повышении температуры термообработки до 1500, 1550 и 1580 °С, и после термообработки при 1580 °С кажущаяся плотность и открытая пористость образцов практически не зависят от их состава и режима термообработки (кратковременный одностадийный или длительный многостадийный). Установлено также, что образцы обоих составов, термообработанные при 1580 °С по длительному одностадийному режиму в промышленной периодической печи и термообработанные при 1580 °С по длительному многостадийному режиму в лабораторной электрической печи, имеют высокие практически одинаковые кажущуюся плотность (3,93 и 3,92 г/см³), открытую пористость (0 и 0,1 %) и общую пористость (0,76 и 1,02 %), которые приближаются по значениям этих свойств к теоретическим значениям для корунда.

Показано, что при использовании реактивного глинозема возможно получение шликерным литьем образцов корундовой керамики даже при кратковременной одностадийной термообработке при 1500 °С с открытой пористостью 0,3 %, общей пористостью 5,3 % и кажущейся плотностью 3,75 г/см³.

Соответствующий режим термообработки корундовой керамики (одностадийный или многостадийный, кратковременный или длительный) должен быть выбран в зависимости от размеров, конфигурации и веса изделий, а также от условий их службы.

Библиографический список

1. Кайнарский И. С., Дегтярева Э. В., Орлова И. Г. Корундовые огнеупоры и керамика. Москва : Металлургия, 1981. 267 с.

2. Кайнарский И. С. Процессы технологии огнеупоров. Москва : Металлургия, 1969. 352 с.

3. Процессы керамического производства : сб. науч. тр. / под ред. У. Д. Кингери ; пер. с англ. А. М. Черепанова под ред. П. П. Будникова. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1960. 280 с.

4. Добровольский А. Г. Шликерное литье. Москва : Металлургия, 1977. 240 с.

5. Корундовые огнеупоры и керамика / П. П. Криворучко и др. *Научные исследования по технологии и службе огнеупоров. К 70-летию Украинского научно-исследовательского института огнеупоров*. Харьков : Каравелла, 1997. С. 167—185.

6. Криворучко П. П., Пьяных Н. Л., Гирич Н. А. Разработка и производство корундовой керамики. *Передовая керамика — третьему тысячелетию* : тез. докл. междунар. науч. конф., г. Киев, 5—9 нояб. 2001 г. Киев : Украина, 2001. С. 149.

7. Криворучко П. П., Пьяных Н. Л., Денисенко Е. А., Светличный Е. А. Корундовая керамика, разработанная и изготавливаемая ОАО «УкрНИИО имени А. С. Бережного». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 2. С. 65—69.

8. Исследования влияния новых диспергирующей и упрочняющей добавок на реологические и литьевые свойства глиноземистых шликеров и образцов корундовой керамики / В. В. Примаченко и др. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Харьков, 28—29 апр. 2015 г. Харьков : Оригинал, 2015. С. 17—18.

9. Влияние вида глинозема на свойства шликеров и образцов обособленной корундовой керамики / В. В. Мартыненко и др. *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. Харьков : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2015. № 115. С. 46—55.

10. Высокоогнеупорная корундовая обособленная керамика из ультратонкодисперсного глинозема / Ю. Е. Мишнева, К. И. Кущенко, Ю. А. Крахмаль. Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. огнеупорщиков и металлургов, г. Москва, 7—8 апреля 2016 г. *Новые огнеупоры*. 2016. № 3. С. 60—61.

11. Влияние количества диспергирующей и упрочняющей добавок на реологические свойства глиноземистых шликеров и образцов корундовой керамики / В. В. Мартыненко и др. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Харьков, 11—12 мая 2016 г. Харьков : Оригинал, 2016. С. 30—32.

12. Исследование реологических свойств глиноземистых шликеров, содержащих новые диспергирующую и упрочняющую добавки / В. В. Мартыненко и др. *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. Харків : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2016. № 116. С. 98—109.

13. Влияние времени выдержки глиноземистых шликеров с диспергирующей и упрочняющей добавками на их реологические свойства и свойства образцов корундовой керамики / К. И. Кущенко, Ю. Е. Мишнева, Ю. А. Крахмаль, Э. Л. Карякина. *Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности* : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Харьков, 25—26 апр. 2017 г. Харьков : Вид. Рожко С. Г., 2017. С. 20—21.

14. Исследование влияния времени выдержки на реологические свойства глиноземистых шликеров с диспергирующей и упрочняющей добавками и свойства изготовленных из них образцов корундовой керамики / В. В. Мартыненко и др. *Зб. наук. пр. ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО»*. Харків : ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2017. № 117. С. 138—148. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.117.13>.

