МРНТИ 29.19.13; 61.35.29 https://doi.org/10.26577/RCPh20994726

А.Б. Куйкеев
Институт физики имени академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: horoho_azama@mail.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛИНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧАП

Изучены физико-химические изменения технологических характеристик в процессе обжига глинистого сырья месторождения «Чап» Иссык-Кульской области Кыргызской Республики. Для масс определены химический, гранулометрический составы, пластичность, формовочная влажность, воздушная усадка, огневая усадка, водопоглощение, объёмная плотность, показатель прочности. Увеличение температуры сопровождалось интенсификацией огневой усадки, повышением прочности, уменьшении водопоглощения. Установлено, что повышение температуры сопровождается ростом огневой усадки, прочности, одновременном снижении водопоглощения. В работе использовалось два состава, первый без добавления в шихту посторонних веществ, второй содержащего 97 % глины, 3 % древесного угля. В процессе обжига глинистых минералов, происходит образование метакаолинита, началом образования муллитоподобных фаз, развитием контактов между частицами, жидкофазным спеканием под действием щелочных, щёлочноземельных оксидов. Введение угля уменьшило воздушную усадку, но после выгорания сформировало дополнительную открытую пористость, поэтому плотность, прочность оставались ниже, а водопоглощение - выше контрольных значений. Полученные результаты характеризуют начальную стадию спекания, для подтверждения огнеупорного назначения необходимы дополнительные испытания. Построены температурные зависимости исследованных показателей, выполнено сопоставление двух составов.

Ключевые слова: глина, обжиг, спекание, усадка, водопоглощение, плотность, прочность, пористость.

А.Б. Куйкеев
Қырғыз Республикасы Ұлттық ғылым академиясының Дж. Жеенбаев атындағы физика институты, Бішкек, Қырғыз Республикасы
e-mail: horoho_azama@mail.ru

Чап кенінен алынған сазды кешендегі күрделі зерттеу

Қырғыз Республикасының Ыстықкөл облысындағы “Чап” кен орнынан алынған саз шикізатының технологиялық сипаттамаларының күйдіру процесі кезіндегі физика-химиялық өзгерістері зерттелді. Саз қоспалары үшін химиялық құрамы, бөлшектердің мөлшерінің таралуы, пластикалығы, қалыптау ылғалдылығы, ауаның кішіреюі, күйдірудің кішіреюі, судың сіңірілуі, көлемдік тығыздығы және беріктік индексі анықталды. Температураның жоғарылауы күйдірудің кішіреюінің, беріктігінің және судың сіңірілуінің төмендеуімен қатар жүрді. Температураның жоғарылауы күйдірудің кішіреюі мен беріктігінің артуымен қатар жүретіні, сонымен бірге судың сіңірілуінің төмендейтіні анықталды. Зерттеуде екі құрам қолданылды: біріншісі партияға бөгде заттар қосылмаған, ал екіншісі 97% саз және 3% көмірден тұрады. Саз минералдарын күйдіру кезінде метакаолинит пайда болады, муллит тәрізді фазалар пайда бола бастайды, бөлшектер арасында байланыстар пайда болады және сілтілі және сілтілі жер оксидтерінің әсерінен сұйық фазалы күйдіру жүреді. Көмірді қосу ауаның жиырылуын азайтты, бірақ жанғаннан кейін қосымша ашық кеуектілікті тудырды, нәтижесінде тығыздық пен беріктік төмен болып қалады, ал су сіңірілуі бақылау мәндерінен жоғары болады. Алынған нәтижелер күйдірудің бастапқы кезеңін сипаттайды;

© 2026 Al-Farabi Kazakh National University

отқа төзімді қасиеттерді растау үшін қосымша сынақтар қажет. Зерттелген параметрлердің температураға тәуелділігі сызба түрінде көрсетіліп, екі құрам салыстырылды.

Түйін сөздер: саз, күйдіру, жиырылу, су сіңіру, тығыздық, беріктік, кеуектілік.

A.B. Kuikeev
Academician J. Jeenbaev Institute of Physics, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: horoho_azama@mail.ru

Comprehensive research of clay of the Chap deposit

A study was conducted on the physicochemical changes in the technological characteristics of clay raw materials from the “Chap” deposit in the Issyk-Kul Region during the firing process. The chemical and particle size distributions, plasticity, molding moisture content, air shrinkage, firing shrinkage, water absorption, bulk density, and strength index were determined for the mixtures. An increase in temperature was accompanied by intensified firing shrinkage, increased strength, and reduced water absorption. It was established that an increase in temperature is accompanied by an increase in firing shrinkage and strength, along with a simultaneous decrease in water absorption. Two compositions were used in this study: the first without any additives in the batch, and the second containing 97% clay and 3% charcoal. During the firing of clay minerals, metakaolinite forms, the formation of mullite-like phases begins, interparticle contacts develop, and liquid-phase sintering occurs under the action of alkali and alkaline earth oxides. The addition of charcoal reduced air shrinkage but, after burning out, created additional open porosity; therefore, density and strength remained lower, while water absorption was higher than the control values. The results obtained characterize the initial stage of sintering, additional tests are required to confirm the material’s suitability for refractory applications. Temperature-dependent curves for the studied parameters were plotted, and a comparison of the two compositions was performed.

