Д. т. н. **Ю. Е. Пивинский** (✉)

ООО НВФ «Керамбет-Огнеупор», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.762.2:666.3.022.66

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВКВС ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА. Часть 3. Изучение и совершенствование процесса центробежного формования*

Рассмотрена хронология развития исследовательских и внедренческих работ в области центробежного формования, реализованных в производстве кварцевых сталеразливочных огнеупоров. Впервые в отечественной и мировой практике производства керамики и огнеупоров метод центробежного формования получил широкомасштабное применение. Рассмотрены основные требования к исходным формовочным системам и режимам формования, позволяющие получить полуфабрикат повышенной плотности. На ряде примеров показаны перспективы применения метода при формовании изделий на основе ВКВС других материалов.

Ключевые слова: *центробежное формование, ВКВС плавленого кварца, керамобетоны, объемная концентрация, коэффициент избытка, кварцевые сталеразливочные огнеупоры, режим формования, окружная скорость.*

В плоть до второй половины 80-х годов прошлого века единственным методом формования крупногабаритных изделий как кварцевой керамики, так и кварцевых огнеупоров был процесс шликерного литья в гипсовых формах [1–4]. В случае применения высококонцентрированных вяжущих суспензий (ВКВС) на основе кварцевого стекла или плавленого кварца при этом достигаются низкие значения пористости отливки, что очень важно технологически, особенно при получении крупногабаритных изделий с низкой усадкой при обжиге. В то же время этот метод имеет существенные недостатки, состоящие в медленной скорости формования и применении быстроизнашивающихся гипсовых форм.

В этой связи практический интерес представляет центробежный метод формования из тех же ВКВС плавленого кварца, которые обычно используют для шликерного литья. В этом методе удается устранить недостатки шликерного литья. Преимущественное применение этот метод получает [1] при формовании тел вращения (сталеразливочные стаканы, теплозащитные трубы, оболочки роликов для печей типа «Тандем») [2–7]. Однако при определенном совершенствовании процесса имеется возможность формования изделий как плоской формы, так и с различными вставными (поперечными) деталями.

* Части 1 и 2 статьи опубликованы в №7 за 2014 г. и №1 за 2015 г.

✉
Ю. Е. Пивинский
E-mail: pivinskiy@mail.ru

Исторический экскурс и основные сведения о процессе

Метод центрифугирования, основанный на воздействии силового центробежного поля, широко применяют в химической, пищевой, металлургической и других отраслях народного хозяйства. В смежной области строительных материалов, а именно в производстве железобетонных труб, процесс центробежного формования в промышленном масштабе впервые был освоен в СССР в начале 30-х годов прошлого века [8].

Насколько известно, применительно к центробежному формованию керамических материалов первая публикация относится к 1941 г. [9] — авторы впервые использовали вариант комбинированной технологии, сочетающей как обычное шликерное литье в гипсовые формы, так и использование центробежных сил для ускорения процесса (*центробежное шликерное литье*). Если дальнейшее развитие способа было сконцентрировано на формовании изделий, имеющих форму тел вращения, то в работе [11] он был изучен применительно к формованию плоских фарфоровых отливок различной толщины. При этом за счет приложения центробежных сил продолжительность процесса литья была сокращена в 8–10 раз. Применительно к формованию тел вращения

(трубы, кольца) аналогичный комбинированный процесс был предложен Даниелем в США в 1960 г. [10, с. 95].

Как следует из анализа отечественных и зарубежных литературных данных за последние 50–60 лет, этот метод формования не получил заметного распространения в производстве керамических и огнеупорных изделий. Его широкомасштабная реализация с применением металлических форм была осуществлена на Первоуральском динасовом заводе для производства кварцевых огнеупоров еще в конце 80-х годов прошлого века [2, 5–7, 11]. О темпах роста объема производства центробежноформованных изделий на этом заводе в последние годы свидетельствуют данные, приведенные в публикации [7, рис. 4]. Так, с 1990 по 2006 г. несмотря на глубокий кризис в металлургической и огнеупорной отрасли выпуск этих огнеупоров увеличился в 11 раз (с 500 до 5600 т/год).

На начальном этапе исследований этого метода для кварцевой керамики, предпринятых автором еще в 1968 г., применяли аналогичный описанному в публикациях [9, 10] метод центробежного ускорения процесса с использованием гипсовых форм. Однако этот комбинированный метод, хотя и позволял существенно ускорить процесс формования, не решал проблемы стойкости формы. В производстве кварцевых сталеразливочных огнеупоров на ПЗОИ гипсовые формы характеризовались стойкостью до 8–10 отливок. В этой связи уже в середине 80-х годов прошлого века были предприняты попытки реализации процесса центробежного формования с использованием неактивных (металлических) форм. Актуальность этой задачи в еще большей степени увеличилась в результате следующего обстоятельства. В эти годы стала острой проблема организации в СССР производства кварцевых защитных труб для защиты струи металла при выпуске из сталеразливочного ковша, а также крупногабаритных оболочек кварцевых роликов (длиной до 1,5 м при массе до 100 кг), используемых в печах типа «Тандем» для отжига динамной листовой стали [7, 12, 13]. При решении этой новой задачи проблема состояла в том, что существовавшая в те годы технология шликерного литья в быстро изнашиваемых гипсовых формах применительно к формованию крупногабаритных изделий с требованиями по точности их размеров стала уже неприемлемой [2, 3, 7, 12]. Первые опыты по центробежному формованию изделий в металлических формах были проведены нами во Всесоюзном институте огнеупоров в середине 80-х годов прошлого века.

На начальном этапе опытных работ, проведенных нами как в ВИО, так и опытно-промышленных на ПДЗ, центробежное формование оболочек роликов и погружаемых стаканов осуществляли на токарных станках при относительно высокой окружной скорости, достигавшей 15–20 м/с [2, 3, 5, 6, 14, 15]. При этом суспензию вводили во вращающуюся форму при помощи специального устройства постепенно в 2–3 стадии. Впервые [15] был предложен вариант комбинированной технологии формования глуходонных погружаемых стаканов, включающей центробежное формование трубы и последующее формование дна наливным методом с использованием гипсовой подложки. На последующих этапах разработки метода [16–21] процесс был кардинально усовершенствован, в том числе за счет создания специализированных станков для центробежного формования [2, 21] и разработки формовочного комплекта, предусматривающего предварительное введение всего объема суспензии для формования. Кроме того, исключительный технико-экономический эффект был достигнут за счет оптимизации скоростного режима формования [2, 3–6, 16–20].

По аналогии с центробежным формованием бетонов [8] сущность процесса формования этим методом изделий на основе ВКВС или керамобетонных масс заключается в том, что форма с находящейся в ней формовочной смесью вращается вокруг своей продольной оси с заданной (обычно переменной) скоростью. При этом в формуемой системе возникает прессующее центробежное давление $P_ц$, под действием которого из суспензии отжимается дисперсионная среда со взвешенными в ней наиболее тонкодисперсными частицами. При этом одновременно сближаются средне- и крупнодисперсные частицы твердой фазы смеси, что сопровождается образованием тела формуемого изделия. После формования, происходящего обычно в течение 15–30 мин (в зависимости от толщины стенки изделия), из формы удаляется слив (высокодисперсная суспензия) и после непродолжительной (5–10 мин) подсушки извлекается изделие.