15. Исследование реологических и литьевых свойств глиноземистых шликеров и образцов из них, содержащих новую диспергирующую добавку и ее комбинации с упрочняющей добавкой / В. В. Примаченко, К. И. Кущенко, Ю. А. Крахмаль, Ю. Е. Мишнева. *Научные исследования по огнеупорам и технической керамике : сб. науч. тр.* Харьков : АТ «УкрНДІВ імені А. С. Бережного», 2018. № 118. С. 87—101. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.118.08>.

References (transliterated):

1. Kaynarskiy I. S., Degtyareva E. V., Orlova I. G. *Korundovyye ogneupory i keramika* [Corundum refractories and ceramics]. Moscow, Metallurgiya Publ. [Metallurgy], 1981. 267 p. (in Russian).
2. Kaynarskiy I. S. *Protsessy tekhnologii ogneuporov* [Processes of refractory technology]. Moscow, Metallurgiya Publ. [Metallurgy], 1969. 352 p. (in Russian).
3. Kingerey W. D., ed. *Protsessy keramicheskogo proizvodstva: sb. nauch. tr.* [Ceramic manufacturing processes: Coll. Sci. Proc.]/ translation of A. M. Cherepanov; Budnikov P. P., rus. ed. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoy literatury Publ. [Foreign publishing house], 1960. 280 p. (in Russian).
4. Dobrovolskiy A. G. *Shlikernoye lit'ye* [Slip casting]. Moscow, Metallurgiya Publ. [Metallurgy], 1977. 240 p. (in Russian).
5. Krivoruchko P. P., P'yanykh N. L., Kabakova I. I., Girich N. A., Barannik Yu. P., Rabinkov L. G., Denisenko Ye. A. *Korundovyye ogneupory i keramika* [Corundum refractories and ceramics]. *Nauchnyye issledovaniya po tekhnologii i sluzhbe ogneuporov. K 70-letiyu Ukrainskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ogneuporov.* [Scientific research on technology and service refractories. To the 70th anniversary of the Ukrainian Research Institute of Refractories]. Kharkov, Karavella Publ., 1997, pp. 167—185 (in Russian).
6. Krivoruchko P. P., P'yanykh N. L., Girich N. A. *Razrabotka i proizvodstvo korundovoy keramiki* [Development and production of corundum ceramics]. *Peredovaya keramika — tret'yemu tysyacheletiy. Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*, Kiev, 5—9 noyabrya 2001 [Advanced ceramics — the third millennium. Abstracts of Int. Sci. Conf, Kiev, 5—9 of November, 2001]. Kiev, Ukraina Publ., 2001, p. 149 (in Russian).
7. Krivoruchko P. P., P'yanykh N. L., Denisenko Ye. A., Svetlichnyy Ye. A. *Korundovaya keramika, razrabotannaya i izgotavlivayemaya OAO "UkrNIIO imeni A. S. Berezhnogo"* [Corundum ceramics developed and manufactured by OJSC "The Ukrainian Research Institute of Refractories named after A. S. Berezhnoy"]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], 2006, no. 2, pp. 65—69 (in Russian).
8. Primachenko V. V., Martynenko V. V., Krivoruchko P. P., Mishneva Yu. Ye., Kushchenko K. I., Karyakina E. L., Sinyukova Ye. I., Krakhmal' Yu. A. *Issledovaniya vliyaniya novykh dispergiruyushchey i uprochnyayushchey dobavok na reologicheskiye i lit'yevyye svoystva glinozemistykh shchlikerov i obraztsov korundovoy keramiki* [Studies of the effect of dispersing and hardening additives on the rheological and molding properties of alumina slips and samples of corundum ceramics]. *Tekhnologiya i primeneniye ogneuporov i tekhnicheskoy keramiki v promyshlennosti. Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Kharkov, 28—29 aprelya 2015 [Technology and application refractories and technical ceramics in industry. Abstracts of Int. Sci.-Techn. Conf., Kharkov, 28—29 April 2015]. Kharkov, Original Publ., 2015, pp. 17—18 (in Russian).
9. Martynenko V. V., Primachenko V. V., Krivoruchko P. P., Mishneva Yu. Ye., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A., Sinyukova Ye. I., Karyakina E. L. *Vliyaniye vida glinozema na svoystva shlikerov i obraztsov osoboplotnoy korundovoy keramiki* [The influence of alumina type on the properties of slips and samples of high-density corundum ceramics]. *Zb. nauk. pr. PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZHNOGO"* [Coll. Sci. Proc. of PJSC "THE URIR NAVED AFTER A. S. BEREZHNOY"]. Kharkov, PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZHNOGO" Publ., 2015, no. 115, pp. 46—55 (in Russian).
10. Mishneva Yu. Ye., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A. *Vysokoogneupornaya korundovaya osoboplotnaya keramika iz ul'tradispersnogo glinozema* [High refractory corundum extra-dense alumina ceramics]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoy*

konferencii ogneuporshchikov i metallurgov, Moscow, 7—8 apelya 2016 [Abstracts of Int. Conf. of Refractory workers and Metallurgists, Moscow, 7—8 Apr. 2016]. *Novyye ogneupory* [New refractories]. 2016, no. 3, pp. 60—61 (in Russian).