Keywords: clay raw material, thermal treatment, sintering, linear shrinkage, water absorption, density, strength, porosity.

Введение

На сегодняшний день в Государственном балансе Кыргызской Республики числятся запасы каолина - 127,8 тыс. т. Сырьевая база огнеупорных глин не достаточно исследовано и разработана, так как месторождения расположены в труднодоступных горных районах. В этих условиях особую актуальность приобретает задача комплексного изучения местных глинистых пород и разработки на их основе качественных огнеупорных материалов. Развитие собственной сырьевой базы огнеупорного глинистого сырья является одно из стратегических направлений, которое позволит не только удовлетворить потребности внутреннего рынка, а так же сократить зависимость от импорта огнеупорного сырья.

Каолиновые глины широко используются в производстве огнеупорной, технической керамики. Их поведение в технологическом процессе определяется не только суммарной долей SiO_2, Al_2O_3, но также минеральными формами этих компонентов, дисперсностью сырья, содержанием кварца, карбонатов, присутствием соединений железа Fe_2O_3, FeO, количеством флюсующих оксидов Na_2O, K_2O, CaO, MgO. В настоящей работе объектом исследования выбрано глинистое сырьё месторождения «Чап», расположенного в Иссык-Кульской области [1].

При сушке, последующем обжиге изделий должна сохранять геометрическую целостность, формирующаяся структура - обеспечивать заданный комплекс эксплуатационных свойств, включая прочность, термостойкость, потенциальную огнеупорность. Нагрев сопровождается удалением гидроксильных групп из структуры глинистых минералов, полиморфным превращением кварца, разложением карбонатов, образованием новых алюмосиликатных фаз, стекловидной связки. Совместное протекание этих процессов изменяет линейные размеры образца, объём, связность пор, объёмную плотность, водопоглощение, механическую прочность [2–4].

Цель исследования заключалась в установлении физико-химических механизмов, определяющих изменение свойств двух керамических масс, обжига в интервале 950–1050 °С: контрольного состава из 100 % глины «Чап», состава, содержащего 97 % глины, 3 % угля. Анализировали формовочную влажность, воздушную, огневую усадку, водопоглощение, объёмную плотность, показатель прочности.

Методология

Высокотемпературное воздействие на каолиновое сырьё сопровождается комплексом взаимосвязанных структурных и фазовых преобразований. Характер и полнота протекания этих процессов определяют механическую прочность, термическую устойчивость и огнеупорные свойства получаемого керамического материала.

Термические превращения каолинита, химический состав которого условно выражается формулой $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, начинаются с удаления физически адсорбированной и капиллярно связанной воды. При дальнейшем нагревании протекает дегидроксилирование кристаллической решётки с образованием метакаолинита. Возникающая при этом разупорядоченная алюмосиликатная структура обладает повышенной реакционной способностью и при последующем увеличении температуры подвергается перестройке с формированием промежуточных алюмосиликатных соединений и муллитсодержащих фаз.

На начальных этапах обжига взаимодействие твёрдых компонентов осуществляется посредством расширения межчастичных контактов, поверхностного и объёмного массопереноса, а также зарождения новых кристаллических фаз. Интенсивность данных процессов зависит от температуры, дисперсности и дефектности частиц, минерального и химического состава сырья, а также от состояния границ между отдельными зёрнами. При наличии легкоплавких компонентов одновременно может происходить образование стекловидной фазы, оказывающей существенное влияние на уплотнение керамической структуры.

Повышение температуры увеличивает подвижность атомов, ионов и структурных дефектов. При достижении уровня тепловой энергии, достаточного для осуществления массопереноса, в областях соприкосновения частиц возникают и постепенно увеличиваются межзерновые шейки. Кинетика этих преобразований во многом определяется скоростью поверхностной и объёмной диффузии. Поэтому площадь контактирования частиц, протяжённость диффузионного пути и исходная плотность упаковки непосредственно влияют на интенсивность уплотнения материала.

Предварительное прессование порошкообразной шихты способствует увеличению числа и площади непосредственных межчастичных контактов и одновременно снижает исходную пористость заготовки. В ходе термической обработки механическое сцепление частиц постепенно дополняется, а затем частично замещается химическими и кристаллохимическими связями. Активизация массопереноса сопровождается рекристаллизационными процессами и пространственным перераспределением структурных элементов керамической системы.

