

Э. М. Уразаева, к. х. н. М. Х. Руми (✉), к. т. н. Ш. Р. Нурматов, Ш. К. Ирматова,
к. т. н. Ш. А. Файзиев, Э. П. Мансурова, М. А. Зуфаров

Институт материаловедения НПО «Физика–Солнце»
АН Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан

УДК 666.762.1-127.017:536.21

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЛЕГКОВЕСНЫХ ОГНЕУПОРОВ

Представлены сведения о теплопроводности высокопористых образцов огнеупоров, полученных с использованием каолинов, глин, выгорающих, спекающих добавок, а также пены. Проанализированы данные по свойствам образцов легковесных огнеупоров, полученных разными методами. Акцент сделан на сочетании теплоизоляционных и прочностных свойств образцов. Достигнута теплопроводность пенолегковесных образцов 0,37 Вт/(м·К) при 650 °С в сочетании с удовлетворительным пределом прочности при сжатии 3,8 МПа.

Ключевые слова: теплопроводность, легковесные огнеупоры, каолиновые глины, сухарные глины, выгорающая добавка, пенополистирол (ППС), пенометод, поризация.

ВВЕДЕНИЕ

Шамотные легковесные огнеупоры широко используются для футеровки промышленных печей благодаря низкой теплопроводности и химической стойкости, так как позволяют снизить потери тепла в окружающую среду, а также улучшить работу тепловых агрегатов, сократив продолжительность их разогрева и охлаждения [1]. При разработке огнеупоров учитываются доступность глин разной огнеупорности, технологичность получения огнеупоров, а также условия их эксплуатации [2].

Для производства теплоизоляционных высокопористых огнеупоров из конкретного вида сырья необходимы исследования, касающиеся оптимизации составов шихт, корректировки технологических режимов, а также оценки теплопроводности получаемых материалов для проведения ряда теплотехнических расчетов (например, для футеровки печей). На теплопроводность материала влияет множество факторов: физическое состояние, наличие кристаллических и аморфных фаз, химический состав, примеси, пористость, температура эксплуатации [1]. Изменения этих факторов могут в разной степени влиять на уровень теплопроводности материала. Известно, что теплопроводность

чистых оксидов намного выше, чем у материалов сложного состава со стеклофазой и сложной кристаллической решеткой. Так, теплопроводность Al_2O_3 составляет 30 Вт/(м·К) при 100 °С, а фарфора и плотного шамотного огнеупора 1,7 и 0,85 Вт/(м·К) соответственно. Зависимость теплопроводности материала от температуры очень важна, так как рабочие температуры теплоизоляционных футеровочных материалов довольно высоки. Так, теплопроводность корунда сильно снижается до 6,2 Вт/(м·К) при 1000 °С, а фарфора и плотного шамотного огнеупора незначительно увеличивается до 1,9 и 0,9 Вт/(м·К) соответственно [1, 3].

Еще одним фактором, влияющим на теплопроводность материалов, является их пористость. Анализ литературных данных показывает, что пористость материала снижает его теплопроводность почти в линейной зависимости. Это связано с теплопроводностью воздуха 0,023 Вт/(м·К), величина которой является наименьшей по сравнению с теплопроводностью природных материалов. Влияние пористости и связанной с ней средней плотности настолько однозначно, что некоторые исследователи рассчитывают теплопроводность при комнатной температуре по эмпирическим формулам в зависимости от пористости. Так, в публикации [4] представлен приближенный расчет теплопроводности материала λ , Вт/(м·К), по формуле

$$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22\rho_0^2} \cdot 0,16,$$

где ρ_0 — средняя плотность материала, г/см³.

Однако достоверную оценку теплопроводности расчетным путем провести сложно из-за множества факторов, влияющих на ее величину. В



М. Х. Руми
E-mail: marinarumi@yandex.ru

связи с этим предпочтение получили экспериментальные методы, особенно при исследовании пористых и высокопористых огнеупорных материалов.

