

МРНТИ 61.35.29

Э.З. Дархан<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
А.А. Анарбаев<sup>2</sup>



<sup>1</sup>Докторант, <sup>2</sup>Д-р. техн. наук, профессор

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3420-9465> <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0019-4381>



<sup>1,2</sup>Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,



Шымкент, Казахстан



<sup>1</sup>[assel04.94@mail.ru](mailto:assel04.94@mail.ru)

<https://doi.org/10.55956/CCXK5815>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОСИЛИКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМОГРАНИТА

**Аннотация.** Разработка керамогранита с улучшенными свойствами на основе местного сырья с использованием микросилики. Рассмотрена актуальность разработки эффективных технологий производства керамогранита в связи с потребностью керамической промышленности в инновационных материалах и ограниченностью ресурсов. Определена цель исследования: создание керамогранита с повышенными характеристиками на базе местного сырья Туркестанской области с применением микросилики – отхода кремниевого производства. Проведена оценка минерального сырья региона, изучено влияние температуры обжига (1050-1250°C) и дисперсности частиц на свойства материала, а также разработаны составы масс с различным содержанием микросилики. Установлено, что введение 2% микросилики и обжиг при 1250°C позволяют получить керамогранит, соответствующий стандарту ISO 13006: прочность при изгибе – 41,5 МПа, водопоглощение – 0,02%, морозостойкость – 107 циклов. Выявлена перспективность использования микросилики для развития отечественной керамической промышленности, расширения ассортимента конкурентоспособной продукции и утилизации техногенных отходов.

**Ключевые слова:** микросилика, керамогранит, морозостойкость, водопоглощение, прочность при изгибе, температура спекания.



Дархан, Э.З. Исследование влияния микросилики на фазовый состав и физико-механические свойства керамогранита [Текст] / Э.З. Дархан, А.А. Анарбаев // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №1(91). – С.405-417. <https://doi.org/10.55956/CCXK5815>

**Введение.** Получение высококачественных и прочных керамических материалов, в частности керамогранита на основе местного природного минерального сырья, является актуальной научной и практической задачей. Прочность и долговечность данного материала в значительной степени определяются повышенными показателями сопротивления сжатию и морозостойкости. Особый интерес представляет керамогранит, включающий кварц, полевошпат и каолин, обладающий уникальным сочетанием высокой механической прочности и химической стойкости. Его микроструктура,

характеризующаяся наличием крупных зерен кварца, кристаллов муллита и аморфной силикатной фазы, предопределяет совокупность эксплуатационных свойств.

В настоящее время для облицовки полов и стен широко применяются различные материалы: природные декоративные камни (гранит, мрамор, сланец и др.) [1]; кварцево-смолистые композиты, известные как инженерный или агломерированный камень [2,3]; керамика, керамогранит и фарфор [4,5]; твердые композиты на основе тригидроксида алюминия [6,7]; бетон и древесина [8]. Ключевыми требованиями к таким материалам являются устойчивость к воздействию тепла, влаги, пятен, механическим повреждениям и простота обслуживания [9]. Совокупность этих требований, наряду с высокой долговечностью и эстетичностью, обусловила использование жестких материалов (гранита, инженерного камня, керамогранита) в наиболее ответственных сферах применения, включая не только столешницы, но и навесные фасадные панели, интерьерные и экстерьерные покрытия, а также мебельные элементы [9,10].

Интенсивное развитие керамической промышленности привело к значительному росту потребления глинистого сырья, что вызвало проблему его чрезмерной эксплуатации и негативного воздействия на окружающую среду. Так, производство керамической плитки требует большого количества флюсов (до 50–60 % по массе). В этой связи особую значимость приобретает переработка и повторное использование промышленных побочных продуктов (метакаолина, золы, кремнезема), обладающих благоприятным соотношением оксидов кремния и алюминия, что делает их перспективным сырьем для керамики. Таким образом, у керамической промышленности имеются широкие возможности для устойчивого использования промышленных отходов в качестве альтернативного сырья.

Процесс получения керамогранита включает несколько стадий, для которых традиционно применяются туннельные роликовые печи с зонами сушки, предварительного нагрева, обжига, быстрого и медленного охлаждения, а также конечного охлаждения [11,12]. Однако на стадии обжига возможно формирование дефектов, таких как наколы и кратеры. Согласно литературным данным [13], при спекании в присутствии жидкой фазы углеродсодержащие материалы на высоких температурах проявляют восстановительные свойства. Уже при 700°C начинается образование новых кристаллических фаз на основе SiO<sub>2</sub>, силикатов и алюмосиликатов. При дальнейшем нагреве до 800–950°C происходит разложение карбонатов и доломита с выделением CO<sub>2</sub>, а также термическое разложение сульфатов и фторидов. При достижении 1150–1200°C благодаря присутствию полевых шпатов, богатых щелочными элементами, формируется жидкая фаза, которая заполняет поры, растворяет оксиды глинистых минералов и вызывает усадку и уплотнение массы.