Согласно результатам классических и современных исследований, температурные интервалы фазовых преобразований определяются степенью упорядоченности структуры каолинита, размерами частиц, природой и количеством примесей, скоростью нагрева и продолжительностью изотермической выдержки [5–9]. В зависимости от совокупного действия перечисленных факторов метастабильная шпинелеподобная алюмосиликатная фаза и первичные кристаллы муллита могут обнаруживаться ориентировочно в интервале 900–1050 °С.

Температура плавления чистого оксида алюминия составляет приблизительно 2050 °С. Однако заметное уплотнение природного глинистого сырья начинается при существенно более низких температурах, что обусловлено его многокомпонентным составом. Оксиды натрия, калия, кальция, магния и железа способствуют образованию жидкой фазы и смещают начало интенсивного спекания в низкотемпературную область. В связи с этим повышенное содержание Al_2O_3 само по себе не может рассматриваться как достаточный показатель огнеупорности. Для объективной оценки материала необходимо учитывать его минерально-фазовый состав, содержание флюсующих компонентов и результаты непосредственных высокотемпературных испытаний [8–10].

Механизмы усадки при сушке и обжиге

Воздушная усадка возникает преимущественно при удалении воды из межчастичных капилляров и последующем сближении пластинчатых частиц глинистых минералов. Её

величина, как правило, увеличивается с повышением содержания тонкодисперсной фракции, пластичности сырья и формовочной влажности. Введение непластичных компонентов снижает относительную долю усаживающейся глинистой составляющей и вследствие этого может уменьшать деформацию образцов в процессе сушки.

Огневая усадка формируется под действием механизмов, протекающих при повышенных температурах: развития межчастичных контактов, диффузионного массопереноса, перераспределения вещества и вязкого течения образовавшейся жидкой фазы. Капиллярные силы, возникающие в расплаве, способствуют сближению твёрдых частиц, сокращению объёма порового пространства и уменьшению линейных размеров обжигаемого изделия [10–18].

При нагревании кварцсодержащего материала приблизительно до 573 °C происходит переход α-кварца в β-модификацию, сопровождающийся обратимым изменением объёма. В процессе последующего охлаждения обратное фазовое превращение может приводить к возникновению локальных термических напряжений и образованию микротрещин, особенно при неоднородном распределении кварцевых включений или высокой скорости охлаждения.

Дополнительное влияние на формирование поровой структуры оказывают разложение карбонатных соединений и окислительное выгорание органических добавок. Выделяющиеся газообразные продукты могут увеличивать открытую пористость материала, если скорость их удаления превышает интенсивность уплотнения керамической матрицы. Таким образом, итоговая усадка при обжиге определяется соотношением конкурирующих процессов: диффузионного спекания, жидкофазного уплотнения, газообразования и формирования остаточной пористости [10–18].

Водопоглощение, пористость, объёмная плотность

Ниже представлен переработанный вариант с сохранением научного содержания, структуры разделов и ссылок на литературу.

Водопоглощение отражает преимущественно объём и степень доступности открытых пор в структуре керамического изделия, однако не является прямым эквивалентом общей пористости. В ходе спекания поперечное сечение поровых каналов уменьшается, отдельные открытые полости переходят в замкнутое состояние, а непрерывность капиллярной системы постепенно нарушается. В результате способность материала поглощать воду снижается, тогда как его объёмная плотность, как правило, возрастает [2–4]. При одинаковом значении суммарной пористости материалы могут существенно различаться по соотношению микро- и макропор. Поэтому механические характеристики керамики определяются не только общим количеством пор, но также их размерами, формой, распределением и пространственной взаимосвязанностью [19-22].

Формирование прочностных свойств

Повышение прочности керамического материала при обжиге связано с увеличением площади межчастичных контактов, уменьшением числа опасных структурных дефектов и образованием стекловидной связующей фазы. Дополнительный вклад в упрочнение матрицы могут вносить кристаллы муллита, выполняющие армирующую функцию. Вместе с тем при температурах 950–1050 °C содержание сформировавшейся муллитовой фазы в природном глинистом сырье нередко остаётся ограниченным.

Крупные открытые поры и микротрещины уменьшают эффективную площадь поперечного сечения изделия и выступают концентраторами механических напряжений. По этой причине прочность керамики обычно снижается при увеличении открытой пористости и водопоглощения. Однако чрезмерное повышение температуры или продолжительности обжига не всегда приводит к дальнейшему упрочнению материала. При неблагоприятном режиме возможны интенсивное газовыделение, вспучивание, образование термических трещин и частичное разрушение структуры [8, 13–20].

Влияние выгорающих углеродсодержащих добавок

Уголь и другие органические вещества вводят в состав керамических масс в качестве выгорающих порообразующих компонентов. При нагревании в окислительной атмосфере углеродсодержащая добавка окисляется с образованием газообразных продуктов, преимущественно CO_2, а при недостатке кислорода возможно также образование CO. Удаление продуктов горения из объёма заготовки сопровождается формированием дополнительных пор и газоотводящих каналов.

