

НАУКА – ПРОИЗВОДСТВУ

УДК 666.61

Федоренко Е.Ю., канд. техн. наук, профессор;

Рыщенко М.И., доктор. техн. наук, профессор;

Фирсов К.Н., канд. техн. наук, мл. научн. сотрудник;

Вернигора К.П., научн. сотрудник;

Стариков В.В., канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМОГРАНИТНОЙ ПЛИТКИ НА ОСНОВЕ КВАРЦ-ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ УКРАИНЫ

Среди современных материалов строительной индустрии большим спросом пользуется керамогранит, который характеризуется максимальной плотностью, химической стойкостью, прочностью, износостойкостью и морозостойкостью, что обусловлено плотноспеченной структурой материала. Именно эти свойства керамогранита, наряду с высоким качеством дизайна и экологичностью, обусловили большую популярность изделий, что обеспечило быстрое развитие и распространение технологии по всему миру.

Решающая роль в достижении высокой степени спекания керамогранита принадлежит флюсующим материалам природного происхождения – кварц-полевошпатовому сырью (КПШС). Изготовление керамогранита в Украине предусматривает использование импортных полевошпатовых материалов и осуществляется по заимствованным технологиям на импортном оборудовании. Проблема обеспечения отечественной керамической промышленности полевошпатовым сырьем решается в настоящее время за счет поставок материалов из России и Турции. В то же время Украина имеет собственные значительные запасы пегматитов, а также неограниченные ресурсы гранитоидных пород, составляющих основу Украинского кристаллического щита [1].

Для стабильного функционирования отечественных предприятий в условиях рыночной экономики исключительно важным является не только выпуск конкурентоспособной продукции, но и расширение сырьевой базы производства и решения проблем энергосбережения. В связи с этим необходимыми являются исследования, направленные на разработку отечественно-ориентированной технологии керамогранита с использованием местного кварц-полевошпатового сырья.

Традиционная технология керамогранита базируется на использовании технологических смесей, содержащих повышенное количество КПШС и предусматривает шликерный способ приготовления пресс-порошка, полусухое формование полуфабрикатов и обжиг в поточно-конвейерных линиях при температурах 1200–1250 °С в течение 45–90 минут. Проведенный анализ патентной литературы позволил установить, что существующие разработки в области получения плотно спеченных керамических материалов либо характеризуются недостаточным уровнем спекания, либо требуют высоких температур обжига (более 1250 °С), что противоречит концепции энергосбережения в технологии керамогранита. Это свидетельствует об

актуальности исследований, направленных на углубление представлений о процессах формирования витрифицированных керамических материалов в условиях нестационарной форсированной термообработки.

Целью данной работы является разработка составов масс и технологических параметров получения керамогранита на основе изучения отечественного кварц-полевошпатового сырья Приазовского кристаллического массива и системного анализа факторов, определяющих процесс формирования плотноспеченной керамики при скоростных режимах обжига.

Теоретические исследования осуществляли с привлечением физико-химического анализа систем порообразующих оксидов. Для изучения состава и структуры материалов использовали комплекс современных физико-химических методов анализа (рентгенофазовый, дифференциально-термический, дилатометрический, петрографический, ИК-спектроскопический, гамма-спектроскопический, электронно-микроскопический и химический анализы). Реологические свойства керамических шликеров изучали на вискозиметре Brookfield DV-II+P. Определение физико-химических свойств керамогранитных плиток проводили согласно ISO 1054 и ДСТУ Б.В.2.7-118-2002. Исследования проводились с привлечением методов математического планирования: плана Шеффе и полнофакторного эксперимента, а также статистической обработки данных.

Анализ составов сырьевых материалов, используемых при изготовлении керамогранита [2, 3], показал, что основой для создания керамогранитных масс является система $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ и ее подсистемы. Изучение субсолидусного строения, геометро-топологических характеристик и температур эвтектик элементарных тетраэдров четырехкомпонентной системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ позволило установить, что выбор составов масс должен происходить в пределах элементарного тетраэдра $\text{A}_3\text{S}_2-\text{NAS}_6-\text{KAS}_6-\text{S}$, включающего фазы полевых шпатов, кварца и муллита, необходимых для получения плотноспеченной структуры керамогранита и его упрочнения за счет муллитизации. Сравнительно большой объем этого тетраэдра (14,3%), рассчитанная температура эвтектики (1039 °С) и достаточно широкая эвтектическая зона свидетельствуют о технологичности составов, находящихся в пределах этого тетраэдра. Детальный анализ характеристик выбранного тетраэдра позволил установить,

что область самых низких эвтектических температур располагается вблизи грани NAS_6-KAS_6-S (рис. 1). Проектирование составов керамогранитных масс в пределах выбранной области позволит достичь заданных свойств керамогранита за счет образования в нем муллита при относительно невысоких температурах термообработки (до 1200 °С), а также обеспечит стабильность и воспроизводимость свойств.