Влияние пористости на теплопроводность легковесных огнеупоров описано авторами статьи [5]. Ими пенометодом получены материалы на основе огнеупорных глин, характеризующиеся высокой пористостью (до 68 %) и теплопроводностью 0,2–0,35 Вт/(м·К). При этом оценочная теплопроводность плотных изделий на основе огнеупорных глин в разы больше и составляет 0,7–0,82 Вт/(м·К). Получены также магниезиальные теплоизоляционные материалы с равномерным распределением пор по размерам при использовании вспенивающих добавок [6]. Материалы обладают высокой пористостью (62–71 %) и низкой теплопроводностью — в интервале 0,174–0,310 Вт/(м·К), в то время как теплопроводность плотных изделий составляет 4,66–5,82 Вт/(м·К). Имеются сведения [7] о получении низкоплотных углеродных материалов плотностью от 650 до 810 кг/м³; при этом их теплопроводность находится в пределах 2,5–3,2 Вт/(м·К), хотя уровень теплопроводности плотного углерода более 100 Вт/(м·К).

Кроме того, теплопроводность материала зависит в той или иной степени от температуры, а поскольку футеровка тепловых агрегатов работает при повышенных температурах, необходимо знать точную зависимость теплопроводности материала от температуры. Исследования теплопроводности при повышенных температурах шамотных легковесных огнеупоров (огнеупорностью 1670 °С), полученных по технологии поризации, приведены в публикации [8]. Так, метод поризации с введением выгорающей добавки пенополистирола (ППС) позволяет получить материалы теплопроводностью при 600 °С 0,23 Вт/(м·К), а пенометод — теплопроводностью 0,34 Вт/(м·К).

Таким образом, изменяя физико-технические характеристики огнеупоров, можно управлять их теплопроводностью. В настоящей статье представлены результаты исследований влияния методов формования и природы порообразующих добавок на теплопроводность огнеупорных легковесных материалов на основе каолиновых глин.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МАТЕРИАЛЫ

Современные экспериментальные методы определения теплопроводности делятся на две группы: проводимые в стационарном режиме и в нестационарном. Нестационарный режим обеспечивает приближенную оценку при оперативном контроле. Стационарный метод наиболее точен, измерения можно проводить в широком диапазоне температур — от 20 до 700 °С, но этот метод трудоемок. Метод измерения теплопроводности огнеупоров для промыш-

ленного оборудования регламентирован ГОСТ 12170–86 «Огнеупоры. Стационарный метод измерения теплопроводности». Для определения теплопроводности стационарным методом была отформована серия экспериментальных образцов разных составов (табл. 1), соответствующих по форме и размерам марке № 5 по ГОСТ 8691–2018.

Объектом исследований явились: 1 — обогащенные (с разным содержанием оксида алюминия и щелочей) каолины; 2 — сухарные глины; 3 — кварц-каолиновый концентрат; 4 — пластичные вторичные и углистые глины. Во всех экспериментах соотношение наполнителя и связующего в шихте составляло 60:40. Шамот на основе высокообоженных каолинов использовали двух видов (шамот и шамот-1), различающихся содержанием оксида алюминия (36 и 39 мас. %) и щелочей (1,1 и 1,9 мас. %). При выборе исходного сырья учитывали нормативную документацию на сырьевые компоненты, а также технические требования к показателям огнеупорной легковесной керамики по ГОСТ 5040–2015. «Изделия огнеупорные теплоизоляционные».

Для снижения средней плотности разрабатываемых изделий шихту готовили с использованием пенообразователей и ряда выгорающих добавок (кокс, опилки, ППС), что позволило сопоставить особенности их влияния на теплоизоляционные свойства изделий. Для увеличения их механической прочности в качестве спекающей добавки использовали бентонит. Образцы получали полусухим прессованием и пластическим формованием (табл. 1). Спекаемость образцов разрабатываемых составов оценивали путем последовательного обжига в интервале 1250–1350 °С. Основные физико-механические характеристики образцов определяли согласно требованиям нормативной документации; акцент был сделан на сочетание теплоизоляционных и прочностных свойств образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по составам экспериментальных образцов, способам их формования и методам получения пористой структуры приведены в табл. 1.