Величина возникающего в формовочной системе прессующего давления пропорциональна массе частиц в ней, их расстоянию от оси вращения и квадрату угловой скорости. При вращении формы частицы формовочной системы одновременно испытывают воздействие двух силовых полей: сил тяжести и центробежных. Равенство сил центробежного ускорения и сил тяжести достигается при соответствующей минимальной частоте n вращения формы,

определяемой из равенства $n = 300/\sqrt{r}$ об/мин, где r — внутренний радиус формы, см.

В процессе формования изделия центробежное давление непосредственно воспринимается дисперсионной средой смеси, в связи с чем возрастает избыточное гидростатическое давление. Под влиянием последнего фильтруется жидкость и одновременно уплотняется твердая фаза смеси. С точки зрения скорости формования важнейшим параметром процесса является число оборотов формы n (или производная от него окружная, или линейная, скорость ω). Так, применительно к процессу центробежного формования кварцевых изделий с наружным диаметром 23 см (оболочки роликов для печей отжига горячекатаной динамной стали) и 15 см (защитные трубы для МНЛЗ) минимальные (теоретические) значения n составляют 88–110 об/мин. Соответствующее значение окружной скорости ω составляет 1,1 и 0,8 м/с соответственно. Однако с точки зрения оптимизации процесса (прежде всего его продолжительности) реальные значения показателей n или ω на начальном этапе формования этих изделий обычно в 2–3 раза выше указанных. На среднем и заключительном этапах процесса значение n существенно повышают, что будет рассмотрено в заключительной части статьи.

Важнейшими технологическими параметрами исходной формовочной системы для центробежного формования являются ее объемная концентрация C_V и коэффициент ее избытка $K_{изб}$ [2–6]. По мере повышения значения C_V исходной ВКВС не только понижается значение исходной пористости полуфабриката, но и уменьшается степень расслоения в нем частиц твердой фазы [2, 22]. Коэффициент избытка $K_{изб}$ определяется отношением массы твердого вещества, вводимой при формовании, к сухой массе отформованного полуфабриката. Формование изделий на основе ВКВС, обычно характеризующихся $C_V = 0{,}74 \div 0{,}76$, осуществляется при $K_{изб} = 20 \div 30$ %. При центробежном формовании изделий на основе систем со значительным содержанием зернистого заполнителя значение C_V составляет 80–85 %, а $K_{изб}$ не превышает 10 %. При этом значение плотности высокодисперсного слива, удаляемого из формы, находится обычно в пределах 1,50–1,60 г/см^3, что соответствует C_V 42–50 %. Слив используется в качестве высокоэффективной добавки для ускорения мокрого помола не только плавленого кварца, но и боксита [2, 18, 19, 23]. Кроме того, введение в состав мелющей загрузки 10–12 % слива (по твердому) позволяет осуществить мокрый помол с одностадийной загрузкой материала взамен многостадийной и тем самым существенно повысить исходную концентрацию ВКВС. Учитывая дефицит слива, применяемого для этих целей, в ОАО «Динур» осуществляется специальная его подготовка посредством очень тонкого мокрого помола плавленого кварца при повышенной влажности суспензии [23, с. 217].

Применительно к рассмотрению механизма структурообразования полуфабриката при центробежном формовании весьма актуальными представляются наши исследования, касающиеся процесса осаждения суспензий кварцевого стекла [25]. Установлено, что в процессе длительного гравитационного отстаивания суспензий кварцевого стекла различной плотности образуются высокоплотные прочные осадки. Их пористость только на 2–4 % больше пористости шликерных отливок, полученных на основе этих суспензий. Исходные суспензии в соответствии с их плотностью обладают определенной удельной концентрацией твердой фазы Q_o [1–4]. При осаждении в нижний слой суспензии внедряется дополнительное количество твердой фазы ΔQ, достаточной для образования осадка. Таким образом, плотность осадка $\rho_{ос}$ в общем виде представляется как $\rho_{ос} = Q_o + \Delta Q$. Отношение ΔQ к Q_o названо коэффициентом осадкообразования $k_{ос}$, т. е. $k_{ос} = \Delta Q/Q_o$, который показывает относительную долю твердой фазы, внедрившейся при осаждении, по сравнению с исходной. Является очевидным, что с понижением концентрации твердой фазы в суспензии уменьшается удельная концентрация Q_o и увеличивается показатель ΔQ. Плотность осадка $\rho_{ос}$, как правило, повышается с увеличением плотности суспензии. Зависимости $k_{ос}$, ΔQ, $\rho_{ос}$ от плотности исходной суспензии, согласно данным [25], показаны на рис. 1.

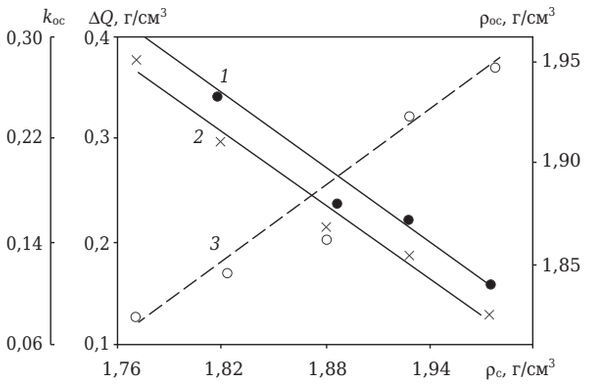

Рис. 1. Зависимости коэффициента осадкообразования $k_{ос}$ (*1*), дополнительной удельной концентрации твердой фазы ΔQ (*2*) и плотности осадка $\rho_{ос}$ (*3*) от плотности суспензии $\rho_с$

Приведенные данные показывают, что в технологическом отношении и для центробежного формования необходимо использовать высокоплотные суспензии с меньшими значениями ΔQ и $k_{ос}$. Из рис. 1 следует, что в пределах $\rho_с$ от 1,76 до 1,97 г/см^3 или интервала значений C_V от 0,63 до 0,81 показатель $\rho_{ос}$ увеличивается от 1,81 до 1,95 г/см^3, что соответствует понижению пористости от 18 до 12 %. Значения $k_{ос}$ при этом уменьшаются от 0,30 до 0,10. Эти данные вполне эквивалентно характеризуют взаимосвязь рассмотренных параметров и в процессе центробежного формования, поэтому фактор концентрации исходных формовочных систем в технологии центробежного формования является определяющим. Ее повышение способствует не только увеличению плотности отформованных изделий, но и достижению относительной равномерности материала по зерновому составу благодаря тому, что по мере уменьшения $k_{ос}$ снижается доля внедряющейся при осаждении крупной фракции и материал отливки становится более равноплотным.

Исключительная практическая значимость рассмотренных положений подтверждается неудачной попыткой внедрения метода центробежного формования кварцевых погружаемых стаканов на Подольском заводе огнеупорных изделий в конце прошлого века. Для этой цели, как и для шликерного литья, применяли относительно низкоплотные суспензии плавленого кварца (1,75–1,80 г/см^3). Полученные при этом центробежноформованные изделия характеризовались пониженной стойкостью по сравнению с обычными шликерными. В конечном итоге завод не выдержал конкуренции на рынке кварцевых огнеупоров и вынужден был полностью прекратить это производство [2, с. 41].