В ходе исследований проводилось комплексное исследование составов и свойств кварц-полевошпатовых материалов наиболее мощных проявлений КПШС Приазовского кристаллического массива [4, 5]. Учитывая то, что технологические свойства КПШС обусловлены особенностями морфологии пород, был проведен петрохимический анализ опытных материалов по методу А.Н.Заварицкого [6]. Установлено, что КПШС Елисеевского, Волновахского и Новогнатовского месторождений принадлежит к пегматитовому сырью, породы Анадольского, Андреевского, Мирного, Донского, Тельмановского, Каранского месторождений – к гранитам, материалы Красновского, Октябрьского и Старокрымского месторождений являются сиенитами, а Хлебодаровское сырье представлено габбро. При этом Долинский гранит и Новогнатовский пегматит классифицированы как сырье, пересыщенное кремнеземом и обогащенное щелочами ($\Sigma R_2O = 9,4-10,6$ масс.%), тогда как Красновский сиенит не содержит свободного кварца, пересыщенный глиноземом и отличается повышенным содержанием щелочных окислов ($\Sigma R_2O = 14,7^{\circ}$ масс.%). Изучение радиационных свойств опытного кварц-полевошпатового сырья позволило отнести эти материалы к 1 классу радиационной безопасности ($C_{эф} \leq 370^{\circ} \text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), что свидетельствует о возможности их неограниченного использования в качестве сырья при изготовлении строительных материалов.

Проведение теоретических исследований позволило осуществить прогноз перспективы использования КПШС исследуемых месторождений. На основе анализа сведений о количестве расплавов, образующихся при заданных условиях термообработки опытных плавней, а также их свойств, определяю-

щих интенсивность спекания керамогранитных масс (вязкости, поверхностного натяжения, активности), с использованием разработанного графо-аналитического метода [7] осуществлена прогнозная оценка флюсующей способности кварц-полевошпатовых пород. Установлено, что при температуре 1200 °С максимальное количество расплава (свыше 80 %) образуют Волновахский, Елисеевский и Новогнатовский пегматиты, а также Долинский гранит и Красновский сиенит. При этом минимальными показателями вязкости характеризуются расплавы Новогнатовского пегматита, Долинского и Тельмановского гранитов, Красновского сиенита и Хлебодаровского габбро. Минимальное поверхностное натяжение имеют расплавы Новогнатовского пегматита, Долинского, Мирного и Анадольского гранитов, а также Красновского сиенита. Наибольшая активность (способность растворять твердую фазу) характерна для расплавов Новогнатовского пегматита, Донского и Мирного гранитов, Красновского сиенита и Хлебодаровского габбро. Комплексный анализ полученной информации позволил определить, что наибольшей эффективностью с точки зрения интенсификации спекания керамогранитных масс в условиях форсированной термообработки характеризуются Новогнатовский пегматит, Красновский сиенит, Долинский, Анадольский и Мирный граниты. Каждая из рассмотренных пород может быть использована в технологии плотноспеченных керамических материалов, в частности керамогранита. Однако с целью получения светлоокрашенных изделий для разработки керамогранитных масс были выбраны Долинский гранит, Новогнатовский пегматит и Красновский сиенит.

Экспериментальные исследования плавкости пород показали, что при 1200 °С выбранные КПШМ образуют большое количество расплава. При этом уровень витрификации продуктов обжига увеличивается в ряду: Новогнатовский пегматит; Долинский гранит; Красновский сиенит. Расплавы опытных материалов имеют светло-серый цвет и характеризуются отсутствием темноокрашенных включений.