Среди породообразующих минералов земной коры особую роль играют полевые шпаты, каолин (состоящий преимущественно из каолинита Al<sub>4</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>8</sub>) [12], а также кварц - один из наиболее распространенных минералов магматических пород [13]. Значимым минералом является муллит (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>), образующийся при термическом разложении каолинита выше 950°C [14]. Он является основным кристаллическим компонентом синтетического керамогранита. Примеси оксидов железа, вступая во взаимодействие с другими оксидами, придают керамограниту цветовые оттенки от розового до коричневого [15].

В результате высокотемпературного обжига часть кварца сохраняется в неизменном состоянии, в то время как метакаолинит, образующийся при дегидратации каолинита, трансформируется в муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) [16]. Одновременно происходят и другие фазовые превращения, определяющие окончательный состав керамического изделия [17]. Недостаток оксида алюминия в сырьевой смеси может приводить к образованию несвязанного аморфного  $\text{SiO}_2$ . Для увеличения выхода муллита в состав массы вводят дополнительное количество  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Реакции в температурном интервале 25–1200°C способствуют формированию муллита, придающего керамограниту такие свойства, как высокая прочность, твердость, термостойкость и износостойкость [18-25].

Вместе с тем, до настоящего времени недостаточно изучено влияние микросилики – побочного продукта кремниевого производства - на свойства керамогранита. Оптимизация технологического процесса с использованием микросилики в качестве кремнийсодержащего компонента позволяет формировать благоприятный фазовый состав и микроструктуру, обеспечивая повышение прочности и твердости материала. Полученные результаты подтверждают перспективность применения микросилики в производстве высококачественных керамических изделий, а также ее значимость для развития экологически ориентированных технологий.

**Условия и методы исследований.** Для проведения исследования порошковые смеси гомогенизировались во влажном состоянии в лабораторной мельнице в течение 30 минут с целью обеспечения равномерного распределения частиц. Полученная суспензия подвергалась сушке при температуре 90°C в течение 2 часов, после чего прессовалась в прямоугольные формы под давлением 5 МПа. Сформованные образцы размером 8,5×4,2×1,6 см дополнительно сушили при 110°C в течение 48 часов.

Высушенные керамические образцы спекались при температурах 1100, 1150, 1200°C и 1200°C с нагревом 6°C/мин и выдержкой 45 минут в трубчатой печи Carbolite (MF03-3.13). После обжига образцы охлаждались естественным образом до комнатной температуры, что обеспечивало стабильность структуры перед определением физико-механических характеристик.

Физические свойства (водопоглощение, видимая пористость и объемная плотность) определялись в соответствии со стандартом ASTM-373-88. Для этого образцы выдерживались в кипящей дистиллированной воде в течение 5 часов. Механические свойства (прочность при изгибе и сжатии) исследовались по методике ASTM-C67. Изгибная прочность определялась методом трёхточечного изгиба с использованием универсальной испытательной машины. Нагрузка прикладывалась одноосно до разрушения образцов, при этом скорость нагружения варьировалась от 0,001 до 1 МПа/с.

Технологический процесс производства керамогранита включал прессование подготовленной массы на гидравлических прессах с последующим обжигом в роликовых печах. Обжиг являлся завершающей стадией технологического цикла и определял формирование конечных свойств материала. Благодаря более высокой гомогенности химического и минералогического состава по сравнению с природным гранитом, а также особенностям технологии обжига, полученный материал характеризовался водопоглощением менее 0,5% и пределом прочности на изгиб не менее 35 Н/мм<sup>2</sup>, что соответствует требованиям стандарта EN 14411:2009.



на лабораторном гидравлическом прессе при давлении 400 МПа. Высушивание осуществлялось в сушильном шкафу при 110°C, после чего образцы подвергались обжигу в высокотемпературной электропечи ЛНТ 02/16 в диапазоне температур 1100-1300°C.

**Результаты исследований.** Изучены физико-химические свойства полученных при температуре 1100-1300°C образцы керамогранита, результаты которого показаны на рисунках 1-3.