Образцы с выгорающей добавкой кокса в количестве от 24 до 35 мас. %, были получены полусухим прессованием за счет варьирования давления прессования и массы засыпки в пресс-формы (см. табл. 1, серии 1–3). Из анализа полученных данных следует, что для полного выгорания кокса при обжиге образцов его оптимальное количество в массе засыпки составляет 30 мас. % независимо от вида используемого сырья. Использование наполнителя в виде сухарной глины и давления прессования 10 МПа позволяет получить образцы кажущейся плот-

Таблица 1. Исходный состав формовочных масс для получения образцов теплоизоляционных легко-весных изделий

Серия образца	Состав				Влажность формо- вочной массы, %
	наполнитель	связующее (глина)	спекающая добавка	поризующая добавка*	
Образцы, полученные полусухим прессованием					
1	Шамот	Вторичная	–	Кокс (20–35 %)	11–14
2	»	»	Бентонит (>6,5 %)	Кокс (30 %)	
3	Сухарная глина	Углистая	–	Кокс (30 %)	
4	Шамот	Вторичная	–	ППС (9 %)	
Образцы, полученные пластическим формованием					
5	»	То же	Бентонит (5 %)	Опилки (18–23 %)	35
6	»	» »	-	Пена (10–25 %)	45–50
7	Сухарная глина	Углистая	-		
8	Кварц- каолиновый концентрат				
9	Шамот				
10	Шамот-I				

* В скобках указана концентрация поризующей добавки сверх 100 %.

* В скобках указана концентрация поризующей добавки сверх 100 %.

ностью $\rho_{\text{каж}}$ до 1000 кг/м³ с пределом прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ 4–6 МПа (серия 3); $\sigma_{\text{сж}}$ образцов шамотного легковесного огнеупора (серия 1) с $\rho_{\text{каж}}$ до 1000 кг/м³ составил 1,3 МПа (табл. 2).

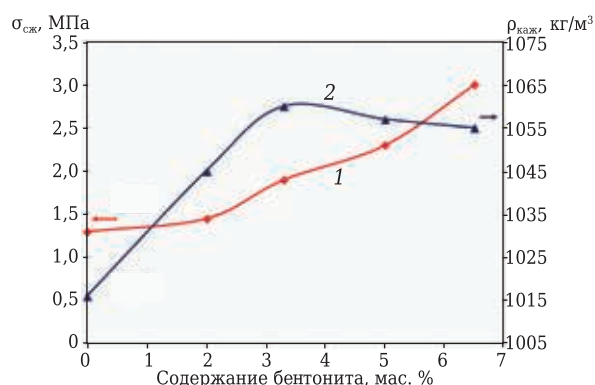


Рис. 1. Влияние содержания бентонита на спекаемость при 1300 °С образцов серии 2 (см. табл. 1), полученных полусухим прессованием под давлением 10 МПа

Для получения шамотных легковесных изделий, удовлетворяющих условиям стандарта по механической прочности, в состав формовочных масс вводили природные добавки спекающего и упрочняющего действия — бентонитовую глину (серия 2). Из масс на основе композиционных смесей с концентрацией бентонита до 6,5 % были сформованы образцы. Исследование влияния концентрации модифицирующей добавки показало, что увеличения $\sigma_{\text{сж}}$ образцов до 2,5–3 МПа можно достичь при введении в шихту 5–6 мас. % бентонита (рис. 1). При этом $\rho_{\text{каж}}$ образцов меняется незначительно (1015 кг/м³), линейная усадка Δl находится в пределах 2,1–3,5 %.

Из всех полученных образцов были выбраны те, в которых сочетались наименьшая плотность с удовлетворительной прочностью; была измерена их теплопроводность (см. табл. 2, серии 1–3). С применением полусухого прессования

Таблица 2. Характеристика образцов теплоизоляционных легковесных изделий, полученных при введении поризующих добавок разными методами

Серия образца (см. табл. 1)	Концентрация поризующей добавки, %	Температура обжига, °С	$\Delta l_{\text{общ}}, \%$	λ , Вт/(м·К), при температуре, °С		$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	$\rho_{\text{каж}}$, кг/м ³
				350	650		
Образцы, полученные методом выгорающих добавок							
Выгорающая добавка — кокс							
1	30	1300	1,0–1,5	0,410	0,496	1,3	1016
2	30	1300	2,1–2,6	0,448	0,535	1,9	1060
	30	1300	2,1–2,6	0,436	0,518	3	1050
3	30	1280	3,5–4,3	0,410	0,505	6	1060
Выгорающая добавка — ППС							
4	9	1350	2,5–3,0	0,348	0,480	2,7	800
Выгорающая добавка — опилки							
5	18	1300	8,9	0,443	0,524	4,3	1000
Образцы, полученные пенометодом							
6	14	1350	8,5–10	0,360	0,470	1,9	910
7	15	1280	13–14	0,317	0,370	3,8	830
8	10	1280	15–16	0,380	0,480	4,9	900
9	14	1300	9–10	0,330	0,440	3,6	860
10	16	1300	14–15	0,350	0,460	3,2	920

масс с ППС можно получить шамотные легко-весные образцы с $\rho_{\text{каж}}$ 800 кг/м³ (серия 4).