Изучение измельчаемости КПШМ показало, что время помола, необходимое для достижения заданной степени измельчения (остаток на сите № 0056 не более чем 1,5 масс.%), преимущественно зависит от содержания в материале свободного кварца. Установлено, что для измельчения сиенита продолжительность помола составляет 5 часов, тогда как длительность помола гранита и пегматита достигает 8 часов. Это дает основания для сокращения времени помола технологических смесей, содержащих в качестве плавня сиенит, отличающийся отсутствием свободного кварца.

С целью установления возможности изготовления керамогранита при использовании глин разного минерального состава исследовано глинистое сырье, используемое в производстве керамогранита на отечественных предприятиях – глины Веселовского,

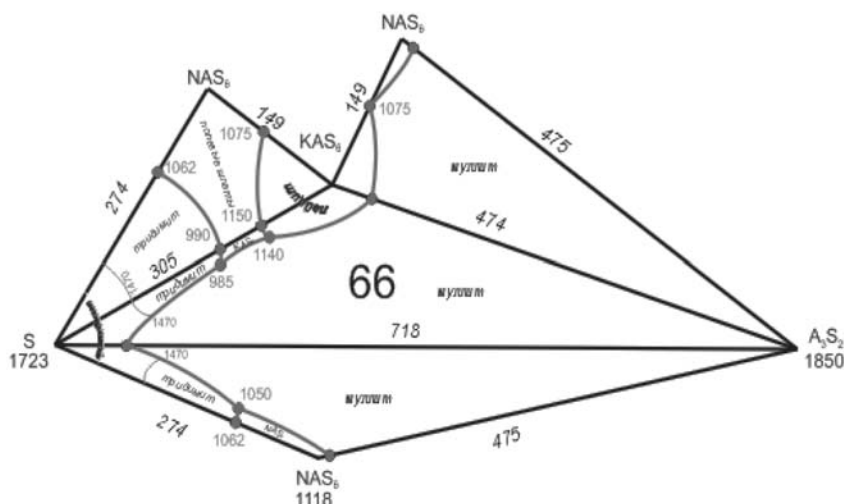


Рис. 1. Развертка элементарного тетраэдра $A_3S_2-NAS_6-KAS_6-S$

Добропольского, Андреевского и Дружковского месторождений. Изучение химико-минерального состава и керамико-технологических свойств глин показали, что они относятся к полуокислему, умеренно пластичному, полиминеральному сырью среднетемпературного спекания. Основными породообразующими минералами этих глин являются гидрослюда, каолинит и кварц, соотношение которых определяют принадлежность глин к тугоплавким либо огнеупорным. В ряде случаев отмечено также присутствие монтмориллонита в количестве до 7 масс.%. Установлено, что при скоростном обжиге с максимальной температурой 1200 °С данные глины не образуют плотноспеченного материала, поскольку продукты термообработки характеризуются водопоглощением в пределах 2,5–4,5 %.

Определение зависимостей эксплуатационных и технологических свойств керамогранита от минерального состава глины и калиевого модуля плавня (K_2O/Na_2O) осуществлялось с использованием модельных плавней, калиевый модуль которых изменялся в широких пределах (от 0,05 до 6,58). При этом суммарное количество щелочных окислов в составе модельных плавней, а также количество свободного кварца сохранялось на постоянном уровне ($R_2O = 11$ масс.% и $SiO_2(своб) = 16$ %). Исследования показали, что при уменьшении калиевого модуля ($K_M < 1,5$) наблюдается заметный рост водопоглощения продуктов обжига, полученных с использованием как каолинито-гидрослюдистых глин, так и полиминеральной монтмориллонитсодержащей глины. Установлено, что необходимым и достаточным условием получения качественного керамогранита на основе каолинито-гидрослюдистых глин является значение $K_M 1,5 \div 3,0$. При использовании полиминеральных глин, содержащих монтмориллонитовую составляющую, K_M должен находиться в пределах 2,5 \div 3,5. Выполнение этих условий обеспечивает получение керамогранита с высокой степенью спекания ($W < 0,5$ %)

без признаков высокотемпературной деформации при использовании глинистого сырья разного минерального состава.

Исследование процесса спекания модельных масс, содержащих глины и плавни разного минерального состава в соотношении 1:1, позволило установить, что минимальным водопоглощением, максимальной прочностью и светлой окраской характеризуются образцы, полученные с использованием массы, содержащей сиенит и огнеупорную каолинито-гидрослюдистую глину (Веско-Экстра). Это, а также тот факт, что Красновский сиенит характеризуется максимальной флюсующей способностью и быстрее измельчается, позволяет рекомендовать его использование в качестве флюсующей составляющей керамогранитных масс, что позволит сократить расходы энергии на стадиях подготовки сырья и обжига изделий.