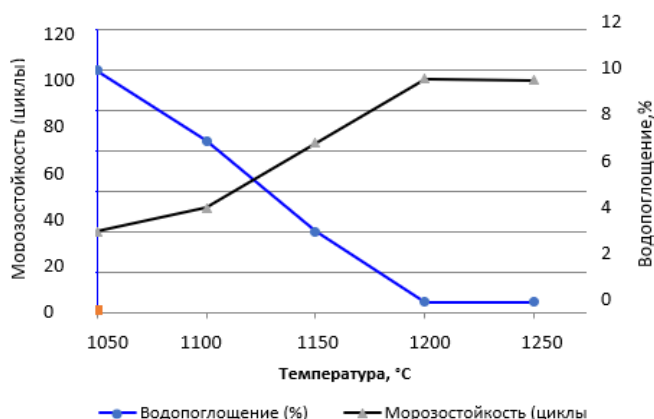


Рис. 1. Зависимость изменение физико-механических свойств керамогранитных образцов от температуры обжига

Из рисунка 1 видно, что с повышением температуры обжига керамогранитного образца от 1050°C до 1250°C водопоглощение уменьшается от 10% до 0,02%. Одновременно морозостойкость увеличивается от 40 циклов до 107 циклов. Результаты изменение прочности изгиба керамогранитных образцов от температуры показаны на рисунке 2.

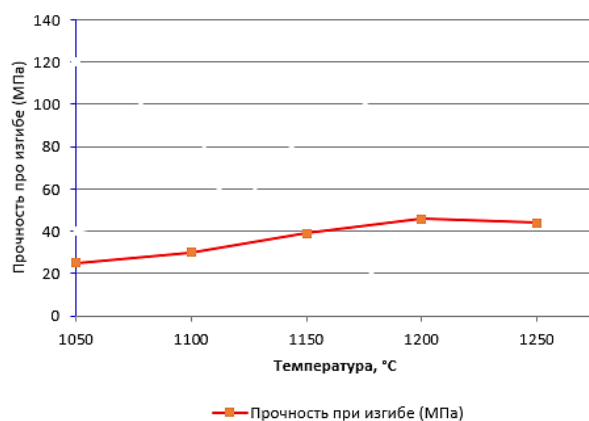


Рис.2. Зависимость изменение прочности изгиба керамогранитных образцов от температуры

Из рисунка 2 видно, что выше температура обжига образца, тем выше прочность изгиба полученного керамогранита. При температуре 1050°C прочность составляет 24,8 Мпа, а с повышением температуры 1250°C прочность изгиба керамогранита достигается до 41,5 МПа.

Снижение прочности изгиба керамогранита возможно связано со степенью образования муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) в образце. На рисунке 3 показаны зависимость образования муллита от температуры обжига при различном содержании микросилика в смеси образца.

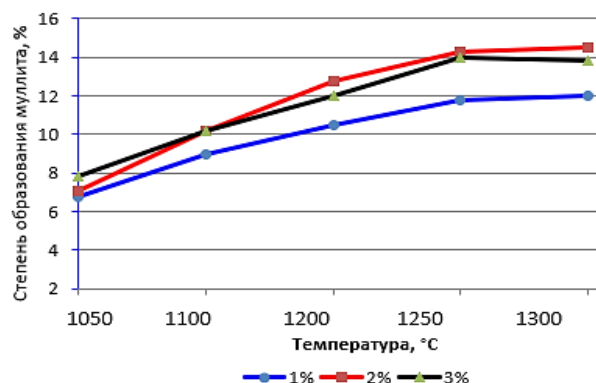


Рис.3. Степень образования муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) в зависимости от температуры обжига и содержание микросилика (1, 2, 3%)

Из рисунка 3 видно, что с изменением содержания микросилика в смеси и с повышением температуры обжига образца степень образования муллита повышается. Содержание в смеси микросилика 1% и температуре 1050°C степень образования муллита составляет 6,9%. Дальнейшее повышение температуры не влияет на степень образования муллита. С повышением температуры до 1250°C степень образования муллита достигается до 11,9%. При содержании микросилика 2% и температуре 1050°C степень образования муллита в образце составляет 7,2%, а при 1250°C составляет 14,3%. При содержании микросилика 3% и температуре 1050°C степень образования муллита в образце составляет 7,8%, а при 1250°C составляет 14,0%. Повышение температуры до 1300°C степень образования муллита составляет 14,1%. Таким образом, оптимальной температуры обжига образца является 1250°C, содержание микросилика 2% и степень образования муллита 14,3%. Дальнейшее повышение температуры до 1300°C и с увеличением содержания микросилика до 3% не влияет на степень образования муллита.

Оптимизация параметров процесса для получения керамогранита в различных составах смеси проведены по программам Statistika-10 и были построены графики зависимости выхода керамогранита от температуры процесса обжига. На рисунке 4 (а) и (в) показаны трехмерные изображения поверхности функции степени выхода керамогранита от температуры обжига и времени от изменения массы микросилика. Температура и время визуального определения параметров, при которых достигаются различные значения величины степени выхода массы показаны в разном цвете.