Принимая во внимание, что формование без давления позволяет получить эффективные образцы легко-весных изделий с более низкой плотностью, были исследованы характеристики экспериментальных образцов, полученных пластическим формованием из мелкодисперсного шамота и вторичной пластичной каолиновой глины (см. табл. 1, серия 5). Для поризации в состав шихты вводили добавки в виде опилок (побочный продукт деревообрабатывающих производств) в количестве от 18 до 23 мас. %, а для регулирования прочности — 5 мас. % бентонитовой глины. Компоненты шихты дозировали, увлажняли до относительной влажности 35 % и обжигали при 1250–1350 °С. По результатам испытаний построены зависимости усадки образцов от количества опилок и температуры обжига (рис. 2, а). Видно, что усадочные процессы до 1300 °С не превышают 9 и 12 % у образцов с содержанием опилок 18 и 23 мас. %. Та же зависимость наблюдается и у плотности образцов, которая до 1300 °С изменяется мало и не превышает 1000 кг/м³ (рис. 2, б). Процессы спекания сильно активизируются при превышении этой температуры, что отражается на увеличении Δl в 2 раза, $\rho_{\text{каж}}$ до 1350 кг/м³ и визуальной деформации образцов.

Измерение $\sigma_{\text{сж}}$ образцов позволило установить, что в большей степени на его показатели влияет количество вводимых опилок (см. рис. 2, б). При введении 18 мас. % опилок $\sigma_{\text{сж}}$ образцов достигает 4,3 МПа при 1300 °С; повышение количества опилок до 23 мас. % ведет к потере $\sigma_{\text{сж}}$ в 2 раза. Таким образом, образец с оптимальным сочетанием свойств ($\rho_{\text{каж}}$ 1000 кг/м³, $\sigma_{\text{сж}}$ 4,3 МПа, Δl 7 %), полученный пластическим формованием из шихты с 18 мас. % опилок и обожженный при 1300 °С, был отобран для исследования теплопроводности (см. табл. 2, серия 5).

Получены образцы с использованием пено-технологии на основе огнеупорного шамота и вторичной пластичной каолиновой глины (см. табл. 1, серия 6). Количество пены изменяли от 10 до 25 мас. %. Принимая во внимание, что сырье, используемое в этом эксперименте, обладает наибольшей огнеупорностью, температура обжига всех образцов составляла 1350 °С. Установлено, что с увеличением содержания пены равномерно снижаются их $\rho_{\text{каж}}$ от 990 до 820 кг/м³ и $\sigma_{\text{сж}}$ от 2,1 до 1,8 МПа (рис. 3). В большей степени количество пены влияет на усадочные процессы. Если при содержании пены 18 мас. % Δl составляет 8,5 %, то при содержании пены 23 мас. % при тех же условиях обжига Δl увеличивается почти в 2 раза и составляет 15 %.

Далее измеряли теплопроводность образцов с $\rho_{\text{каж}}$ 900–950 кг/м³, полученных на основе шамота с введением 14–18 мас. % пены (см. табл. 2, серия 6).

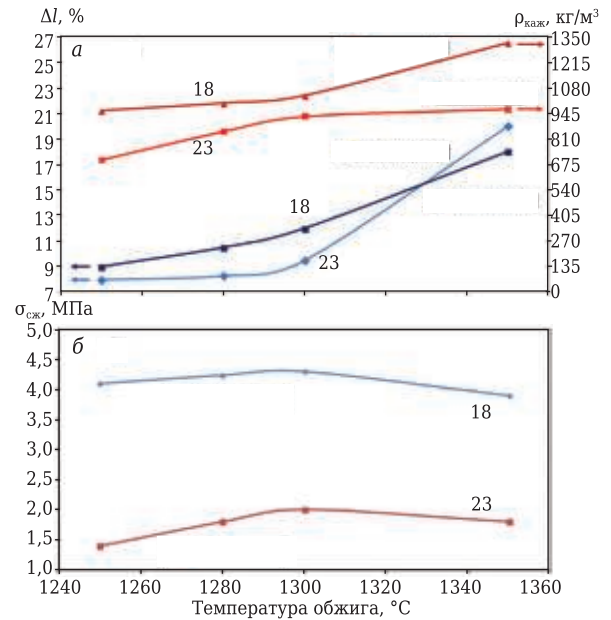


Рис. 2. Кривые спекания образцов серии 5 (см. табл. 1), полученных пластическим формованием с выгорающей добавкой в виде опилок; цифры на кривых — количество добавки, мас. %

