ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Влияние механической и тепловой обработки на характеристики сапонитсодержащего материала

Т.Н.Орехова[1], **М.Н.Сивальнева**[1]✉, **М.А.Фролова**[2], **В.В.Строкова**[1], **Д.О.Бондаренко**[1]
[1] *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*
[2] *Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Орехова Т.Н., Сивальнева М.Н., Фролова М.А., Строкова В.В., Бондаренко Д.О. Влияние механической и тепловой обработки на характеристики сапонитсодержащего материала // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16487. С. 91-99. EDN VZGFOR

Аннотация
Решение задач современного строительного материаловедения сводится к получению высококачественных материалов, расширению и поиску рациональной сырьевой базы, которые могут быть осуществлены за счет использования различных отходов производств. В настоящей работе рассматривается возможность применения отхода горноперерабатывающей промышленности – сапонитсодержащего материала (ССМ), получаемого при обогащении кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова, в качестве активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов. Исследовалось влияние механической и температурной обработки на ряд свойств материала, отобранного из хвостохранилища и находящегося в исходном состоянии. Изучение активности поверхности образцов ССМ заключалось в определении сорбционной емкости, кислотно-основных центров и их распределения. Определен рост активности поверхности частиц материала в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке. Эти эффекты связаны с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы, что подтвердилось в ходе проведения термического анализа. Температурное воздействие не имеет выраженного влияния на микроструктуру, отмечается «сглаженность» частиц и формирование консолидированной поверхности структурных элементов сапонитсодержащего материала.

Ключевые слова
сапонитсодержащий материал; отходы обогащения руд; поверхностная активность; механоактивация; обжиг

Финансирование
Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г.Шухова.

Поступила: 08.05.2024 ***Принята: 07.11.2024*** ***Онлайн: 12.12.2024*** ***Опубликована: 25.04.2025***

Введение

Строительное материаловедение в современных условиях ориентировано на производство высококачественных материалов при достижении эффективных технико-экономических показателей. Поиск рациональных решений позволяет расширить сырьевую базу, что может быть осуществлено применением вторичных продуктов различных производств и отходов промышленности.

Отходы техногенного происхождения, в частности горнопромышленной отрасли, относятся к важному источнику сырьевых ресурсов промышленности строительных материалов (ПСМ). Около 40 млрд т таких отходов, из них не менее 30 % вскрышных пород и хвостов обогащения, практически все металлургические и топливные шлаки, являются потенциальным сырьем для отрасли ПСМ [1]. Объемы отходов ежегодно увеличиваются, складируются и занимают огромные площади. Горнопромышленные отходы могут обоснованно считаться резервным запасом сырьевой базы Российской Федерации, равноценно соответствовать открытию новых месторождений. Несмотря на огромный ресурсный потенциал как источника сырья и возможность снижения прессинга на экологию, в нашей стране они не нашли должной степени применения, используются нерационально и в малых количествах.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Т.Н.Орехова, М.Н.Сивальнева, М.А.Фролова, В.В.Строкова, Д.О.Бондаренко, 2024

В зарубежных странах уровень вовлечения отходов в хозяйственный оборот гораздо выше и имеет определенный опыт применения. Многие развитые страны ориентируют политику на энерго- и ресурсосбережение, активно реализуя практику утилизации техногенных отходов и разработки новых технологических решений за счет повторного использования в различных производствах. К примеру, лидерами по переработке отходов являются США и Япония, доля отходов в общем сырьевом балансе этих государств составляет около 26 %, у большинства экономически развитых стран этот показатель колеблется в пределах 16-20 %, в СССР он составлял 15 %, в современной России – около 10 % [1, 2]. Вторичное применение ресурсов набирает обороты и в других странах [3-6] (Канада, Великобритания, ЮАР, Испания, Индия и др.)*.

Представителями научной школы САФУ им. М.В.Ломоносова совместно с АО «Севералмаз» и учеными БГТУ им. В.Г.Шухова активно ведутся исследования одного из видов отходов горноперерабатывающей промышленности – сапонитсодержащего материала (ССМ), который является вторичным продуктом обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В.Ломоносова обогатительной фабрики АО «Севералмаз» (Архангельская обл.), на предмет его использования при производстве строительных материалов [7]. Уже разработаны технологии применения ССМ при изготовлении керамической плитки, минераловатных материалов, магнезиальных и композиционных вяжущих [8-11]. В работе предлагается расширение спектра областей применения ССМ в промышленности строительных материалов, как самой крупнотоннажной по потребляемому сырью и производимой продукции, за счет разработки активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов.