Совершенствование процесса центробежного формования кварцевых огнеупоров

На начальной стадии развития и применения процесса центробежного формования кварцевых огнеупоров (вторая половина 80-х годов прошлого века) использовали ВКВС плавленого кварца плотностью 1,86–1,89 г/см^3 с содержанием частиц крупнее 63 мкм 5–8 %. По сравнению со шликернолитыми огнеупорами при этом была достигнута существенно меньшая продолжительность формования (15–20 мин против 10–20 ч). Однако по структуре и свойствам центробежноформованные отливки по сравнению со шликернолитыми из аналогичных суспензий характеризовались следующими недостатками: повышенной пористостью (17–20 % против 12–14); существенным расслоением зернового состава отливки по толщине и неравномерной структурой; значительным перепадом пористости отливки по толщине; более крупнопористым строением материала вследствие того, что значительная доля высокодисперсных (< 5 мкм) частиц, содержащихся в исходной суспензии, удаляется со сливом после формования.

В связи с этим была поставлена задача радикального совершенствования процесса, направленного на устранение или значительное нивелирование недостатков. При этом исследования велись в направлении как улучшения технологических характеристик исходных формовочных систем (повышение концентрации, оптимальный зерновой состав и т. д.), так и оптимизации скоростных режимов центробежного формования [2–6, 16–20, 22, 23]. Так, было установлено, что уменьшение окружной скорости центробежного формования от 15–20 до 3–4 м/с при прочих равных условиях позволяет снизить пористость полуфабриката с 18–22 до 11–14 % [5, 6]. Столь существенный эффект следует из сформулированного нами принципа реотехнологического соответствия [2, 3, 23]. При меньших значениях окружной скорости резко уменьшается дилатансия [24], что способствует не только устранению ранее наблюдавшегося эффекта «расплыва» свежесформованных заготовок, но и достижению повышенной плотности полуфабриката. При этом значительно снижается степень расслоения частиц твердой фазы по его толщине [2, 22].

В производстве центробежноформованных кварцевых сталеразливочных огнеупоров, как и в других материалах, получаемых на основе ВКВС, наиболее важным параметром является концентрация (или плотность) исходной суспензии или наполненной (заполнителем) формовочной системы. В связи с этим для существенного улучшения структуры и качества центробежноформованных изделий в дальнейшем [2, 7, 11, 18] при совершенствовании технологии в середине 90-х годов прошлого века была повышена плотность исходных ВКВС до 1,91–1,93 г/см^3 с одновременным увеличением содержания как крупной (> 63 мкм) фракции до 15–20 %, так и мелкой (< 1 мкм). Повышенное содержание высокодисперсных частиц в ВКВС достигнуто введением в состав мелющей загрузки слива — отхода формования. Твердая фаза слива характеризуется зерновым составом, показанным на рис. 2 (область *2*). Оптимальные зерновые составы таких ВКВС охарактеризованы областью *1* (см. рис. 2). Полученный из таких ВКВС материал характеризовался как пониженной пористостью (12–13 %), так и су-

щественно более высокой однородностью. При этом перепад пористости по толщине отливки уменьшен до 2–4 %.

Исключительная роль фактора плотности или объемной концентрации исходных формовочных систем C_V в технологии центробежного формования объяснима следующим. В отличие от процесса шликерного литья центробежное формование характеризуется весьма существенным расслоением частиц твердой фазы в формованном материале. Это следует из самой сущности процесса литья из суспензий с высокой степенью полидисперсности (крайние размеры частиц различаются на 5–6 порядков). Между тем степень этого расслоения существенно зависит от отношения объемной концентрации твердой фазы в отформованном полуфабрикате, характеризуемой обычно критической концентрацией $C_{V\text{cr}}$ или его относительной плотностью $\rho_{\text{отн}}$, к объемной концентрации исходной формовочной системы C_V. Вполне очевидно, что чем меньше разница между C_V и $C_{V\text{cr}}$ или $\rho_{\text{отн}}$, тем ниже степень возможного расслоения частиц твердой фазы в отформованном полуфабрикате. Показатель соотношения этих объемных характеристик по аналогии с процессом прессования предложено называть коэффициентом сжатия $K_{\text{сж}}$, который определяется как $K_{\text{сж}} = (\rho_{\text{отн}}/C_V - 1) \cdot 100\,\%$.

Изложенное подтверждается реальной практикой изготовления различных кварцевых огнеупоров в ОАО «Динур» на основе формовочных систем как с зернистым заполнителем ($C_V = 0{,}85$), так и без него ($C_V = 0{,}75$). Обычный интервал значений пористости полуфабриката при этом составляет 10–12 и 13–15 % ($\rho_{\text{отн}}$ в пределах 0,88–0,90 и 0,85–0,87 соответственно). Исходя из этого, усредненные значения $K_{\text{сж}}$ соответствуют 5 и 15 % соответственно, т. е. отмечается примерно трехкратная разница. Благодаря этому полуфабрикат на основе масс с крупнозернистым заполнителем характеризуется не только пониженной пористостью, но и более равномерной по зерновому составу структурой по сравнению со структурой полуфабриката на основе ВКВС. Дальнейшее совершенствование процесса с целью повышения качества и стойкости кварцевых огнеупоров в конце 90-х годов было достигнуто распространением принципов технологии керамобетона применительно к центробежному формованию. При производстве как защитных труб, так и прямоточных погружаемых стаканов за счет оптимизации исходного зернового состава и режимов формования получена более равномерная по толщине структура материала при содержании крупной фракции (0,063–1 мм) в

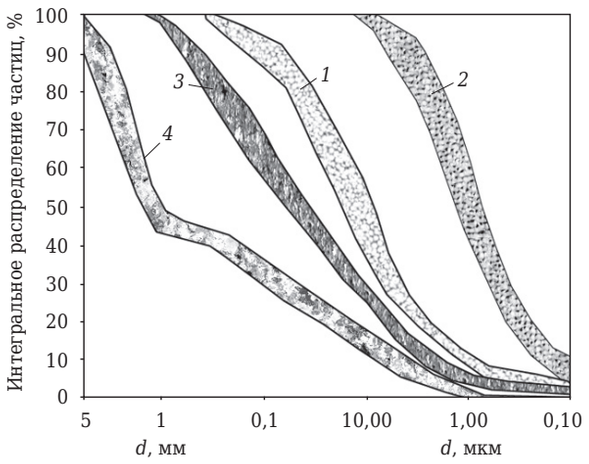

Рис. 2. Области интегрального распределения частиц твердой фазы в суспензиях плавленого кварца после мокрого помола (*1*), в сливе (*2*), в формовочных системах для среднезернистого (*3*) и крупнозернистого (*4*) керамобетона

пределах 55–60 %. Такой среднезернистый керамобетон, полученный на основе формовочных смесей с зерновым составом, соответствующим области *3* на рис. 2, характеризуется пористостью 10–12 % и вместе с тем тонкокапиллярной структурой, определяющей повышенную стойкость в службе.