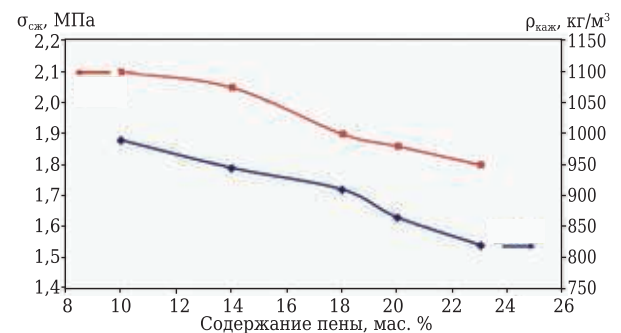


Рис. 3. Влияние содержания пены на спекаемость при 1350 °С образцов серии 6 (см. табл. 1), полученных пластическим формованием

Влияние температуры обжига на свойства образцов на основе сахарной глины с 15 мас. % пены показано на рис. 4. Ниже 1280 °С образцы обладают оптимальным сочетанием свойств: $\rho_{\text{каж}}$ 800–900 кг/м³ и $\sigma_{\text{сж}}$ 3,8 МПа. Дальнейшее по-

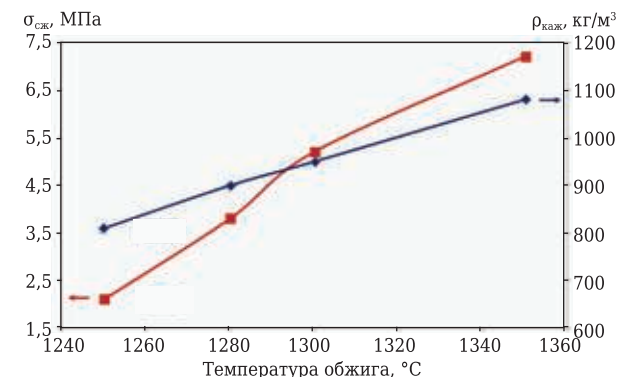


Рис. 4. Кривые спекания образцов серии 7 (см. табл. 1), полученных пенометодом при введении 15 мас. % пены

вышение температуры обжига приводит к увеличению плотности образцов.

Исследовали спекаемость пенолегковесных образцов с заменой сахарной глины на кварц-каолиновый концентрат, шамот и шамот-I (см. табл. 1, серии 8–10) со связующим на основе углистой глины. На образцах оптимальных составов, сочетающих наименьшую плотность с удовлетворительной прочностью, измерена теплопроводность (см. табл. 2).

Зависимость изменения теплопроводности λ от водопоглощения образцов легковесных изделий показана на рис. 5. В целом λ образцов всех серий снижается при повышении водопоглощения. В то же время сопоставительный анализ данных показал, что теплопроводность образцов из различного сырья при одинаковом водопоглощении различается. Так, при водопоглощении 83 % теплопроводность пенообразцов на основе шамота (точка *e*) и сахарной глины (точка *f*) составляет 0,44 и 0,37 Вт/(м·К) соответственно. Это может быть связано с различием в фазовом и химическом составах образцов: сахарная глина, как более легкоплавкая, содержит больше аморфной фазы. Выявлено, что технология формования с выгорающей добавкой в