Из рисунка 4 (а) видно, что на трехмерной поверхности графика (обозначенный красной полосой) находятся наивысшие степени выхода массы керамогранита, более 90,8%. Наивысшая степень выхода массы наблюдается при температуре 1250°C (а) и продолжительности процесса 60 минут, где степень выхода массы достигает 91,0%.

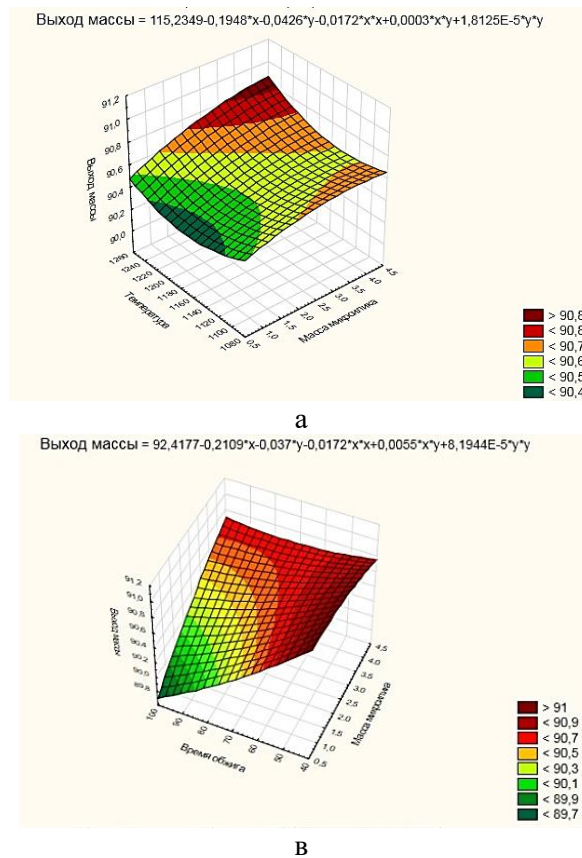


Рис. 4. Трехмерные изображения поверхности функции степени выхода керамогранита от температуры обжига (а) и времени (б) от изменения массы микрокремнезема

Рентгенофазовый анализ готовых образцов, проводившийся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 показаны на рисунке 5. Изучение полученного образца методом РФА показывают, что на рентгенограмме (рис. 5) синтезированного керамогранита интенсивность ( $d/n = 5.41049, 3.34996 \text{ \AA}^\circ$ ) соответствуют на муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и интенсивность ( $d/n = 4.26383; 3.34998; 2.13111; 1.81733 \text{ \AA}^\circ$ ) на кварц ( $\text{SiO}_2$ ).

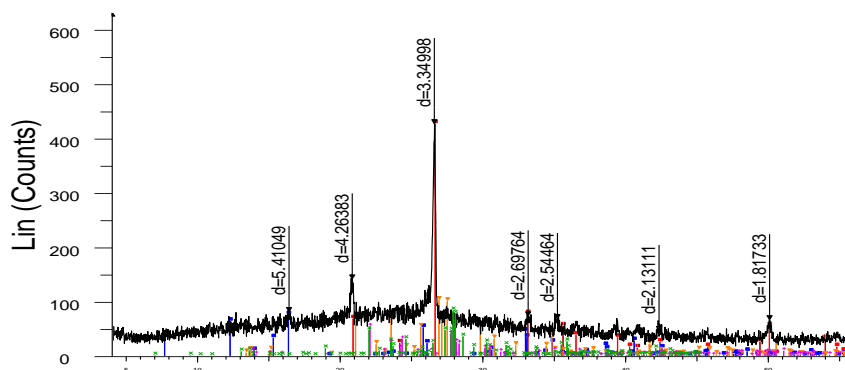
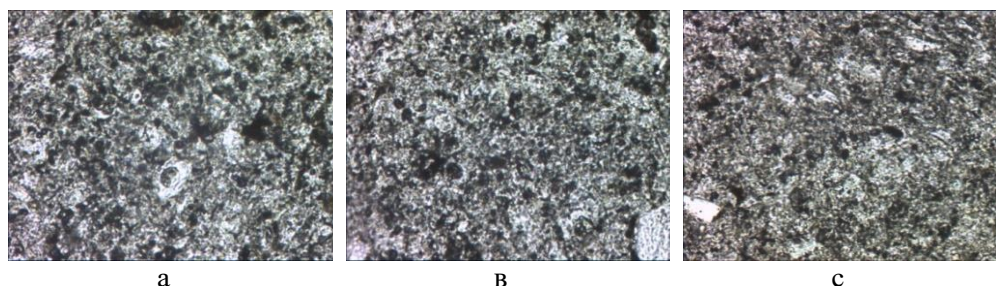


Рис. 5. Рентгенограмма керамогранита, полученного на основе микрокремнезема (образец М-1)

В результате исследований физико-химических процессов, сопровождающихся образованием новых минеральных и жидких фаз, найдена возможность использования микрокремнезема в качестве кремнийсодержащего сырья. Образцы имеют (рис. 6) довольно плотную структуру.