Образование открытой поровой структуры обычно приводит к увеличению водопоглощения и одновременному снижению объёмной плотности и механической прочности изделия. Характер воздействия добавки зависит не только

от её количества, но и от размеров частиц, равномерности распределения, скорости нагрева и условий газообмена при обжиге.

Зольная часть углеродсодержащего компонента может включать SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, а также соединения щелочных и щёлочноземельных металлов. Эти вещества способны участвовать в процессах фазообразования и жидкофазного спекания. Итоговое влияние золы определяется её химическим составом, количеством и взаимодействием с минеральными компонентами глинистой массы. Таким образом, применение выгорающих добавок позволяет снизить плотность и теплопроводность керамики, однако данный эффект может сопровождаться уменьшением её механической прочности [21, 23–25].

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовано глинистое сырьё месторождения «Чап». Химический состав исходной пробы представлен в таблице 1; суммарное содержание указанных компонентов принято равным 100,00 %.

Содержание Al_2O_3 в исследуемой глине составляет 21,12 %. Совокупная концентрация Na_2O + K_2O, CaO и MgO достигает 5,16 %. Наличие указанных оксидов свидетельствует о потенциально выраженном флюсующем воздействии при обжиге, поскольку они могут способствовать формированию жидкой фазы и снижению температуры начала интенсивного спекания.

Таблица 1. Химический состав глинистого сырья месторождения «Чап»

№	Компонент	Содержание, мас. %
1	SiO_2	57,76
2	Al_2O_3	21,12
3	TiO_2	0,19
4	Fe_2O_3	1,89
5	FeO	0,00
6	CaO	2,12
7	MgO	1,32
8	SO_3	0,95
9	Na_2O + K_2O	1,72
10	Водорастворимые соли	0,17
11	Прочие компоненты	12,76

Содержание в глине глинозема, красящих оксидов железа, титана составляет:

- по содержанию глинозема (Al_2O_3) глинистое сырье относится к группе полукислого сырья (от 14-28 %). Содержание Al_2O_3 в пробе - 21,12%;

- по содержанию красящих оксидов (Fe_2O_3, TiO_2) сырье относится: Fe_2O_3 в пробе - 1,89 % - к группе со средним содержанием красящих оксидов (от 1,5 до 3 %), TiO_2 в пробе - 0,19 % - к группе с низким содержанием красящих оксидов (менее 1%).

Число пластичности исходного сырья составило 5,02, нижней границе текучести 23,13 %, границе раскатывания 18,11 %, что соответствует малопластичной глине. Потери при прокаливании составляет на уровне 12,7 %, гигроскопическая влажность — 10,75 %.

Определение гранулометрического состава глинистого сырья

Размер, соотношение частиц оказывают существенное влияние на показатели: пластичность, спекаемость, огнеупорность, усадку, механическую прочность изделий. Чем выше содержание тонкодисперсных фракций, тем выше пластичность, связующая способность глины. В соответствии [6,7] проведен гранулометри-ческий состава глинистого сырья «Чап» с использованием лабораторной просеивающей машины ASM -200. Результаты определения гранулометрического состава глинистого сырья представлены в таблице 2.

Приготовление образцов, режим обжига

Исходную глину предварительно высушивали, затем измельчали в лабораторной шаровой мельнице МЛ-1М и просеивали через сито с размером ячейки 1 мм. Для проведения сравнительных исследований были подготовлены два состава керамической массы. Контрольный вариант включал 100 % глины «Чап», а модифицированный состав состоял из 97 % глины и 3 % древесного угля. Ранее применявшийся термин «лесс» был исключён и заменён на наименование фактически исследованного сырья — глины месторождения «Чап».

Из приготовленных масс формовали образцы нескольких типов: кубы размером 50 × 50 × 50 мм, бруски размером 160 × 40 × 40 мм и плитки размером 50 × 50 × 10 мм. Термическую обработку осуществляли в высокотемпературной лабораторной печи Nabertherm LHTC(T) 08/16 при температурах 950, 1000 и 1050 °C. Скорость нагрева составляла 3 °C/мин, продолжительность изотермической выдержки при конечной температуре — 30 мин.

Формовочная влажность контрольной керамической массы составляла 17,83 %, тогда как для состава, содержащего 3 % угля, данный показатель был равен 17,42 %.

В ходе исследования определяли линейную усадку, водопоглощение и объёмную плотность образцов. Выбор методик оценки свойств глинистого сырья, а также определения водопоглощения, плотности и пористости осуществляли в соответствии с требованиями источников [2–4].