В то же время относительно высокая кажущаяся энергия активации спекания керамогранитных масс ($Q_{каж} = 15 \div 25$ кДж/моль) свидетельствует о необходимости интенсификации процесса спекания. В связи с этим в дальнейшем исследовали влияние кальций- и магнийсодержащих добавок на спекание модельных масс. Сравнительный анализ свойств продуктов термообработки смесей, содержащих сиенит и карбонатные добавки (кальцит, магнезит либо доломит), показал, что минимальная температура (1100 °С), при которой отмечен нулевой уровень водопоглощения, наблюдается для образцов с кальцитом. Образцы с магнезитом достигают нулевого водопоглощения при 1150 °С. При этом наблюдается существенное уменьшение размеров образца, что свидетельствует о повышенном поверхностном натяжении образующегося расплава. Образцы, содержащие доломит, приобретают нулевое водопоглощение уже при 1125 °С и характеризуются незначительной усадкой. Исследованиями процесса плавления смесей сиенита с разными карбонатными добавками определена це-

лесообразность использования добавок доломита, который не только ускоряет образование расплава, но и способствует последующей объемной кристаллизации. ИК-спектры продуктов термообработки сиенита и его смеси с добавкой 15 масс.% доломита отличаются большой диффузностью (рис. 2), что свидетельствует о неупорядоченности структуры расплава, образующегося при термообработке. Присутствие на спектрах сиенита с добавкой доломита слабых диффузных полос в области 710–780 см⁻¹ и 500–550 см⁻¹ указывает

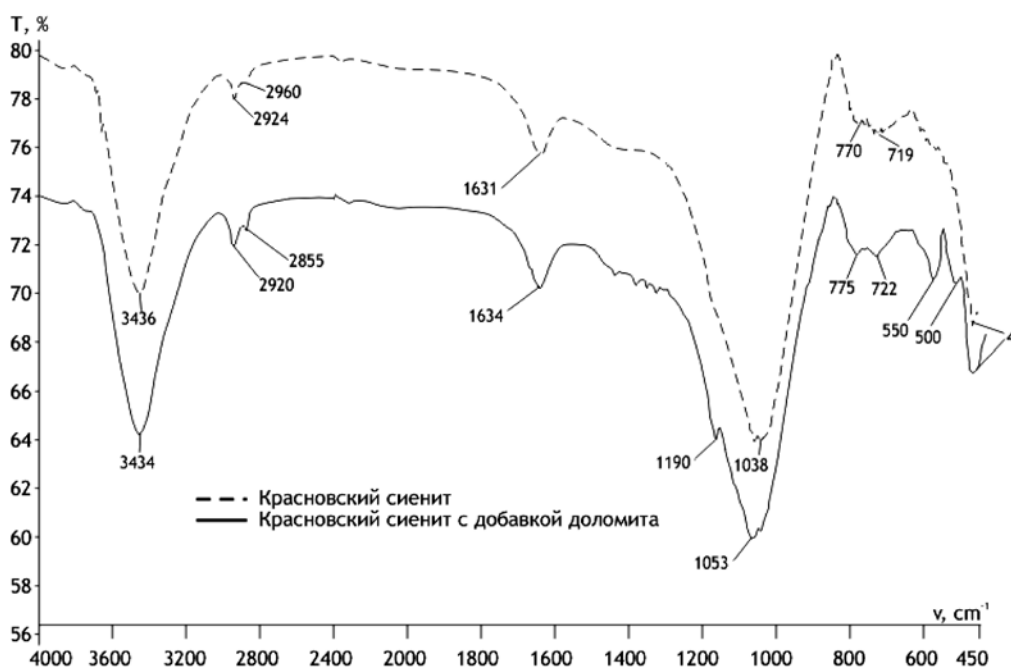


Рис. 2. ИК-спектры продуктов термообработки Красновского сиенита

на наличие связей, которые отвечают зародышам муллитовой фазы. Таким образом, установлено, что роль доломита заключается не только в более раннем образовании расплава сиенита, но и в создании условий для частичной деполимеризации алюмокремнекислородного каркаса стеклофазы и формирования зародышей муллитовой фазы, возникновение которых на поверхности раздела фаз неоднородного по составу расплава является наиболее энергетически выгодным. Именно в этом проявляется комплексное влияние оксидов CaO и MgO, которое реализуется при использовании доломита одновременно в роли модифицирующей и минерализующей добавки.