В случае глуходонных погружаемых стаканов вариация технологии керамобетона состоит в том, что формование их донной части осуществляется из керамобетонной смеси с составом, соответствующим области *4* на рис. 2. Это позволяет сформировать безусадочную структуру донной части изделия, так как в структуре получаемого при этом кварцевого керамобетона объемная доля зернистого (1–10 мм) заполнителя из плавленого кварца достигает 60–70 %, что определяет безусадочность материала дна даже при длительном процессе разливки стали. Материал цилиндрической части изделия при этом формуется по аналогии с составом для прямоточных стаканов (среднезернистый керамобетон). При формировании донной части погружаемых стаканов, отформованных центробежным методом, оптимальные результаты получают при применении керамобетонной смеси из 35–40 % суспензии плавленого кварца плотностью 1,89–1,93 г/см^3 и полифракционного заполнителя из плавленого кварца с размерами частиц 1–5, 1–7, 1–10 мм. Максимальный размер частиц заполнителя определяется диаметром формуемого дна стакана и удобоформуемостью смеси. При диаметре дна 50–70 мм применяют заполнитель фракции 1–5 мм, при диаметре дна 70–90 и > 90 мм — заполнитель фракций 1–7 и 1–10 мм соответственно.

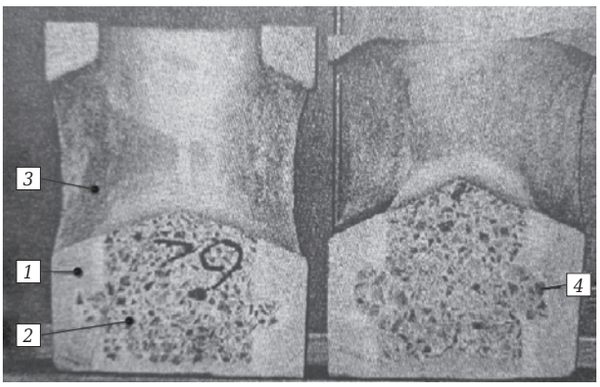

Рис. 3. Разрез донной части кварцевого сталеразливочного стакана с коническим рассекателем: *1* — основная (цилиндрическая) часть стакана; *2* — дно стакана, отформованное из крупнозернистого керамобетона; *3* — конический рассекатель; *4* — лабиринтное уплотнение

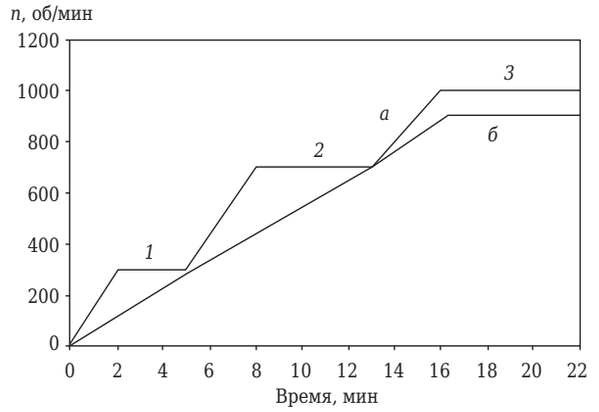

Рис. 4. Скоростные режимы центробежного формования сталеразливочных огнеупоров: *а* — трехступенчатый; *б* — одноступенчатый; остальные обозначения — в тексте

С точки зрения технологии изготовления донной части стаканов различают стаканы с коническим рассекателем и прямым дном. Стаканы с коническим рассекателем после центробежного формования и начального этапа сушки (4–6 ч в естественных условиях) устанавливают раструбом вниз, через боковые окна вводят пористые резиновые вставки до полного смыкания по осевой линии стакана. Приготовленную керамобетонную смесь влажностью 5–6 % вводят до края стаканов, которые затем подвергают выдержке и подсушке в естественных условиях в течение 24 ч. Структурообразование керамобетонного дна достигается за счет частичного обезвоживания смеси по механизму всасывания воды в подсушиваемые стенки стакана и подсушки открытой части дна. Затвердевание смеси отмечается уже при уменьшении ее влажности на 1,0–1,5 %. Структура керамобетонной части сталеразливочного стакана с коническим рассекателем показана на рис. 3. Для формирования керамобетонной донной части в сталеразливочных стаканах с прямым дном стаканы помещаются на металлический стержень, на конце которого устанавливается резиновая прокладка, соответствующая внутреннему диаметру изделия или формуемого дна. Соответствующий объем стакана заполняется керамобетонной смесью, как в первом случае. В донной части стаканов обоих типов в процессе центробежного формования на внутренней поверхности стенки при помощи специальных приспособлений формируются кольцевые впадины, создающие при формовании керамобетонного дна лабиринтное уплотнение (см. рис. 3). Окончательная сушка изделий после формирования их донной части осуществляется при 100–120 °С в течение 2–4 ч.

Наряду с концентрацией, зерновым составом и реотехнологическими свойствами исходной формовочной системы столь же важным в технологии центробежного формования является и его режим. Задача оптимизации режима состоит в получении предельно плотного полуфабриката с одновременным требованием минимальной степени его неравноплотности, что должно достигаться при относительно непродолжительном процессе формования. Обычно применяют трехступенчатый режим формования (рис. 4, область *а*). Практически опробован с положительными результатами и режим, в котором скорость медленно поднимается до максимальной и после этого осуществляется выдержка — одноступенчатый режим (рис. 4, область *б*).

С учетом высокой степени дилатансии режим формования, как показано на рис. 4, осуществляется при ступенчатом или медленном повышении скорости (n или ω). На рис. 4 показаны два режима центробежного формования кварцевых теплозащитных труб с наружным диаметром $Д_н$ = 150 мм, толщиной стенки 25 мм, т. е. с $Д_{вн}$ = 100 мм.

На первоначальном этапе за 2 мин скорость повышается до 300 об/мин с последующей 3-мин выдержкой. На этом этапе окружная скорость ω не превышает 2,3 м/с. В последующем на протяжении 3 мин скорость поднимается до n = 700 об/мин с последующей 5-мин выдержкой. На заключительном этапе процесс осуществляется при n = 1000 об/мин. Исходя из принципа реотехнологического соответствия, выбор минимальных значений n или ω на первом этапе формования обусловлен максимальной дилатансией исходной формовочной системы. Течение столь концентрированных систем возможно только при незначительных напряжениях или скоростях сдвига. На ко-

нечной стадии первого этапа уже достигается конечное уплотнение близлежащего к форме слоя массы (рис. 4, область *1*) с соответствующим уменьшением концентрации, а соответственно, и дилатансии остающейся в подвижном состоянии суспензии (рис. 4, области *2* и *3*). С учетом этого второй этап осуществляется уже при существенно большей скорости. При этом понижается концентрация суспензии, что позволяет вести заключительный этап формования при значительно большей скорости (n = 1000 об/мин). По отношению к наружному диаметру значение ω при этом увеличивается до 7–8 м/с. Однако с учетом того, что перед началом заключительной стадии формования толщина отливки уже приближается к заданной, реальная скорость, исходя из внутреннего диаметра изделия, составляет 5–6 м/с. В случае одноступенчатого режима (см. рис. 4, *б*) увеличение частоты вращения осуществляют при n = 55 об/мин. Выдержку в течение 3–5 мин проводят при $n = 950 \div 1000$ об/мин.

Следует отметить, что в процессе формования по рассмотренным режимам уровень развиваемого центробежного давления в формовочных системах весьма незначителен и на разных скоростных этапах находится в пределах 0,001–0,005 МПа. При столь низких значениях давления или аналогичных уровнях напряжения сдвига нивелируется отрицательный эффект дилатансии, проявляемый обычно предельно концентрированными ВКВС и формовочными системами на их основе [1–4, 24]. Следует отметить, что при прочих равных условиях (зерновой состав, концентрация, режим формования) продолжительность процесса значительно зависит от температуры формовочной системы и формы. Согласно исследованиям [5, 6] и опытам по формованию изделий на ПДЗ повышение температуры с 20–25 до 45–50 °С ускоряет процесс формования в 2–3 раза, т. е. имеется возможность формовать изделия за 10–12 мин.