Таблица2. Определение гранулометрического состава глинистого сырья

Наименование показателя	Фракция материала, мм										
	более 10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	менее 0,5	более 0,06	0,06-0,01	0,01	0,05	менее 0,001
Масса, г	0	0	0	0,02	0,08	0,09	39,84	21,22	8,55	12,87	17,33
Суммарное содержание				0,19					99,81		

Получены лабораторные результаты глинистого сырья по содержанию тонкодисперсных фракций менее 1мкм (0,001 мм), менее 10 мкм (0,01 мм). По совокупности фракций сырье относится к группе грубодисперсного сырья. Содержание в глинистом сырье крупнозернистых включений размером более 5 мм в данной пробе отсутствуют.

Формовочные и сушильные свойства

После завершения процесса сушки линейная усадка образцов контрольного состава составила 5,11 %. Для массы с добавлением 3 % древесного угля значение данного показателя снизилось до 4,53 %. Абсолютная разница между составами равнялась 0,58 процентного пункта, что соответствует уменьшению приблизительно на 11,4 % по отношению к контрольному образцу.

Снижение воздушной усадки модифицированной массы может быть связано с уменьшением относительного содержания пластичной глинистой составляющей, а также с разделяющим воздействием непластичных частиц угля на структуру сырьевой системы. Введение углеродсодержащей добавки ограничи-вает сближение глинистых частиц при удалении влаги и тем самым способствует уменьшению деформации образцов в процессе сушки.

По полученным значениям линейной усадки оба исследованных состава характеризуются сравнительно низкой чувствительностью к сушке. Результаты определения технологических показателей исследованных образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3.Технологические показатели образцов после обжига

п/п	Состав шихты,%	Формовочная влажность, в %		Температура обжига, °С	Воздушная усадка, в %	Огневая усадка,%	Общая усадка, %	Водопоглощение,%	Объемный вес, кг/м^3	Предел прочности, МПа
		Относительная, %	Абсолютная, %							
1.	лесс-100	17,83	21,73	950	5,11	0,32	5,43	17,64	1755,7	12,18
2.	лесс- 97 уголь-3	17,42	21,09	950	4,53	0,65	5,18	18,35	1700,0	12,01
3.	лесс-100	17,83	21,73	1000	5,11	0,58	5,69	17,39	1753,7	12,82
4.	лесс- 97 уголь-3	17,42	21,09	1000	4,53	0,87	5,4	18,23	1697,3	12,20
5.	лесс-100	17,83	21,73	1050	5,11	1,03	6,14	16,04	1794,0	16,09
6.	лесс- 97 уголь-3	17,42	21,09	1050	4,53	1,62	6,15	17,01	1728,7	15,24

Результаты и обсуждение

Изменение усадки

На рисунке 1 представлена зависимость огневой усадки от температуры обжига. В интервале 950–1050 °C огневая усадка контрольных образцов увеличилась с 0,32 до 1,03 %, то есть на 0,71 процентного пункта. Для массы с углём соответствующее изменение составило 0,97 процентного пункта: от 0,65 до 1,62 %. Такая динамика свидетельствует об усилении спекания, увеличении вклада вязкого расплава в уплотнение структуры образца. Наиболее резкий рост между 1000, 1050 °C соответствует с переходом от начального формирования межчастичных шеек к более развитой стадии консолидации структуры [13–20].

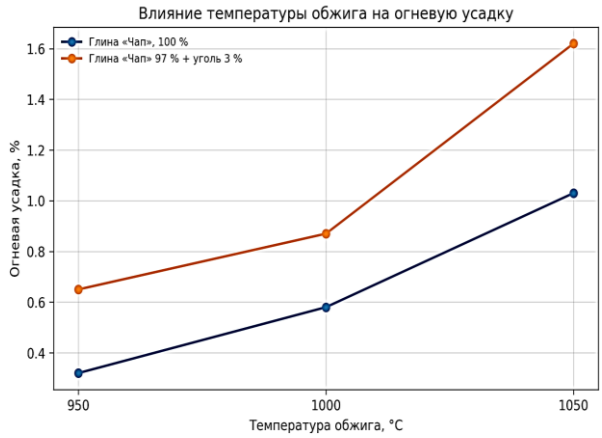


Рисунок 1 – Зависимость огневой усадки от температуры обжига

На рисунке 2 представлена зависимость общей усадки от температуры обжига.