а – масса с добавкой 1% микрокремнезема; в – масса с добавкой 2% микрокремнезема; в – масса с добавкой 3% микрокремнезема.

Рис.6. Микроструктура керамогранита, полученного на основе микрокремнезема

Микроструктурный анализ образцов керамогранита (рис. 6) выявил наличие четко дифференцируемых реликтов полевого шпата, представленных стеклофазой и муллитом. В образце (а) наблюдается более пористая структура, тогда как образец (b) характеризуется повышенной плотностью за счет увеличенного содержания кристаллов муллита и стеклофазы. Зерна кварца окружены ободками высококремнеземистого стекла и поровыми включениями различной морфологии и размеров. Выявлены муллитовые области, соответствующие исходным частицам полевого шпата, а также неп полностью разложившиеся массивы глинистых компонентов [28-33]. Наиболее оптимальные структурные характеристики зафиксированы в образце (с), который отличается высокой плотностью, однородностью микроструктуры и минимальным количеством пор. Равномерное распределение кристаллов муллита и увеличенное содержание стеклофазы обеспечивают упрочнение материала и способствуют улучшению его эксплуатационных свойств. Четко очерченные границы кварцевых зерен, окружённых стеклофазой, свидетельствуют о более интенсивных реакциях взаимодействия компонентов шихты в процессе обжига.

Разработанный состав керамогранитной массы, полученный путем анализа кривых плавкости на диаграммах состояний, исследованиями физико-химических и структурных превращений в многокомпонентных системах при обжиге и по результатам технологических экспериментов, приведен в таблице 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства образцов керамогранита

Показатели	Физико-механические свойства образцов			
	М-1	М-2	М-3	М-4
1	2	3	4	5
Огневая усадка, %	9,16	11,12	11,02	10,36
Механическая прочность, (изг.), МПа	40,4	41,5	40,8	40,6

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Водопоглощение, %	0,029	0,023	0,025	0,026
Морозостойкость, п цикла не менее	104	107	106	105
Износостойкость, г/см <sup>3</sup> , не более	0,18	0,17	0,18	0,19

Анализ данных, представленных в таблице 9, показал, что среди исследованных составов керамогранитных масс наилучшие физико-механические характеристики продемонстрировал образец М-2. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что введение микросилики способствует повышению прочности при изгибе до 41,5 МПа (выше нормативного значения), снижению водопоглощения до 0,023%, увеличению морозостойкости до 107 циклов, а также росту усадки до 11,12%.

Применение микросилики в качестве кремнеземного компонента в шихте керамогранита оказало положительное влияние, обеспечив улучшение комплекса эксплуатационных свойств синтезированного материала. На основании полученных данных оптимальным был признан состав М-1. Установлено, что дисперсная структура микросилики повышает связность керамической массы, что благоприятно сказывается на прочности и долговечности керамогранита. Такой подход открывает перспективы для создания строительных материалов нового поколения на основе техногенных отходов.

Микроструктурный анализ выявил наличие реликтов полевого шпата, представленных стеклофазой и кристаллами муллита. Зерна кварца окружены ободками высококремнеземистого стекла и порами различной формы и размеров. Микрофотографии излома демонстрируют структурно-стекловидную матрицу с равномерно распределёнными субмикроскопическими кристаллами муллита. Чётко идентифицированы муллитовые области, образовавшиеся на месте исходных частиц полевого шпата, а также фрагменты глинистых минералов, не подвергшихся полному разложению.

**Обсуждение результатов исследований.** Результаты проведённых экспериментов показали, что введение микросилики в состав керамогранитных масс оказывает комплексное влияние на свойства синтезируемого материала. В частности, варьирование содержания микрокремнезема в пределах 2-3% при температуре обжига 1200-1250°C позволило получить образцы с оптимальными физико-механическими характеристиками.

Из выше приведенных данных таблиц следует, что образец М-2 продемонстрировал наилучшие показатели: прочность при изгибе составила 41,5 МПа, что выше нормативного значения (35 МПа по EN 14411-2009). В то же время водопоглощение было снижено до 0,02%, а морозостойкость достигла 107 циклов, что существенно превышает показатели контрольных составов без микросилики. Отмеченное повышение усадки до 11,12% связано с более интенсивным протеканием процессов спекания, обусловленных активной реакционной способностью кремнезема.