Оптимальное количество добавки доломита определялось с использованием планов Шеффе. В результате проведенных исследований определена область составов масс, позволяющих получить материалы с заданным уровнем водопоглощения ($W < 0,5 \%$) и прочности на изгиб ($\sigma_{изг} > 27$ МПа), масс. %: глина огнеупорная каолинито-гидрослюдистая – 55÷65; сиенит – 30÷38; доломит – 3÷9. Учитывая, что отечественные предприятия используют глинистое сырье разного минерального состава, для каждой конкретной ситуации необходимо определить состав композиции, которая обеспечит получение заданного уровня свойств керамогранитной плитки. Для установления оптимальной области составов керамогранитных масс при использовании каолинито-гидрослюдистых и полиминеральных монтмориллонитсодержащих глин был реализован полнофакторный эксперимент типа 23. Факторами были выбраны содержание глинистой составляющей (X), количество добавки доломита (Y) и температура термообработки (Z), которые варьировались в следующих пределах: содержание глины 55÷65 масс.%; содержание доломита 3÷9 масс.%; температура обжига 1150÷1200 °С. В результате обработки результатов эксперимента получены уравнения регрессии, адекватно описывающие зависимости водопоглощения и прочности на изгиб от указанных технологических факторов. Зависимости с кодируемыми факторами имеют следующий вид:

- для масс с огнеупорной каолинито-гидрослюдистой глиной

$$W, \% = 2,014 + 0,346X + 0,013Y - 1,465Z - 0,172XY - 0,525XZ + 0,151XY \quad (1)$$

$$\sigma_{изг}, \text{ МПа} = 25 + 2,394X + 1,236Y + 3,931Z + 1,669XY + 0,724XZ + 1,381YZ + 1,587XYZ \quad (2)$$

- для масс с тугоплавкой каолинито-гидрослюдистой глиной

$$W, \% = 0,956 + 0,136X - 0,061Y - 0,488Z + 0,024XY - 0,238XZ - 0,012YZ + 0,032XYZ \quad (3)$$

$$\sigma_{изг}, \text{ МПа} = 24,722 + 0,891X + 0,403Y + 3,653Z + 0,384XY + 0,709XZ + 0,622YZ + 0,616XYZ \quad (4)$$

- для масс с тугоплавкой полиминеральной монтмориллонитсодержащей глиной

$$W, \% = 0,602 - 0,053X - 0,096Y - 0,177Z - 0,072XZ - 4,375 \cdot 10^{-3}XYZ \quad (5)$$

$$\sigma_{изг}, \text{ МПа} = 24,182 + 1,881X + 0,119Y + 2,831Z + 0,618XY + 0,832XZ + 0,443YZ + 0,344XYZ \quad (6)$$

С использованием представленных зависимостей разработаны составы масс, в результате обжига которых при 1170°С получены образцы керамогранита, с комплексом высоких эксплуатационных свойств, отвечающих требованиям стандарта ISO 13006:1998 (табл. 1). В качестве оптимального рекомендован следующий состав массы: 64 масс. % огнеупорной каолинито-гидрослюдистой глины (Веско-Экстра), 28 масс. % Красновского сиенита и 8 масс. % Новотроицкого доломита. Разработанная сырьевая композиция успешно прошла лабораторно-промышленные испытания и патентную экспертизу. На состав керамогранитной массы получен патент Украины [8].

Изучение фазового состава полученного керамогранита показало его соответствие области системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, выбранной для проектирования составов керамогранитных масс. Анализ рентгенограммы (рис. 3) позволил установить наличие в образце муллита, реликтового кварца и остатков полевых шпатов. Диффузность рефлексов муллита свидетельствует о малых размерах кристаллических новообразований, что также подтверждено данными электронно-микроскопических исследований. На снимках образца керамогранита (рис. 4) зафиксирован муллит разных форм и степени совершенства: призматический муллит размером 0,4÷1,0 мкм, образованный глинистой составляющей, и обширные скопления переплетенных игольчатых кристаллов микрокристаллического муллита размером 0,05÷0,3 мкм, наполняющих стеклофазу. Формирование такой структуры в результате создания условий для возникновения неоднородного расплава,

способного к последующей быстрой кристаллизации, обуславливает самоармирование стеклофазы и обеспечивает получение дисперсноупрочненного материала.