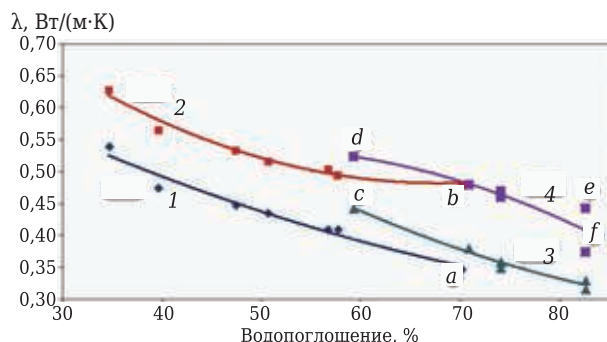


Рис. 5. Зависимость λ образцов легковесных изделий, полученных разными методами, от их водопоглощения B : 1, 2 — полусухое прессование с коксом (точки *a*, *b* — с ППС); 3, 4 — пластическое формование пенометодом (точки *c*, *d* — с опилками; точки *e*, *f* — образцы на основе шамота и сахарной глины соответственно); 1, 3 — при 350 °С; 2, 4 — при 650 °С

виде опилок (точки *c*, *d*) ухудшает теплопроводность образца по сравнению с выгорающей добавкой кокса: при одинаковом водопоглощении заметно увеличение теплопроводности, измеренной при 650 °С, от 0,505 до 0,524 Вт/(м·К).

Зависимость теплопроводности от температуры однозначна для алюмосиликатного сырья любой огнеупорности: теплопроводность растет с повышением температуры от 350 до 650 °С. Выявлена разница в нарастании теплопроводности при повышении температуры от 350 до 650 °С образцов, полученных формованием изделий с выгорающей добавкой ППС (точки *a*, *b*) и пенометодом. При практически одинаковом водопоглощении (70 и 70,8 %) λ пенообразца изменяется в меньшей степени, чем у образцов с ППС (23,5 и 27,5 % соответственно). Это может быть связано с различием пористой микроструктуры по размеру пор. Гранулы ППС (1–1,5 мм) формируют при выгорании более крупные поры, чем пена.

На рис. 6 показана поверхность сколов спеченных легковесных образцов, полученных разными методами. В структуре образца ($B = 57$ %, $\lambda = 0,496$ Вт/(м·К)) с выгорающей добавкой кокса большую часть объема занимают локальные зерна размерами 200–300 мкм, окруженные вытянутыми сообщающимися порами (см. рис. 6, *a*). В образце с пеноструктурой ($B = 83$ %, $\lambda = 0,317$ Вт/(м·К)), наоборот, большую часть занимают отдельные поры правильной округлой формы размерами 100–300 мкм, окруженные мелкодисперсными агломератами твердой фазы шамота (см. рис. 6, *б*). Крупные поры распределены равномерно, и в их глубине видны более мелкие поры, образованные усадочными процессами глины при термическом воздействии.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что в целом огнеупорные материалы характеризуются теплопроводностью, которая соответствует ГОСТ 5040–2015 «Изделия огнеупорные и высокоогнеупорные легковесные теплоизоляционные». Но не все изделия имеют достаточную прочность: образцы на основе шамота и вторичной глины при удовлетвори-

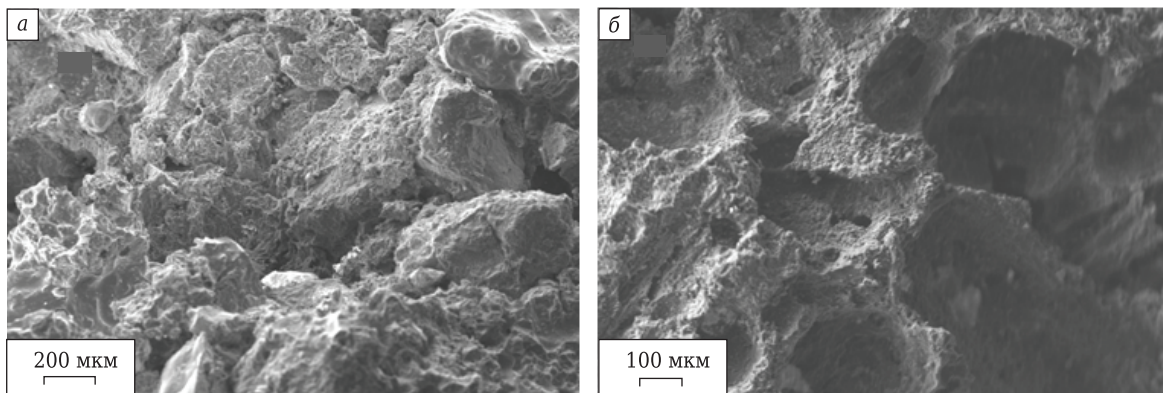


Рис. 6. Микроструктура спеченных пористых образцов, сформованных полусухим прессованием с выгорающей добавкой кокса (*a*) и пенометодом (*б*)