Сравнение полученных данных с результатами других исследований показывает высокую согласованность. Так, по данным Sánchez et al. [7], оптимизация состава фарфоровых плиток также обеспечивала снижение водопоглощения ниже 0,1% и рост механической прочности. Romero и Pérez [18] указывают на ключевую роль дисперсных добавок в формировании

плотной микроструктуры с низкой пористостью, что совпадает с результатами настоящей работы. Аналогичные тенденции отмечены Martín-Márquez et al. [16], где образование муллита при обжиге способствовало упрочнению керамической матрицы.

Микроструктурный анализ полученных образцов выявил формирование стекловидной матрицы с равномерно распределёнными субмикроскопическими кристаллами муллита, а также ободки высококремнеземистого стекла вокруг зерен кварца. Это подтверждает активное участие микросилики в реакциях спекания и коррелирует с данными Е.В. Баяндина [11], где также отмечалось улучшение свойств керамогранита за счёт образования новых фаз.

Таким образом, использование микросилики в составе керамогранитных масс обеспечивает: рост прочности при изгибе до 41,5 МПа; снижение водопоглощения до 0,02%; повышение морозостойкости до 107 циклов; улучшение плотности и связности керамической структуры.

Эти результаты подтверждают перспективность применения микросилики как эффективной техногенной добавки, обеспечивающей не только улучшение эксплуатационных свойств керамогранита, но и решение экологических задач утилизации отходов кремниевого производства.

**Заключение.** В настоящем исследовании рассмотрено влияние введения микрокремнезема на фазовый состав и физико-механические свойства керамогранита. Микрокремнезем, выступающий в качестве активной кремнеземсодержащей добавки, вводился в шихту с целью повышения эксплуатационных характеристик конечного материала.

Были разработаны керамические массы различного состава с варьированием содержания микрокремнезема при фиксированном соотношении каолина, полевого шпата и беложгущейся глины. Образцы подвергались обжигу при температуре 1200-1300°C. Для анализа фазового состава и микроструктуры использовались методы рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии.

Оптимизация параметров процесса показала, что выход керамогранита достигает 91,0% при варьировании температуры обжига и 90,8% при изменении содержания микросилики. Установлено, что добавка микрокремнезема способствует увеличению прочности при изгибе до 41,5 МПа (что превышает нормативные требования), снижению водопоглощения до 0,02%, повышению морозостойкости до 107 циклов, а также росту линейной усадки до 11,12 %.

Результаты исследования показали, что введение микрокремнезема в качестве кремнеземного компонента обеспечивает возможность целенаправленного регулирования фазового состава и структуры керамогранита, что приводит к существенному улучшению его эксплуатационных свойств. Полученные данные открывают перспективы разработки новых высокоэффективных керамических материалов с использованием техногенного сырья.

#### Список литературы

1. Amaral P.M., Fernandes J.C., Pires V., Rosa L.G. Ornamental stones // Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design. – 2015. – P. 397-445.