Учитывая, что технология керамогранита предусматривает шликерную подготовку массы, в ходе исследований был проработан вопрос разжижения водно-глинистых дисперсий, содержащих разное по минеральному составу глинистое сырье. Разработана разжижающая добавка комплексного действия, содержащая 82 масс. % триполифосфата натрия, 8 масс. % лигносульфоната натрия и 10 масс. %

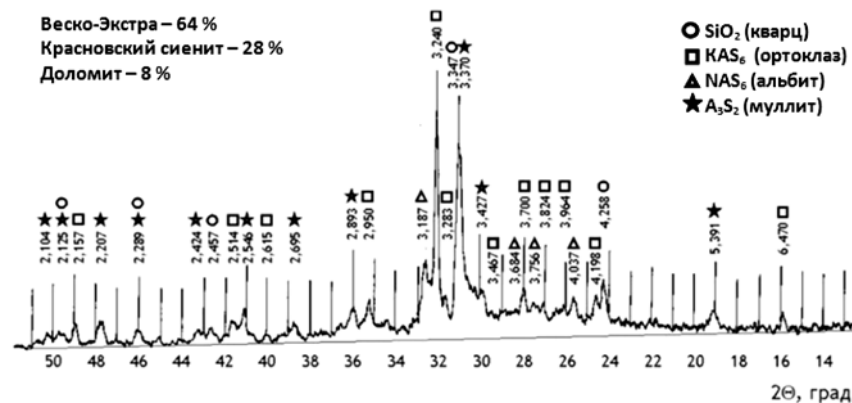


Рис. 3. Рентгенограмма керамогранита, полученного в результате обжига при 1150 °С

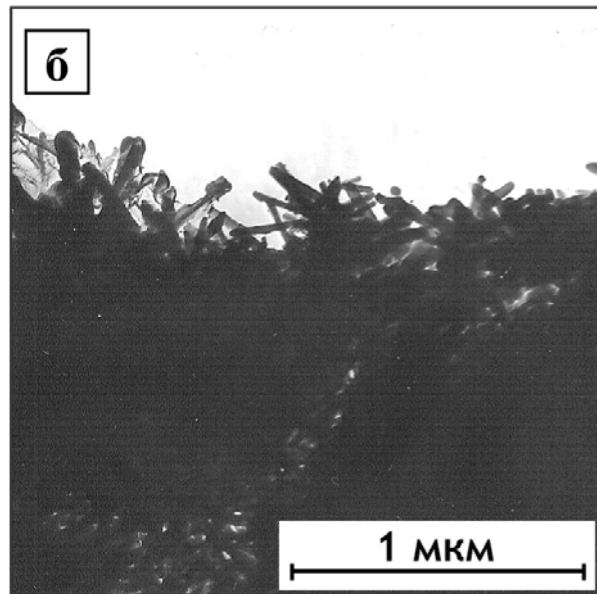
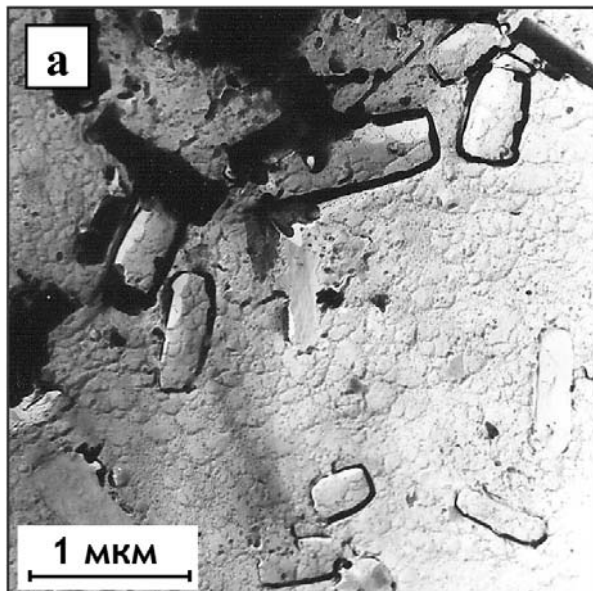