11. Martynenko V. V., Mishneva Yu. Ye., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A., Karyakina E. L. Vliyaniye kolichestva dispergiruyushchey i uprochnyayushchey dobavok na reologicheskiye svoystva glinozemistykh shhlikerov i obratstov korundovoy keramiki [The effect of the amount of dispersing and hardening additives on the rheological properties of alumina slips and samples of corundum ceramics]. *Tekhnologiya i primeneniye ogneuporov i tekhnicheskoy keramiki v promyshlennosti. Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Kharkov, 11—12 May 2016 [Technology and application refractories and technical ceramics in industry. Abstracts of Int. Sci.-Techn. Conf., Kharkov, 11—12 May 2016]. Kharkov, Original Publ., 2016, pp. 30—32 (in Russian).

12. Martynenko V. V., Primachenko V. V., Mishneva Yu. Ye., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A., Karyakina E. L. Issledovaniye reologicheskikh svoystv glinozemistykh shlikerov, sodержashchih novye dispergiruyushhuju i uprochnyajushhuju dobavki [Study of the rheological properties of alumina slips containing new dispersing and hardening additives]. *Zb. nauk. pr. PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZhNOGO"* [Coll. Sci. Proc. of PJSC "THE URIR NAVED AFTER A. S. BEREZHNOY"]. Kharkov, PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZhNOGO" Publ., 2016, no. 116, pp. 98—109 (in Russian).

13. Kushchenko K. I., Mishneva Yu. Ye., Krakhmal' Yu. A., Karyakina E. L. Vliyaniye vremeni vyderzhki glinozemistykh shlikerov s dispergiruyushchey i uprochnyayushchey dobavkami na ikh reologicheskiye svoystva i svoystva obratstov korundovoy keramiki [The effect of exposure time of alumina slips with dispersing and hardening additives on their rheological properties and properties of corundum ceramics samples]. *Tekhnologiya i primeneniye ogneuporov i tekhnicheskoy keramiki v promyshlennosti. Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, Kharkov, 25—26 apelya 2017 [Technology and application refractories and technical ceramics in industry. Abstracts of Int. Sci.-Techn. Conf., Kharkov, 25—26 April 2017]. Kharkov, Rozhko S. G. Publ., 2017, pp. 20—21 (in Russian).

14. Martynenko V. V., Primachenko V. V., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A., Mishneva Yu. Ye., Karyakina E. L. Issledovaniye vliyaniya vremeni vyderzhki na reologicheskiye svoystva glinozemistykh shlikerov s dispergiruyushchey i uprochnyayushchey dobavkami i svoystva izgotovlennykh iz nikh obratstov korundovoy keramiki [Study of the effect of exposure time on the rheological properties of alumina slips with dispersing and hardening additives and the properties of corundum ceramics made from them]. *Zb. nauk. pr. PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZhNOGO"* [Coll. Sci. Proc. of PJSC "THE URIR NAVED AFTER A. S. BEREZHNOY"]. Kharkov, PAT "UKRNDI VOGNETRYVIV IM. A. S. BEREZhNOGO" Publ., 2017, no. 117, pp. 138—148. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.117.13> (in Russian).

15. Primachenko V. V., Kushchenko K. I., Krakhmal' Yu. A., Mishneva Yu. Ye. Issledovaniye reologicheskikh i lit'yevykh svoystv glinozemistykh shlikerov i obratstov iz nikh, sodержashchikh novuyu dispergiruyushchuyu dobavku i yeye kombinatsii s uprochnyayushchey dobavkoy [Study of the rheological and molding properties of aluminous slips and samples from them containing a new dispersing additive and its combination with a strengthening additive]. *Nauchnye issledovaniya po ogneuporam i tekhnicheskoy keramike: sb. nauch. tr.* [Scientific Researches on Refractories and Technical Ceramics : Coll. Sci. Proc.]. Kharkov, AT "UkrNDIV imeni A. S. Berezhnogo" Publ., 2018, no. 118, pp. 87—101. <https://doi.org/10.35857/2663-3566.118.08> (in Russian).

Рецензент канд. техн. наук Савина Л. К.