Для расширения предельных возможностей метода изготовления полуфабриката предельной плотности были проведены исследования и промышленные опытные работы, касающиеся получения мокрым помолом исходных суспензий предельной концентрации плотностью 1,98–2,00 г/см^3 ($C_V = 0,81 \div 0,83$, $W = 8,5 \div 10$ %). Основные принципы получения таких ВКВС и основные их характеристики приведены в публикации [2, с. 296]. На рис. 5 показаны исходный зерновой состав суспензии плавленого кварца, а также формовочной системы с зернистым заполнителем, а также усредненный состав полуфабриката, получен-

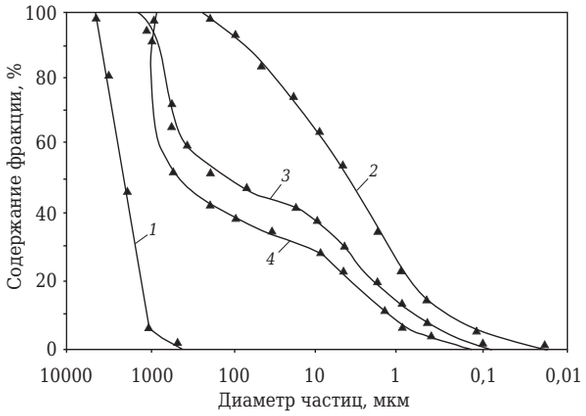

Рис. 5. Интегральные кривые зернового распределения исходного плавленого кварца (*1*), ВКВС плотностью 1,98 г/см^3 после окончания помола (*2*), исходной формовочной системы для центробежного формования погружаемых стаканов (*3*) и частиц твердой фазы в отформованном полуфабрикате (*4*)

ного центробежным методом. Исходная ВКВС плавленого кварца характеризуется повышенной дисперсностью (~ 65 % частиц размером < 10 мкм) и достаточно высокой полидисперсностью (8 % частиц > 100 мкм). В состав ВКВС вводили предварительно смоченный сливом зернистый заполнитель из плавленого кварца с размерами частиц 0,315–1,500 мм в количестве, обеспечивающем содержание этой фракции в смеси около 40 % (кривая *3*). Вследствие этого влажность формовочной смеси была снижена с 9,4 до 6,0 % ($C_V = 0,84 \div 0,85$). Таким образом, объемная концентрация такой формовочной смеси весьма близка к значению $C_{V\text{cr}}$, составляющему для данного случая около 0,89. При этом суммарное содержание частиц крупнее 100 мкм составляло 50 %, а крупнее 63 мкм 55 % (45 % частиц размером < 63 мкм). Формовочную смесь в форму вводили с незначительным избытком ($K_{\text{изб}}$ = 5 %). Как следует из кривой *4* рис. 5, усредненный зерновой состав отливки, полученной центробежным формованием, не столь существенно отличается от зернового состава исходной формовочной системы (кривая *3*). Содержание крупных фракций (> 100 мкм) в отливке повышается только на 10 % с соответствующим пропорциональным уменьшением содержания тонкодисперсных частиц (< 10 мкм). Характерно, что удаленный после формования слив содержал также частицы размерами до 100 мкм.

Во втором опыте по центробежному формованию с применением ВКВС предельной концентрации (рис. 6) по сравнению с ВКВС, показанной на рис. 5, суспензии характеризовались существенно меньшим содержанием тонкодисперсных частиц — около 45 % ча-

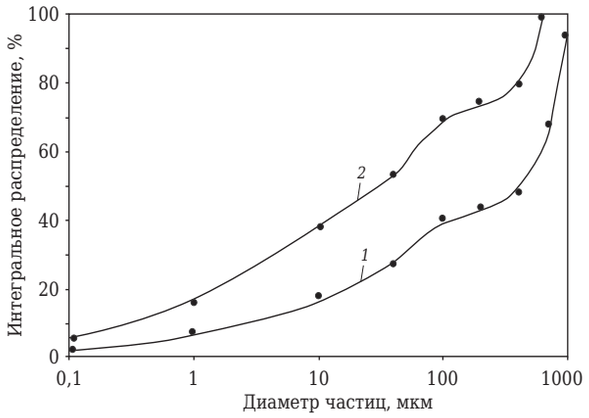

Рис. 6. Интегральные кривые зернового распределения частиц твердой фазы в отливках, полученных центробежным формованием из предельно концентрированной формовочной системы с зернистым заполнителем (C_V = 0,85): *1* — наружный и средний слои отливки; *2* — внутренний слой отливки

стиц размером менее 10 мкм. Центробежная отливка толщиной 30 мм, отформованная по режиму в соответствии с рис. 4, характеризовалась практически равным зерновым составом в наружном и среднем слоях. Эта часть отливки, характеризующаяся одинаковым зерновым распределением (см. рис. 6, кривая *1*), по толщине составляет 22–23 мм, а по объему 80–82 %. Усредненная проба внутреннего слоя отливки (толщиной 7–8 мм, объем ~ 20 %) характеризуется зерновым составом в соответствии с кривой *2* рис. 6. В данном случае по сравнению с формованием на основе суспензий меньшей концентрации отмечается значительно меньшая разница между зерновым составом основной части отливки (кривая *1*) и внутреннего слоя (кривая *2*).

Если содержание частиц крупнее 100 мкм в наружном и среднем слоях отливки около 60 %, то во внутреннем слое оно составляет 30 % при d_{max} = 0,63 мм, в результате чего пористость внутреннего слоя отливки не выше 16,2 %. Пористость остальной части колеблется в пределах 9,7–11,0 %. Таким образом, усредненные значения пористости полуфабриката центробежного формования за счет применения предельно концентрированных формовочных систем с зернистым заполнителем удалось снизить до 10,5–11,0 %. Опытная партия полученных по такой технологии глуходонных сталеразливочных стаканов испытана на Магнитогорском металлургическом комбинате. Установлено, что удельный эрозионный износ опытных стаканов при службе оказался в 1,5 раза меньше, чем у обычных серийных керамобетонных.

Характерными особенностями полуфабриката центробежного формования, полученного из масс с зернистым заполнителем, являются его низкая влажность (4,5–5,5 %) и незначительная усадка при сушке (< 0,05 %). Это позволяет осуществлять довольно интенсивную сушку свежеотформованных изделий. Кварцевые изделия рассмотренного типа обжигают при конечной температуре 1150–1170 °С, что сопровождается незначительной (до 0,2–0,4 %) линейной усадкой. Между тем показатели предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ находятся в пределах 40–60 МПа.

Из всего изложенного очевидно, что по сравнению с центробежным формованием материалов на основе ВКВС даже с повышенной плотностью применительно к формованию изделий из керамобетонных смесей процесс характеризуется целым рядом преимуществ. Прежде всего, благодаря предельному концентрированию исходной формовочной системы представляется возможным резко понизить коэффициент избытка смеси при формовании (с 20–30 до 5–10 %). Если в первом случае отмечается существенное различие плотности материала по толщине (за счет сегрегации частиц по крупности), то во втором оно практически отсутствует. И если в сливе центробежного формования кварцевой керамики из ВКВС d_{max} не превышает 15 мкм, то при формовании из керамобетонных смесей, несмотря на значительно (в 2–3 раза) меньший избыток системы, d_{max} составляет 50–100 мкм.