2. Suta S., Wattanasiriwech S., Wattanasiriwech D., Duangphet S., Thanomsilp C. Preparation of engineered stones // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 600. – No. 1. – P. 12009.
3. Bustillo Revuelta M. Agglomerated Stone // Construction Materials: Geology, Production and Applications. – 2021. – P. 91-102.
4. Sanchez E., García-Ten J., Sanz V., Moreno A. Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution // Ceram. Int. – 2010. – Vol. 36. – No. 3. – P. 831-845.
5. Raimondo M., Dondi M., Zanelli C., Guarini G., Gozzi A., Marani F., Fossa L. Processing and properties of large-sized ceramic slabs // Bol. Soc. Espanola Ceram. Vidr. – 2010. – Vol. 49. – No. 4. – P. 289-296.
6. Vovk M., Planinšek O., German Ilić I., Sernek M. Characterization of industrial aluminum trihydrate-filled poly(methyl methacrylate) composite powder // J. Adhes. Sci. Technol. – 2019. – Vol. 33. – No. 23. – P. 2517-2534.
7. Seguin A.A., Lizano K.L., Sánchez J.R., Sullcahuamán J.A. Solid Surface Composite Materials Manufactured from Syrup of Polymethyl Methacrylate, Alumina Trihydrate and Natural Mineral Fillers // Matéria. – Rio de Janeiro, 2020. – P. 25.
8. Gibson S. Choosing kitchen countertops // Fine Homebuilding. – 2002. – P. 44–51.
9. Cheever E. Kitchen & Bath Products and Materials: Cabinetry, Equipment, Surfaces. – John Wiley & Sons, 2014.
10. Parrott K.R., Beamish J.O. Kitchen and bathroom design // Introduction to Housing. – Vol. 3. – University of Georgia Press, 2018. – P. 43-63.
11. Bayandina E.V., Zykova Yu.A., Safonova T.V. Issledovanie keramogranitnykh mass s pomoshch'yu termicheskogo analiza [Research of porcelain stoneware masses by thermal analysis] // Bulletin of Irkutsk technical university. – 2011. – No. 3 (50). – P. 77-81. [in Russian].
12. Moshnya kova M.G., Orlova T.A. Issledovanie osobennostey obzhiga keramicheskogo granita iz eksperimental'noy massy s chastichnoy zamenoy importnykh glin na otechestvennyye [Study of firing features of ceramic granite from experimental mass with partial substitution of imported clays by domestic ones] // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. – 2017. – Vol. 7, No. 3 (22). – P. 95-106. [in Russian].
13. Vdovina E.V., Abdrahimova E.S., Abdrahimov V.Z. Opredelenie chernoy serdtseviny pri obzhige kirpicha iz beydellitovoy gliny i produkta sgoraniya bazaltovoy shikhty [Determination of black core during firing of brick from beidellite clay and basalt batch combustion product] // Bashkir chemical journal. – 2007. – Vol. 14, No. 2. – P. 102-104. [in Russian].
14. Ceramic and glass materials: Structure, properties and processing / ed. J.F. Shakelford, R.H. Poremus. – New York: Springer, 2008. – 201 p. – DOI 10.1007/978-0-387-73362-3
15. Dodd A.E. Dictionary of ceramics. – 3rd ed., revised and updated by D. Murfin. – The Institute of Materials, 1994. – 369 p.
16. Martín-Márquez J., Rincón J.M., Romero M. Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies // Journal of the European Ceramic Society. – 2010. – Vol. 30. – No. 7. – P. 1599–1607.
17. Pavlov V.F. Fiziko-khimicheskie osnovy obzhiga izdeliy iz stroitel'noy keramiki [Physico-chemical fundamentals of firing building ceramics]. – M.: Stroyizdat, 1977. – 240 p. [in Russian].
18. Romero M., Pérez J.M. Relation between the microstructure and technological properties of porcelain stoneware: A review // Materiales de Construcción. – 2015. – Vol. 65, Issue 320. – e065. – ISSN-L 0465-2746. – DOI: 10.3989/mc.2015.05915
19. Betekhtin A.G. Kurs mineralogii [Course of mineralogy]. – Russia, 2008. [in Russian].
20. Adyrbaev B.O. O roli polevykh shpatov v sostave mass keramogranita [On the role of feldspars in the composition of porcelain stoneware masses] / B.O. Adyrbaev //

- Nauchnye trudy YUKGU im. M. Auezova. – 2017. – No. 4 (44). – P. 131-135. [in Russian].
21. Adyrbaev B.O., Darkhan A.Z., Yessimov B.O., Adyrbaeva T.A., Dubinina E.S. Synthesis of ceramic granite based on domestic feldspar raw materials // Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [Proceedings of the NAS of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences]. – 2024. – № 6. – С. 6-18.
  22. Yessimov B.O., Adyrbayev B.O., Kalamat Zh.T., Aldaberganov S.K. Mineral-Primary Import Substitution in Ceramic Granite Production // V International Scientific-Practical Conference «Integration of the Scientific Community to the Global Challenges of Our Time». – Tokyo, Japan, 2020. – P. 355–360.
  23. Lewicka E., Wyszomirski P. Polish feldspar raw materials for the domestic ceramic tile industry – current state and prospects // Materialy Ceramiczne. – 2010. – № 4 (62). – P. 582–585.
  24. Kulnich V.V., Sagunov V.G., Ushkenov B.S., Gulyaeva N.Ya., Beyseev O.B., Vedernikov N.N., Antonenko A.A., Bayakunova S.Ya. Mestorozhdeniya gornorudnogo syr'ya Kazakhstana [Deposits of mineral raw materials of Kazakhstan]. – Almaty, 2000. – Vol. 1. – 372 p. [in Russian].
  25. Sanchez E. Porcelain tile microstructure: implications for polished tile properties // Journal of the European Ceramic Society. – 2006. – Vol. 26. – P. 2533–2540.
  26. Nori A.D. Jr., Hotza D., Soler V.C., Vilches E.S. Influence of composition on mechanical behavior of porcelain tile. Part 1: Microstructural characterization and developed phases after firing // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527. – No. 7. – P. 1730–1735.
  27. Tereshchenko I.M., Pun'ko G.M., Serikova L.V. Optimizatsiya sostavov keramicheskikh granitov [Optimization of ceramic granite compositions] / I.M. Tereshchenko et al. // Steklo i keramika. – 2000. – No. 12. – P. 31-33. [in Russian].
  28. Patent No. 36983. Keramicheskaya massa dlya izgotovleniya keramogranita [Ceramic mass for porcelain stoneware production] / Darkhan A.Z., Yessimov B.O., Anarbaev A.A., Adyrbaev B.O., Zobnin N.N. – Application No. 2023/0160.1 dated 06.03.2023. [in Russian].
  29. Baucia J.A., Koshimizu Jr.L., Giberton C., Morelli M.R. Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato // Cerâmica. – 2010. – № 56. – P. 262–272.
  30. Borkoev B.M. Study of the structure and properties of low-temperature firing porcelain // Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. – 2012. – № 6. – P. 98–100. (In Russian)
  31. Zubekhin A.P., Verchenko A.V., Galenko A.A. Manufacture of ceramic granite based on zeolite-containing batches // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. – 2014. – № 4. – P. 52–54. (In Russian)
  32. Brykov A.S. Khimiya silikatnykh i kremnezemsoderzhashchikh vyazhushchikh materialov. – Saint-Petersburg: SPbGTI(TU), 2011. – 147 p.
  33. Ryshchenko M.I., Shchukina L.P., Fedorenko E.Yu., Firsov K.N. The possibility of ceramogranite production from quartz-feldspar raw of Ukraine // Steklo i keramika. – 2008. – Vol. 81. – No. 1.