тельной теплопроводности обладают низкой прочностью (см. табл. 2, серии 1 и 6). Введение в связующее 5–6 % бентонита компенсирует потерю прочности при выгорании кокса и позволяет получить изделия, обладающие $\sigma_{сж}$ 3 МПа, с сохранением низкой плотности и, как следствие, необходимой теплопроводности (серия 3). Пористая структура образцов, полученных методом выгорающих добавок в виде опилок, несколько ухудшает их теплопроводность (серия 5), несмотря на снижение плотности до 1000 кг/м³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что плотность огнеупоров теплотехнического назначения является главной и определяющей характеристикой. Установлено, что наряду с кажущейся плотностью и водопоглощением на их теплопроводность существенно

влияют метод получения и состав формовочных масс.

По результатам проведенных комплексных исследований пенометодом получены изделия кажущейся плотностью до 800–900 кг/м³ с теплопроводностью 0,37–0,48 Вт/(м·К) при 650 °С, что соответствует требованиям, предъявляемым к шамотным легковесным материалам такого класса. Наилучшими показателями теплофизических свойств обладают пеноматериалы на основе составов, включающих наполнитель и связующее в виде сухарной и углистой глины.

В результате проведенных исследований получен также массив данных по теплопроводности легковесных материалов на основе алюмосиликатного сырья при повышенных температурах. Диапазон теплопроводности исследуемых материалов, определенный стационарным методом при 350 и 650 °С, составляет 0,317–0,567 Вт/(м·К).

Библиографический список

1. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий / Ю. П. Горлов. — М. : Высшая школа, 1989. — 384 с.
2. Guzman, Y. Certain principles of formation of porous ceramic structures. Properties and applications (review) / Y. Guzman // Glass Ceram. — 2003. — Vol. 60. — P. 280–283.
3. Самсонов, Г. В. Физико-химические свойства окислов : справочник / Г. В. Самсонов, А. Л. Борисова, Т. Г. Жидкова [и др.] ; под ред. Г. В. Самсонова. — М. : Металлургия, 1978. — 472 с.
4. Строительные материалы : уч. для вузов ; под ред. В. Г. Миккульского. — М. : АСВ, 2000. — 536 с.
5. Дятлова, Е. М. Теплоизоляционные керамические материалы на основе огнеупорного и тугоплавкого глинистого сырья Республики Беларусь / Е. М. Дятлова, Р. Ю. Попов, Е. О. Богдан // Огнеупоры и техническая керамика. — 2018. — № 6. — С. 3–8.
6. Meiting, Li. Effect of blowing-agent addition on the structure and properties of magnesia porous material / Li Meiting, Luo Xudong, Zhang Guodong [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 7. — P. 60–64. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0054-7>.

Мейтин, Л. Влияние добавки вспенивающего вещества на структуру и свойства пористого магнезиального материала / Л. Мейтин, Л. Сюдун, Ч. Гуа-

дун [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 1. — С. 48–53. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-1-48-53>.

7. Manylov, M. S. Thermophysical properties of carbon-carbon materials based on graphite foam / M. S. Manylov, S. V. Filimonov, O. N. Shornikova [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 113–116. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0064-5>.

Маньлов, М. С. Теплофизические свойства углерод-углеродных материалов на основе пенографита / М. С. Маньлов, С. В. Филимонов, О. Н. Шорникова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 50–53. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2017-2-50-53>.

8. Соков, В. Н. Теория и практика создания композиционной шамотной термостойкой теплоизоляции / В. Н. Соков, В. В. Соков, А. Э. Бегляров // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. — 2011. — Вып. 1 (15). www.vestnik.vgasu.ru.

9. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок : справочник. В 2 кн. Кн. 1. Производство огнеупоров ; под ред. И. Д. Кашеева. — М. : Интермет Инжиниринг, 2000. — 663 с. ■

Получено 11.02.21

© Э. М. Уразаева, М. Х. Руми, Ш. Р. Нурматов,
Ш. К. Ирматова, Ш. А. Файзиев,
Э. П. Мансурова, М. А. Зуфаров, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