Центробежное формование изделий на основе ВКВС других материалов

В предыдущей статье настоящей серии [21] было отмечено, что кварцевые сталеразливочные огнеупоры характеризуются пониженной стойкостью при разливке сталей с повышенным (0,8–1,0 %) содержанием марганца. Обычно применяемые для этих марок стали корундографитовые огнеупоры обладают низкими термостойкостью и шлакоустойчивостью, а их рабочий канал при службе зарастает. Кроме того, производство этих огнеупоров связано с применением дорогостоящих изостатических прессов, сложной и дорогостоящей прессоснастки, с глазурованием и высокотемпературным обжигом в специальных средах. В этой связи в нашем изобретении [16] была поставлена задача разработки способа изготовления сталеразливочного огнеупора, который бы одновременно характеризовался как повышенной термостойкостью, так и химической стойкостью при разливке сталей различного состава, а производство без дорогостоящего и

сложного оборудования. В качестве основного метода формования принят центробежный.

Исходным базовым материалом (или системой) для получения изделий является ВКВС (влажность 11–14 %) на основе высокоглиноземистого материала с содержанием 60–90 % Al_2O_3 и полидисперсным зерновым составом (содержание частиц диаметром < 5 мкм 20–45 %). При получении исходных суспензий вводят разжижающие добавки и соблюдают основные принципы, необходимые при получении ВКВС [4]. Для создания термостойкой структуры материала в состав формовочной смеси вводят зернистый заполнитель на основе высокоглиноземистого материала (плавленый или спеченный муллит, шамот высокоглиноземистого состава) с размерами частиц 0,1–5,0 мм и карбид кремния с размерами частиц 0,05–0,50 мм. Общее содержание заполнителя в массе (по сухому веществу) составляет 40–50 %, т. е. содержание тонкодисперсной части, вводимой посредством ВКВС высокоглиноземистого состава, составляет 50–60 %. Соотношение материала в заполнителе: высокоглиноземистый материал 50–70 %, карбид кремния 30–50 %. С учетом высокой теплопроводности SiC в составе материала он выполняет функции компонента, повышающего термостойкость изделия, а также его шлакоустойчивость. Размер частиц заполнителя высокоглиноземистого компонента выбирают, исходя из толщины формуемого изделия. Если для получения относительно тонкостенных погружаемых стаканов (толщина стенки 15–25 мм) применяют заполнитель фракции от 0,05–1,0 до 0,1–2,0 мм, то для толстостенных изделий (50–80 мм) максимальный размер заполнителя может быть повышен до 3–5 мм.

Способ изготовления сталеразливочных огнеупоров предлагаемого состава состоит в следующем. Высокоглиноземистый материал подвергается мокрому помолу при соблюдении технологических параметров, позволяющих получить ВКВС. Для ускорения процесса допускается введение добавки SiO_2 в виде слива [2]. Полученная суспензия подвергается стабилизации гравитационным механическим перемешиванием в течение 8–24 ч. При этом введением щелочных добавок можно корректировать pH суспензии. Максимальная текучесть при постоянной влажности достигается при pH 9,8–10,4.

Заполнители в требуемом соотношении подвергаются смешиванию в смесителе (типа бетономешалки), далее при необходимости вводится слив центробежного литья и перемешивание осуществляется в течение 3–5 мин, затем вводится суспензия. После непродолжительного (5–10 мин) смешения полученную таким образом формовочную систему с низкой влажностью (5–6 %) используют для центробежного формования. Учитывая, что ВКВС высокоглиноземистых материалов, а соответственно, и формовочных систем на их основе характеризуются дилатантным или тиксотропно-дилатантным характером течения, формование изделий осуществляется при скоростных режимах, близких к показанным на рис. 4. Исследовательские работы по изготовлению и испытанию опытных партий погружаемых стаканов были проведены в ОАО «Динур» с использованием ВКВС на основе плавленого муллита, боксита и смеси боксит + плавленый кварц. В качестве заполнителей при этом опробованы муллит, корунд, карбид кремния и их смеси. Одна из партий стаканов, полученных на основе ВКВС муллита и комбинированного муллитокарбидкремниевого заполнителя, показала положительные результаты при разливке марганцовистой стали на НЛМК. Износ стаканов оказался при этом в 1,5 раза ниже, чем у кварцевых керамобетонных.

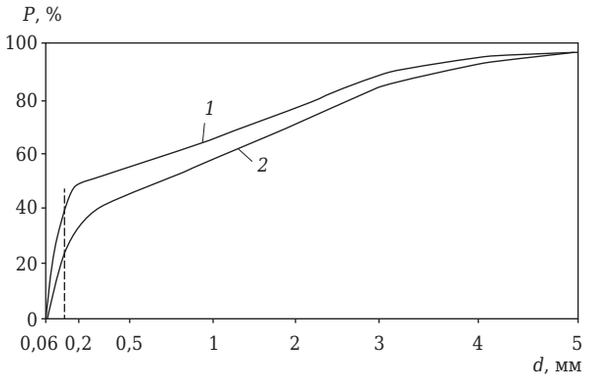

Рис. 7. Интегральные кривые зернового распределения твердой фазы исходной муллитокорундовой керамобетонной смеси (*1*) и сформованного из нее центробежным методом изделия (*2*): *P* — содержание фракций; *d* — диаметр частиц

В процессе отработки технологии огнеупоров с рассмотренными составами впервые было показано, что в случае необходимости центробежным методом могут быть отформованы более массивные и толстостенные огнеупорные изделия (по сравнению со сталеразливочными кварцевыми стаканами и трубами). При этом может быть значительно укрупнен состав огнеупорного заполнителя. Центробежный метод был успешно апробирован применительно к формованию керамобетонов не только кварцевого, но и муллитокорундового, а также муллитокарбидкремниевого составов [22]. Исходные формовочные системы для центробежного формования этих керамобетонов характеризуются

Рис. 8. Центробежноформованное трубчатое изделие диаметром 300 мм из химически стойкого кремнеземистого керамобетона

высоким (массовая доля 50–65 %) содержанием огнеупорного заполнителя с $d_{max} = 1 \div 5$ мм. В процессе формования, сопровождающегося «сжатием» системы (уплотнение средних и крупных частиц с переходом в слив части высокодисперсных), содержание заполнителя в отформованном материале повышается до 65–80 % с соответствующим уменьшением содержания тонкодисперсной (матричной) составляющей, частично удаляемой со сливом.

В качестве характерного примера, иллюстрирующего особенности центробежного способа формования, на рис. 7 сопоставлены интегральные кривые зернового распределения исходной формовочной системы и сформованного материала при изготовлении стакана-коллектора на основе муллитокорундового керамобетона (толщина изделия 45 мм). Исходная формовочная система содержит 40 % тонкодисперсной составляющей, вводимой посредством высококонцентрированной ($C_V \approx 0{,}71$) ВКВС плавленого в ОАО «Динур» муллита с добавкой SiO_2 [26], и 60 % сложного (муллит + + корунд) полидисперсного (0,063–5,000 мм) заполнителя. Смесь этого состава с $C_V = 0{,}84$ и влажностью около 5 % после центробежного формования при незначительной (3–4 м/с) окружной скорости вращения позволяет получить низкопористый (13–14 %) высокоплотный полуфабрикат на основе формовочных систем со значительно более крупным зерновым составом. Из рис. 7 следует, что по сравнению с исходной смесью содержание матричной (вяжущей) составляющей в последнем случае понижается до 22 % с соответствующим ростом доли зернового заполнителя до 78 % (кривая *2*). При этом содержание крупнозернистой фракции 2–5 мм составляет около 30 %.