Рис. 4. Микрофотоснимки образцов керамогранита

оксиэтилированного алкилфенола (неонол АФ₉₋₁₂). Установлены зависимости концентрации комплексной разжижающей добавки (КРД) от минерального состава глинистого компонента шликеров, влажность которых составляла 32 %. Установлено, что для достижения необходимого уровня текучести керамогранитного шликера (15 с) и эффективной стабилизации системы в разжиженном состоянии, концентрация КРД в случае использования каолинито-гидрослюдистых глин составляет 0,19 масс.% (сверх 100 % на сухое вещество), в то время как при использовании полиминеральных глин, содержащих до 20 % монтмориллонита, концентрация КРД должна быть увеличена до 0,8 масс.% (сверх 100 % на сухое вещество). Показано, что по сравнению с жидким стеклом, применяемым на отечественных предприятиях, предложенный разжижитель является более активным и препятствует тиксотропному упрочнению шликера.

С целью определения оптимального режима обжига для разработанных керамогранитных масс проведены dilatометрические исследования (рис. 5), результаты которых показали, что масса оптимального состава характеризуется пониженной температурой начала спекания, а ее полное спекание до водопоглощения 0,01 % происходит при 1170 °С. Кратковременное замедление спекания в интервале температур 1015–1050 °С связано с увеличением вязкости стеклофазы, вызванной образованием муллита.

На участке охлаждения dilatометрической кривой отсутствуют экстремумы, что свидетельствует о возможности форсированного снижения температуры при охлаждении изделий. С учетом полученных данных для обжига разработанных керамогранитных масс рекомендован режим, который предусматривает быстрый нагрев (105 °С/мин.) до 850 °С и более медленное (65 °С/мин.) повышение температуры в интервале 850–1170 °С, что обеспечит беспрепятственное удаление продуктов декарбонизации доломита и образования необходимого для спекания количества расплава. Изотермическая выдержка (17 мин.) при температуре обжига 1170 °С является достаточной для достижения максимального уровня спекания материала. Охлаждение изделий до температуры 1000 °С должно происходить с умеренной скоростью 65 °С/мин., поскольку при этом материал переходит из пиропластического состояния в твердое. После этого возможно форсированное (200 °С/мин.) охлаждение изделий

Таблица 1
Оптимальные составы керамогранитных масс и свойства образцов

Содержание компонентов масс, масс. %	Температура обжига, °С	Водопоглощение W, %	Предел прочности на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа	Износостойкость (потери при трении), мм ³
глина каолинито-гидрослюдистая огнеупорная – 59–65 доломит – 4–9 сиенит – 26–33	1170–1200	0,3–0,5	35,5–38,0	138
глина каолинито-гидрослюдистая тугоплавкая – 61–65 доломит – 3–9 сиенит – 27–31	1170–1200	0,3–0,5	29,5–32,0	143
глина полиминеральная монтмориллонит-содержащая – 59–65 доломит – 3–9 сиенит – 26–36	1170–1200	0,2–0,5	27,0–30,0	140

до 600 °С. На финальном этапе охлаждения должно быть замедлено до 35 °С/мин., особенно в тех случаях, когда сырьевые материалы содержат повышенное количество свободного кварца.

Результаты апробации разработок в условиях ЗАО «Zeus Ceramic» (г. Славянск) подтвердили возможность получения на основе отечественного кварц-полевошпатового сырья керамогранитных изделий, отвечающих по физико-механическим и эксплуатационным свойствам международному стандарту ISO 13006:1998. Рекомендованные технологические параметры производства позволяют получить конкурентоспособные керамогранитные изделия по энергосберегающей технологии. Удельный экономический эффект от внедрения разработанной керамогранитной массы составит 1,72 грн/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурський Д.С., Єсипчук К.Ю., Калінін В.І. та ін. Металічні та неметалічні корисні копалини України. Том.2 Неметалічні корисні копалини.– Київ-Львів: Центр Європи, 2006.– С. 174–187
2. Гранитоидные породы Приазовья / Под ред. Ю.Ю.Юрка.–К.: Наукова думка, 1964. – 143 с.
3. King A.G.Ceramic technology and processing.– Norwich, NY:Noyes Publ., 2002. – 512 p.
4. Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Фірсов К.М. та ін. Вивчення властивостей гранітів та пегматитів Приазов'я з метою використання в технології склоке-