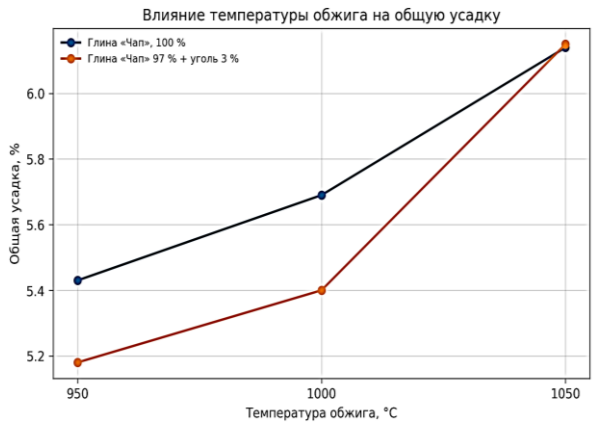


Рисунок 2 - Зависимость общей усадки от температуры обжига

Общая усадка 950, 1000 °C остаётся ниже контрольной из-за меньшего изменения размеров на стадии сушки. После обжига 1050 °C значения практически совпадают, составляют 6,14, 6,15 %. Полученный результат указывает на взаимную компенсацию процессов: уголь уменьшает сушильную усадку, но после выгорания образовавшаяся поровая система интенсивнее перестраивается в высокотемпературном уплотнении.

Водопоглощение, объёмная плотность

При повышении температуры водопоглощение контрольного состава уменьшилось с 17,64 до 16,04 %, а углесодержащего - с 18,35 до 17,01 %. Наблюдаемая тенденция соответствует сужению открытых каналов, частичной изоляции пор вследствие спекания с участием жидкой фазы. Объёмна плотность достигла наибольших значений температуре 1050 °C в исследованном диапазоне значений -1794,0 кг/м³ для контроля, 1728,7 кг/м³ для состава с углём. На рисунке 3 представлена зависимость водопоглощения от температуры обжига. На рисунке 4 представлена зависимость объёмной плотности от температуры обжига.

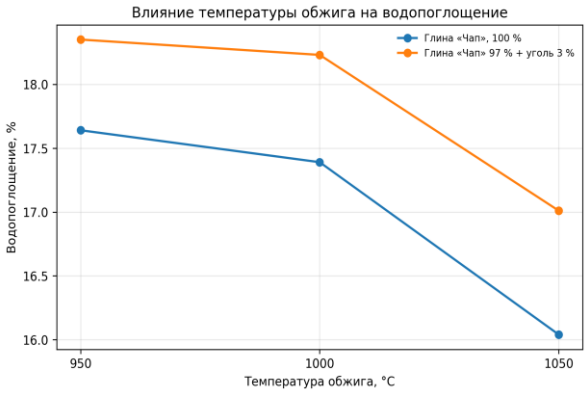


Рисунок 3 - Зависимость водопоглощения от температуры обжига

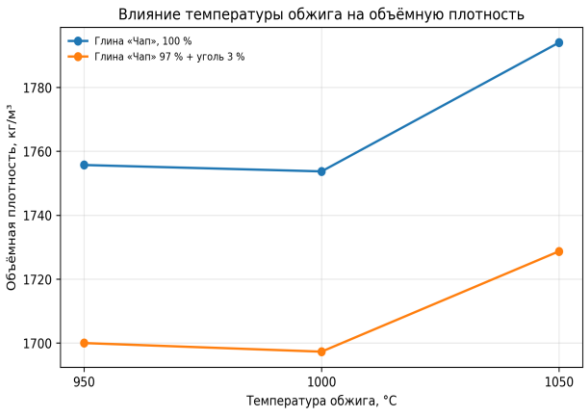


Рисунок 4 - Зависимость объёмной плотности от температуры обжига

На всех исследованных температурах введение угля приводило к более высокому водопоглощению, меньшей объёмной плотности по сравнению с контрольной массой. Следовательно, в рассматриваемых условиях преобладало порообразование, вызванное выгоранием угольной добавки. На основании результатов угольная добавка во время выгорании формируют стекловидную фазу, закрывают поры.

Изменение прочности на сжатие

На рисунке 5 представлена зависимость предела прочности от температуры обжига. Показатель прочности на сжатия контрольной точки равен 12 МПа - 950 °С возрастает до 16,1 МПа - 1050 °С, что соответствует приросту на 32,1 %. Данные показатели указывает, что основными факторами упрочнения являлись сокращение порового пространства, развитие прочных межчастичных связей.

По сравнению с контролем угольная добавка уменьшала прочность на 1,4 % - 950 °С, на 4,8 % - 1000 °С, на 5,3 % - 1050 °С. Вероятной причиной уменьшения прочности на сжатия служат повышенная открытая пористость.