Применительно к муллитовым керамобетонам исследован метод центробежного формования в сопоставлении с методами вибролитья и вибропрессования. При этом для формования были использованы составы масс, соответствующие кривым *1* и *2* на рис. 7. При влажности масс 4,5–4,8 % методами вибролитья и вибропрессования были получены образцы керамобетонов с исходной (после сушки) пористостью 16–17 % и $\sigma_{сж} = 5 \div 11$ МПа; пористость керамобетонов центробежного формования при аналогичном зерновом составе оказалась заметно ниже (13–14 %). Этот эффект обусловлен специфическими особенностями метода. Если при применении вибролитья и вибропрессования в сформованном керамобетоне, как правило, содержатся макропоры (захваченный воздух), то в керамобетоне, сформованном центробежным методом, этот вид пор отсутствует. Кроме того, при центробежном формовании концентрация твердой фазы в вяжущем (матрице) может быть выше, чем у исходной суспензии. В виброформованных керамобетонах эффект «сжатия» вяжущей фазы (матрицы бетона) не достигается. Кроме того, было установлено, что метод центробежного формования с применением предельно концентрированных формовочных систем представляется весьма перспективным, и не только применительно к изделиям, имеющим форму тел вращения. По этой технологии могут быть получены весьма крупногабаритные блоки, фасонные огнеупоры.

В работах [30, 31] метод центробежного формования изучен при получении спеченной алюмосиликатной керамики. Отличительными особенностями применяемых при этом ВКВС являются более высокая их дисперсность ($d_{max} = 20 \div 30$ мкм) и пониженная степень полидисперсности. Эти отличия обусловлены необходимостью спекания материала со значительной (до 3–5 %) усадкой, что возможно только в случае относительно равномерной дисперсности полуфабриката по толщине стенки. Этим способом получены образцы цилиндрических электроизоляторов не только алюмосиликатного, но и кордиеритового состава [27, 28].

Метод центробежного формования рассматривается в качестве перспективного применительно к технологии строительных кремнеземистых керамобетонов (ВКВС кварцевого песка как вяжущее и полифракционный кварцит или песок в качестве заполнителя). Предварительными экспериментами установлено, что подобные керамобетоны могут оказаться

перспективными в качестве химически стойкого материала при строительстве и эксплуатации городских канализационных магистралей [4, с. 550]. Эта проблема в настоящее время весьма актуальна, так как для применяемых при этом строительных цементных бетонов характерны при эксплуатации их разъедание и разрушение под воздействием выделяющегося сероводорода, образующего в водонасыщенной атмосфере серную кислоту. Кварцевые керамобетоны абсолютно устойчивы по отношению к серной кислоте, что свидетельствует о перспективности их применения для этой цели.

В проведенных нами исследованиях [29, 30] отработаны режимы центробежного формования трубчатых изделий из химически стойкого кремнеземистого керамобетона диаметром 300 мм (рис. 8). При этом содержание заполнителя на основе рядовых песков (0,5–5,0 мм) варьировали в пределах 65–75 %, а содержание ВКВС на основе кварцевого песка — в пределах 25–35 %. Пористость материала при этом составляла 12–15 %. Высокая прочность таких керамобетонов ($\sigma_{сж}$ = 50 ÷ 70 МПа) достигалась введением в исходный состав незначительной (1,0–1,5 %) добавки высокодисперсного порошка силикат-глыбы*. Упрочнение по УХАКС-механизму при этом происходило в процессе сушки при 100–120 °С [4, с. 569].

Все изложенные в статье примеры центробежного формования относились к формовочным системам, отличающимся дилатантным или тиксотропно-дилатантным характером течения. Между тем этот метод может оказаться перспективным и для формования систем, отличающихся сильно выраженным тиксотропным характером течения. Ранее [5, 6] было показано, что на основе скоагулированной и поэтому тиксотропной ВКВС плавленого кварца (понижение pH до 2–3) центробежным формованием можно получить полуфабрикат с меньшей пористостью, чем при шликерном литье. Отсюда следует, что и в ряде других случаев (например, для материалов, образующих суспензии с преимущественным тиксотропным характером течения) при центробежном литье возможно получение полуфабриката с большей плотностью, чем при обычном шликерном литье или прессовании. Так, в одной из японских работ, рассмотренной в публикации [2], отмечается, что на основе водных суспензий Al_2O_3 с добавкой полиакриламмония при центробежном литье получены отливки кажущейся плотностью 2,70–2,73 г/см^3, что значительно выше плотности отливок при шликерном литье (2,40–2,60 г/см^3) и прессовании (2,2 г/см^3). При этом получены трубы длиной 2,5 м и диаметром 15 см. Отмечается возможность изготовления этим способом многослойных и пористых изделий.

Таким образом, впервые в области производства керамических и огнеупорных изделий в широких промышленных масштабах реализован новый и перспективный метод центробежного формования. Применительно к производству кварцевых огнеупоров внедрение этого метода с применением предельно концентрированных систем на основе ВКВС плавленого кварца позволило осуществить значительный скачок в области как качества (стойкости) изделий, так и технико-экономических показателей их производства. Приведены примеры применения центробежного формования в технологии и других материалов и керамобетонов на основе ВКВС.

* Работы проведены совместно с П. В. Дякиным и Д. В. Горбачёвым.

Библиографический список

1. ***Пивинский, Ю. Е.*** Кварцевая керамика / *Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин.* — М. : Металлургия, 1974. — 264 с.

2. ***Пивинский, Ю. Е.*** Кварцевая керамика и огнеупоры. В 2 т. Т. I. Теоретические основы и технологические процессы / *Ю. Е. Пивинский, Е. И. Суздальцев*; под ред. Ю. Е. Пивинского. — М. : Теплоэнергетик, 2008. — 672 с.

3. ***Пивинский, Ю. Е.*** Теоретические аспекты технологии керамики и огнеупоров : избр. тр. Т. 1 / *Ю. Е. Пивинский.* — СПб. : Стройиздат СПб., 2003. — 544 с.

4. ***Пивинский, Ю. Е.*** Керамические вяжущие и керамобетоны / *Ю. Е. Пивинский.* — М. : Металлургия, 1990. — 274 с.

5. ***Пивинский, Ю. Е.*** Изучение центробежного литья керамики. Основные параметры и закономерности процесса / *Ю. Е. Пивинский, Т. И. Литовская, О. Н. Самарина* [и др.] // Огнеупоры. — 1991. — № 11. — С. 2–6.

Pivinskii, Yu. E. Centrifugal casting of ceramics. Main parameters and the regularities of the process / *Yu. E. Pivinskii, T. I. Litovskaya, O. N. Samarina* [et al.] // Refractories. — 1991. — Vol. 32, № 11/12. — P. 551–558.

6. ***Пивинский, Ю. Е.*** Изучение центробежного литья керамики. Свойства отливок / *Ю. Е. Пивинский, Т. И. Литовская, О. Н. Самарина* [и др.] // Огнеупоры. — 1992. — № 3. — С. 6–9.