УДК 666.972; 69.059.4

Чернявский В.Л., доктор техн. наук, профессор;

Гуркаленко В.А., канд. техн. наук, доцент;

Гасанов А.Б., канд. техн. наук, доцент, Харьковский государственный технический институт строительства и архитектуры, г. Харьков

СПОСОБНОСТЬ АБИОТИЧЕСКИХ СИСТЕМ К АДАПТАЦИИ

Сохранительные свойства систем вообще и абиотических в частности позволяют им в изменяющихся условиях окружающей обстановки сохранять свои функциональные характеристики, поддерживая стационарное (квазистационарное) неравновесное состояние. При этом обязательное (по Бернару) для адаптации биологических систем «условие постоянства внутренней среды» в отношении технических объектов является вовсе необязательным, скорее наоборот – более эволюционно плодотворной является реализация (по Растригину) «условия изменчивости внутренней среды объекта».

Сложная система представляет собой составной объект, части которого можно рассматривать как единое целое в соответствии с определенными принципами либо связанные между собой заданными отношениями. Понятие «сложная система» широко

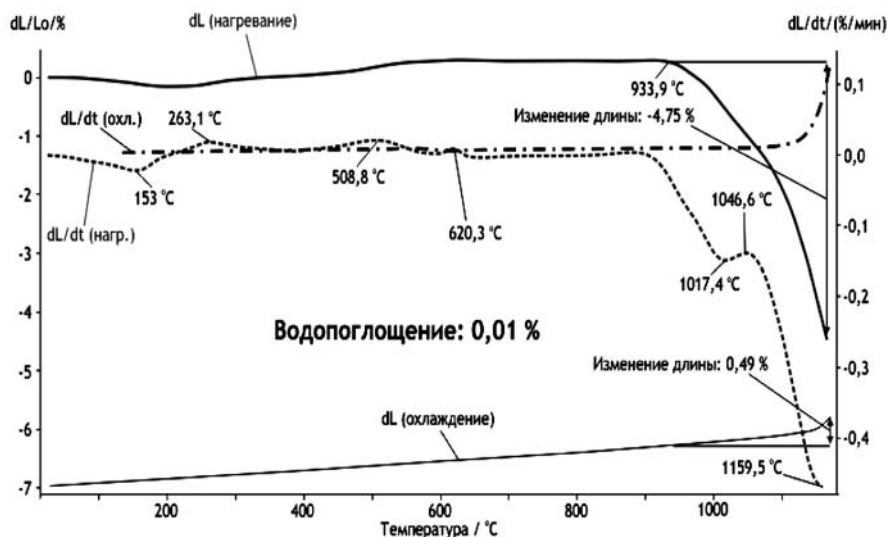


Рис. 5. Дилатогрaмма керамогранитной массы

рамічних виробів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1 (43). – С. 60–64

5. Федоренко Е.Ю. К вопросу о прогнозировании технологических свойств фельдшпатоидных пород в строительном материаловедении // Керамика: наука и жизнь, 2008. – № 2. – С. 49–57

6. Заварицкий А.Н. Введение в петрохимию изверженных горных пород. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 400 с.

7. Федоренко О.Ю. Прогнозна оцінка флюсуючої здатності сировини для використання в технології клінкерних виробів // Вісник НТУ «ХПІ», 2007. – №8.– С. 107–115.

8. Пат. 46210 Україна. Керамічна маса для виготовлення білого керамограніту / Рищенко М.І, Федоренко О.Ю., Фірсов К.М. та ін. – № u200906741; заявл. 26.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23.

используется в системотехнике, системном анализе, при исследовании операций в системном подходе в различных областях науки и техники. Сложные системы можно расчленить (не обязательно единственным образом) на конечное число частей, называемыми подсистемами высшего уровня; каждую такую подсистему можно, в свою очередь, расчленить на конечное число более мелких подсистем и т.д., вплоть до получения подсистем первого уровня, т.н. элементов сложных систем, которые либо объективно не подлежат расчленению на части, либо относительно их дальнейшей неделимости имеется соответствующая договоренность. Таким образом, подсистема, с одной стороны, сама является сложной системой (для подсистем низшего уровня), состоящей из нескольких элементов, с другой стороны, она – элемент системы «старшего» уровня.