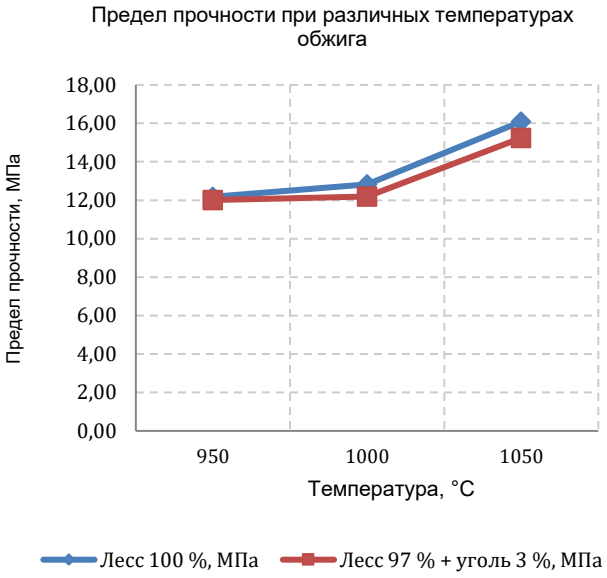


Рисунок 5 - Зависимость предела прочности на сжатие от температуры обжига

Заключение

С целью определения пригодности глинистого сырья месторождения «Чап» в качестве сырья для производства огнеупорных (термостойких) материалов проведены лабораторные испытания технологической пробы. Методика подготовки, испытаний образцов отработана в соответствии нормативными документами.

В составе глины «Чап» содержится SiO_2 57,76 %, Al_2O_3 21,12 % Суммарная доля CaO, MgO, Na_2O, K_2O равна 5,16 %, эти компоненты могут ускорять жидкофазное спекание, одновременно ограничивать огнеупорность. Повышение температуры с 950 до 1050 °С сопровождалось увеличением огневой усадки, уменьшением водопоглощения, достижением максимальных в исследованном интервале значений плотности, прочности. Изменения связаны с развитием межчастичных контактов, уплотнением поровой структуры. Добавление 3 % угля снизило воздушную усадку с 5,11 до 4,53 %, но после обжига повысило водопоглощение, уменьшило плотность, прочность. Такой результат соответствует порообразующему действию выгорающей добавки. Среди изученных режимов наибольшее упрочнение обеспечил обжиг равный 1050 °С.

По результатам лабораторных исследований получены положительные результаты для создания огнеупорного (термостойкого) материала.

Благодарности

Автор выражает благодарность руководителю ОсОО «Керамик» г.Бишкек Бакирову Асана за предоставленную помощь.

Литература

1. Минерально-сырьевая база Кыргызской Республики / под ред. А.К. Джаманбаева, (Илим, Бишкек, 2015), 420 с. *[Mineral resource base of the Kyrgyz Republic / ed. A. K. Dzhamanbaeva. - Bishkek: Ilim, 2015. -420 p. (in Russ.)]*

2. ГОСТ 21216-2014. Сырье глинистое. Методы испытаний. Введен 2015-07-01. *[GOST 21216-2014. Clay raw materials. Test methods. Introduced on 01/07/2015. (in Russ.)]*

3. S. Bose and C. Das, *Introduction to Ceramics: Fabrication, Characterizations, and Applications*, (CRC Press, Boca Raton, 2024).

4. M.V. Vasić, P.M. Velasco, N. Mijatović, M. Radormirović and Z. Radojević, Sustainable approach to raw clays for ceramic and refractory applications: insights from updated traditional ternary diagrams, *Clay Minerals* **59** (3), 202 (2024). https://doi.org/10.1180/clm.2024.20

5. G.W. Brindley, M. Nakahira, The Kaolinite–Mullite Reaction Series: III. The High-Temperature Phases, *Journal of the American Ceramic Society* **42**(7), 319 (1959). 10.1111/j.1151-2916.1959.tb14316.x.

6. S. Lee, Y.J. Kim, H.-S. Moon, Phase Transformation Sequence from Kaolinite to Mullite Investigated by an Energy-Filtering Transmission Electron Microscope, *Journal of the American Ceramic Society* **82** (10), 2841 (1999). https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02165.x

7. C.-Y. Chen, W.-H. Tuan, Evolution of Mullite Texture on Firing Tape-Cast Kaolin Bodies, *Journal of the American Ceramic Society* **85** (5), 1121 (2002). https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00232.x

8. W.M. Carty, U. Senapati, Porcelain-Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior, *Journal of the American Ceramic Society* **81** (1), 3 (2025). https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x

9. A.K. Chakraborty, Phase Transformation of Kaolinite Clay, (New Delhi, Springer, 2014). https://doi.org/10.1007/978-81-322-1154-9

10. A. Aras, The Change of Phase Composition in Kaolinite- and Illite-Rich Clay-Based Ceramic Bodies, *Applied Clay Science* **24** (3-4), 257 (2004). https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.08.012

11. G. Cultrone, C. Rodríguez-Navarro, E. Sebastián, O. Cazalla, M.J. de la Torre, Carbonate and Silicate Phase Reactions during Ceramic Firing, *European Journal of Mineralogy* **27** (3), 621 (2001). https://doi.org/10.1127/0935-1221/2001/0013-0621

12. S.N. Monteiro, C.M. Vieira, Influence of Firing Temperature on the Ceramic Properties of Clays from Campos dos Goytacazes, Brazil, *Applied Clay Science* **27** (3–4), 229 (2004). https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.03.002