Pivinskii, Yu. E. Centrifugal casting of ceramics and properties of the castings / *Yu. E. Pivinskii, T. I. Litovskaya, O. N. Samarina* [et al.] // Refractories. — 1992. — Vol. 33, № 3. — P. 138–143.

7. ***Гришпун, Е. М.*** Двадцатилетняя эпоха сотрудничества / *Е. М. Гришпун, Ю. Е. Пивинский* // Новые огнеупоры. — 2007. — № 1. — С. 15–25.

8. ***Ахвердов, И. Н.*** Железобетонные напорные центрифугированные трубы / *И. Н. Ахвердов*. — М. : Стройиздат, 1967. — 164 с.

9. ***Austin, C. R.*** Centrifugal slip casting / *C. R. Austin, G. H. Duncombe* // Bull. Amer. Ceram. Soc. — 1941. — Vol. 20, № 4. — P. 113–116.

10. ***Добровольский, А. Г.*** Шликерное литье / *А. Г. Добровольский*. — М. : Металлургия, 1977. — 240 с.

11. ***Пивинский, Ю. Е.*** Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении : избр. тр. В 3 т. Т. 3 / *Ю. Е. Пивинский*. — СПб. : Политехника, 2012. — 682 с.

12. ***Гришпун, Е. М.*** ВКВС и керамобетоны — прорыв в технологии огнеупоров XXI века / *Е. М. Гришпун, Ю. Е. Пивинский* // Новые огнеупоры. — 2002. — № 2. — С. 28–33.

13. ***Пивинский, Ю. Е.*** Разработка, внедрение в производство и служба кварцевых безобжиговых огнеупоров // *Ю. Е. Пивинский, Т. И. Литовская, О. Н. Самарина* [и др.] // Огнеупоры. — 1989. — № 9. — С. 40–44.

Pivinskii, Yu. E. Development, introduction and service of unfired guartz refractories / *Yu. E. Pivinskii, T. I. Litovskaya, O. N. Samarina* [et al.] // Refractories. — 1989. — Vol. 30, № 9. — P. 572–578.

14. ***А. с. 165289.*** Способ формования керамических изделий / Ю. Е. Пивинский, И. Б. Волчек, Е. В. Рожков ; заявл. 03.04.89 ; опубл. 08.02. 91, Бюл. № 21.

15. ***А. с. 1628460.*** Способ формования сталеразливочных стаканов / И. Б. Волчек, Ю. Е. Пивинский, Е. М. Гришпун, Е. В. Рожков ; заявл. 31.07.89 ; опубл. 15.10.90.

16. ***Пат. 2122534 Российская Федерация.*** Способ изготовления литого сталеразливочного огнеупора / Пивинский Ю. Е., Гришпун Е. М., Рожков Е. В. ; заявл. 24.07.97 ; опубл. 27.11.98, Бюл. № 33.

17. ***Пат. 21009714 Российская Федерация.*** Способ изготовления кварцевых сталеразливочных огнеупоров / Пивинский Ю. Е., Гришпун Е. М., Рожков Е. В., Нагинский М. З. ; заявл. 27.02.97 ; опубл. 23.02.98, Бюл. № 12.

18. ***Пат. 2109713 Российская Федерация.*** Способ изготовления керамобетонных сталеразливочных стаканов / Пивинский Ю. Е., Гришпун Е. М., Рожков Е. В., Нагинский М. З. ; заявл. 27.02.97 ; опубл. 23.04.98, Бюл. № 12.

19. ***Пат. 2272012 Российская Федерация.*** Способ изготовления кварцевых сталеразливочных огнеупоров / Пивинский Ю. Е., Гришпун Е. М. ; заявл. 22.08.05 ; опубл. 20.03.06, Бюл. № 8.

20. ***Пат. 2153481 Российская Федерация.*** Способ изготовления керамобетонных сталеразливочных огнеупоров / Пивинский Ю. Е., Гришпун Е. М., Рожков Е. В. ; заявл. 18.06.98 ; опубл. 27.07.00, Бюл. № 21.

21. ***Пивинский, Ю. Е.*** Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленого кварца. Часть 2. Кварцевые сталеразливочные огнеупоры / *Ю. Е. Пивинский* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 17–23.

22. ***Пивинский, Ю. Е.*** Новые огнеупорные бетоны и вяжущие системы — основополагающее направление в разработке, производстве и применении огнеупоров в XXI веке. Керамические вяжущие и керамобетоны / *Ю. Е. Пивинский* // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 3. — С. 15–24.

23. ***Пивинский, Ю. Е.*** Керамические и огнеупорные материалы : избр. тр. В 2 т. Т. 2 / *Ю. Е. Пивинский*. — СПб. : Стройиздат СПб., 2003. — 668 с.

24. ***Пивинский, Ю. Е.*** Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем / *Ю. Е. Пивинский*. — СПб. : СПбГТИ (ТУ), 2001. — 174 с.

25. ***Пивинский, Ю. Е.*** Реологические и седиментационные свойства керамических суспензий с зернистым заполнителем / *Ю. Е. Пивинский* // Огнеупоры. — 1972. — № 4. — С. 52–57.

Pivinskii, Yu. E. Rheological and sedimentation properties of ceramic suspensions containing granular aggregates / *Yu. E. Pivinskii* // Refractories. — 1972. — Vol. 13, № 3. — P. 264–270.

26. ***Пивинский, Ю. Е.*** Реология в технологии керамики и огнеупоров. Полидисперсность и дилатансия ВКВС смешанного состава / *Ю. Е. Пивинский, Е. А. Дороганов* // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 11. — С. 24–27.

Pivinskii, Yu. E. Rheology in manufacturing ceramics and refractories. Polydispersity and dilatancy of HCBS of a mixed composition / *Yu. E. Pivinskii, E. A. Doroganov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 1998. — Vol. 39, № 11/12. — P. 415–418.

27. ***Пивинский, Ю. Е.*** Получение и некоторые свойства спеченной алюмосиликатной керамики на основе ВКВС. Часть 1 / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Д. В. Горбачёв, С. А. Стрельцов* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 2. — С. 30–41.

Pivinskii, Yu. E. Preparation and some properties of sintered aluminosilicate ceramic based on HCBS. Part I / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, D. V. Gorbachev, S. A. Strel'tsov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 1. — P. 54–63.

28. ***Пивинский, Ю. Е.*** Получение и некоторые свойства спеченной алюмосиликатной керамики на основе ВКВС. Часть 2 / *Ю. Е. Пивинский, П. В. Дякин, Д. В. Горбачёв, С. А. Стрельцов* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 3. — С. 145–154.

Pivinskii Yu. E. Preparation and some properties of sintered aluminosilicate ceramic based on HCBS. Part II / *Yu. E. Pivinskii, P. V. Dyakin, D. V. Gorbachev, S. A. Strel'tsov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 2. — P. 120–128.

29. Строительная технология Пивинского Ю. Е. (колонка главного редактора). // http:www//mirmonolita. Ru/ chief_editor/999999/315/html, 2012.

30. ***Петров В.*** Дом из песка / Липецкая газета. 05.06.2012. — С. 1,2 ; http://www. Lpgzt.ru/ article/23630. html. ■

Получено 24.10.14
© Ю. Е. Пивинский, 2015 г.