*Материал поступил в редакцию 13.10.25, принят 17.02.26.*

Ә.З. Дархан<sup>1</sup>, А.А. Анарбаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,  
Шымкент, Қазақстан

#### МИКРОСИЛИКАНЫҢ КЕРАМОГРАНИТТИҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН ФИЗИКА- МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

**Аңдатпа.** Микросиликаны қолдана отырып, жергілікті шикізат негізіндегі жақсартылған қасиеттері бар керамогранитті әзірлеу. Керамика өнеркәсібінің инновациялық материалдарға қажеттілігіне және ресурстардың шектеулігіне байланысты керамогранит өндірісінің тиімді технологияларын әзірлеудің өзектілігі қарастырылған. Зерттеу мақсаты анықталған: кремний өндірісінің қалдығы болып табылатын микрокремнийді қолдана отырып, Түркістан облысының жергілікті шикізаты негізінде жоғары сипаттамалары бар керамогранит жасау. Өңірдің минералдық шикізатына баға берілген, күйдіру температурасының (1050–1250°C) мен бөлшектердің дисперстігінің материал қасиеттеріне әсері зерттелген, сондай-ақ микрокремнийдің әртүрлі мөлшері бар массалардың құрамдары әзірленген. 2% микрокремний енгізу және 1250°C температурада күйдіру ISO 13006 стандартына сәйкес келетін керамогранит алуды қамтамасыз ететіні анықталған: иілуге беріктігі – 41,5 МПа, су сіңіруі – 0,02%, аязға төзімділігі – 107 цикл. Микрокремнийді отандық керамика өнеркәсібін дамыту, бәсекеге қабілетті өнім түрлерін кеңейту және техногендік қалдықтарды кәдеге жарату үшін пайдаланудың перспективасы көрсетілген.

**Тірек сөздер:** микросилика, керамогранит, аязға төзімділік, су сіңіргіштік, иілу беріктігі, күйдіру температурасы.

A.Z. Darkhan<sup>1</sup>, A.A. Anarbayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M. Auezov South Kazakhstan university, Shymkent, Kazakhstan

#### EFFECT OF MICROSILICA ON THE PHASE COMPOSITION AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF PORCELAIN STONEWARE

**Abstract.** Development of Porcelain Stoneware with Improved Properties Based on Local Raw Materials Using Microsilica. The relevance of developing effective technologies for the production of porcelain stoneware due to the ceramic industry's need for innovative materials and resource constraints is considered. The aim of the study is defined: to create porcelain stoneware with enhanced characteristics based on local raw materials from the Turkestan region using microsilica – a silicon production waste. An assessment of the region's mineral raw materials was carried out, the influence of firing temperature (1050–1250°C) and particle dispersity on the material's properties was studied, and compositions of masses with varying microsilica content were developed. It is established that the introduction of 2% microsilica and firing at 1250°C allow for obtaining porcelain stoneware compliant with the ISO 13006 standard: flexural strength – 41.5 MPa, water absorption – 0.02%, frost resistance – 107 cycles. The prospects of using microsilica for the development of the domestic ceramic industry, expansion of the range of competitive products, and utilization of industrial waste are revealed.

**Keywords:** microsilica, porcelain stoneware, frost resistance, water absorption, flexural strength, sintering temperatur.