13. H. Baccour, M. Medhioub, F. Jamoussi, T. Mhiri Influence of Firing Temperature on the Ceramic Properties of Triassic Clays from Tunisia, *Journal of Materials Processing Technology* **209** (6), 2812 (2009). https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.055

14. V.-G. Lee, T.-H. Yeh, Sintering Effects on the Development of Mechanical Properties of Fired Clay Ceramics, Materials Science and Engineering: A **485** (1–2), 5 (2008). https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.068

15. B.K. Ngun, H. Mohamad, S.K. Sulaiman, K. Okada, Z.A. Ahmad, Some Ceramic Properties of Clays from Central Cambodia, Applied Clay Science **53** (1), 33 (2011). https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.017

16. D. Njoya, M. Hajjaji, D. Njopwouo, Effects of Some Processing Factors on Technical Properties of a Clay-Based Ceramic Material, *Applied Clay Science* **65-66**, 106 (2012). https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.05.013

17. M. Dondi, M. Raimondo, C. Zanelli, Clays and Bodies for Ceramic Tiles: Reappraisal and Technological Classification, *Applied Clay Science* **96**, 91 (2014). https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.01.013

18. M. Garcia-Valles, D. Cuevas, P. Alfonso, S. Martínez, Thermal Behaviour of Ceramics Obtained from the Kaolinitic Clays of Terra Alta, Catalonia, Spain, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **147** (9), 5303 (2022). https://doi.org/10.1007/s10973-021-11075-9

19. S. Martínez-Martínez, L. Pérez-Villarejo, E. Garzón, P.J. Sánchez-Soto Influence of Firing Temperature on the Ceramic Properties of Illite-Chlorite-Calcitic Clays, Ceramics International **49** (4), 24541 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.077

20. P.J. Sánchez-Soto, E. Garzón, L. Pérez-Villarejo, Sintering Behaviour of a Clay Containing Pyrophyllite, Sericite and Kaolinite as Ceramic Raw Materials: Looking for the Optimum Firing Conditions, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* **62** (1), 26 (2023). https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.09.001

21. T.F. Choo, M.A. Mohd Salleh, K.Y. Kok, K.A. Matori, & S. Abdul Rashid, A Study on the Utilization of Coal Fly Ash Derived Grog in Clay Ceramics, *Materials*, **13** (22), 5218 (2020). https://doi.org/10.3390/ma13225218

22. H. Kariem, C. Hellmich, T. Kiefer, A. Jäger, J. Füssl, Micro-CT-Based Identification of Double Porosity in Fired Clay Ceramics, *Journal of Materials Science* **53** (13), 9411 (2018). https://doi.org/10.1007/s10853-018-2281-9

23. M. Sütçü, S. Akkurt, The Use of Recycled Paper Processing Residues in Making Porous Brick with Reduced Thermal Conductivity, *Ceramics International* **35** (7), 2625 (2009). https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.02.027

24. C. Bories, M.-E. Borredon, E. Vedrenne, G. Vilarem Development of Eco-Friendly Porous Fired Clay Bricks Using Pore-Forming Agents: A Review, *Journal of Environmental Management* **143**, 186 (2014). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.006

25. P. Muñoz Velasco, M.P. Morales Ortíz, M.A. Mendívil Giró, L. Muñoz Velasco, Fired Clay Bricks Manufactured by Adding Wastes as Sustainable Construction Material - A Review, *Construction and Building Materials* **63**, 97 (2014). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045

Сведения об авторе:
Куйкеев Азамат Байышевич – научный сотрудник, Лаборатория порошковых материалов, Институт физики имени академика Ж.Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики при президента Кыргызской Республики (Бишкек, Кыргызская Республика, e-mail: horoho_azama@mail.ru).

Автор туралы мәлімет:
Азамат Куйкеев – Қырғыз Республикасы Президентінің жанындағы Қырғыз Республикасы Ұлттық ғылым академиясының академик Ж. Жээнбаев атындағы физика институтының ұнтақ материалдары зертханасының ғылыми қызметкері (Бішкек, Қырғыз Республикасы, e-mail: horoho_azama@mail.ru)

Information about author:
Azamat Kuikeev – researcher, Laboratory of Powder Materials, Institute of Physics named after Academician Zh. Jeenbaev of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic under the President of the Kyrgyz Republic (Bishkek, Kyrgyz Republic, e-mail: horoho_azama@mail.ru)

Мақала тарихы*: түсті: 01 шілде 2026; түзетілді: 22 шілде; қабылданды: 06 қазан 2026.*
Article history: *received: 01 July 2026; revised: 22 July; accepted: 06 October 2026.*
История статьи: *поступила: 01 июля 2026; после доработки: 22 июля; принята: 06 октября 2026.*