Специфика состава и свойств ССМ предопределила достаточно широкий спектр областей его использования, помимо ПСМ. Так, данный вторичный продукт применяется как основа бурового раствора [12], как сорбент для очистки промышленных стоков [13], для гидроизоляции при обустройстве полигонов хранения твердых бытовых отходов, радиоактивных могильников и для фильтрации сточных вод, а также в медицине и курортном деле [14]. Особое место сапонит занимает в сельском хозяйстве в качестве минеральной добавки к кормам и удобрениям, наполнителя и гранулянта, используется для детоксикации грунтов, сорбции гербицидов и пестицидов, вносимых в почву, тяжелых металлов и др. [14].

Сапонитсодержащий материал представляет собой песчано-глинистую породу в обводненном состоянии (с влажностью не менее 60 %) и имеет:

• минералогический состав – основной компонент сапонит (60-70 %), оставшаяся масса породы – кварц, монтмориллонит, палыгорскит, флогопит, клинохлор, тальк, доломит;

• химический состав – основные оксиды SiO_2 (53 %), MgO (17 %), Fe_2O_3 (10 %), Al_2O_3 (9 %), CaO (4 %) [8].

Процесс обогащения глинизированной породы требует большого расхода воды. Нахождение сырья в суспендированном состоянии затрудняет его дальнейшее применение в строительной отрасли, сложности при выделении твердой фракции не позволяют использовать воду в качестве оборотной из-за низкой степени очистки [12, 13, 15-17]. В связи с этим требуется подбор способа и параметров обработки исходного сырья, позволяющих рационально и эффективно применять ССМ в промышленности строительных материалов.

Известно, что механоактивация оказывает влияние не только на характеристики дисперсности исходного сырья, но и на свойства его поверхности [18-21], повышая активность для последующего взаимодействия компонентов материала [22, 23].

Ввиду принадлежности ССМ к глинистым минералам следует рассматривать влияние температурной обработки. Использование обожженных глин как минеральных добавок в цементных системах имеет достаточно большую историю [24-27]. Данный компонент характеризуется повышенной активностью, которая обусловлена протеканием процессов, вызванных температурным воздействием и связанных с формированием первичных продуктов дегидратации и разрушением глинистых минералов, что приводит к перестройке кристаллической решетки. Отмечается, что основные глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, иллит, бентонит и др.) переходят в

* Cement Statistics and Information. URL: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information (дата обращения 08.05.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

активную форму именно при температуре 200±600 °С [25, 26, 28, 29]. При обращении к сапонитсодержащему материалу, выделенному из суспензии оборотной воды, установлено, что модификационные превращения прекращаются при температуре 900 °С, воздействие которой приводит к изменению ряда свойств – росту истинной плотности, снижению удельной поверхности, пористости и водопоглощения [8, 30].

Строение сапонита, выступающего основным минералом отхода обогащения кимберлитовых руд, представлено трехслойной структурой с разбухающей кристаллической решеткой, которая позволяет сорбировать влагу. Сапонит имеет достаточно слабые связи между слоями, которые образованы силами Ван-дер-Ваальса. В результате этого процесс измельчения сырья может сопровождаться модификацией полученного порошка. Механическое воздействие способствует трансформации кристаллической решетки материала [22] с последующим переходом в двухслойную структуру серпентина [25]. Сам по себе серпентин также может являться эффективным компонентом строительных материалов [31, 32]. Дальнейшая высокотемпературная обработка приводит к модификации серпентина в форстерит [30]. Таким образом, выстраивается цепочка преобразований минералов в результате механической и тепловой обработки (рис.1). Первоначально механическое измельчение сапонитсодержащего сырья интенсифицирует стадии процесса химических превращений, а увеличение длительности работы помольного агрегата позволяет повысить количественный выход серпентина и, как следствие, форстерита.

Для установления характера влияния технологии выделения ССМ на его свойства необходимо исследовать влияние механического и температурного воздействия на исходную суспензию, отобранную из хвостохранилища, до введения различных флокулянтов и иных веществ.

Методы

В работе рассмотрена потенциальная возможность применения сапонитсодержащего материала в качестве минеральной добавки для бетонов. Исследовалась суспензия в исходном (т.е. обводненная порода песчано-глинистого состава), а также механоактивированном высушенном и обожженном состояниях.

ССМ был высушен до постоянной массы в сушильном шкафу с терморегулятором при температуре 70 °С. Далее был проведен помол сухим способом до высокодисперсного состояния в лабораторной шаровой мельнице с уралитовыми мелющими телами, чтобы исключить вероятность намола (обычно бывает в металлических мельницах). Удельная поверхность измерялась прибором ПСХ-11М(SP), в котором используется общепринятый в мировой практике метод газопроницаемости Козени – Кармана.

Температурная обработка осуществлялась в муфельной печи при 700 °С, выбор температурного режима согласован с известными данными.

Исследовалась реакционная активность [33-35] сапонитсодержащего сырья на основе:

• сорбционной емкости, определяемой по методу Запорожца путем изменения концентрации $Ca(OH)_2$ в насыщенном растворе за счет поглощения частицами ССМ извести. Определение количества $Ca(OH)_2$ в растворе осуществлялось титрованием раствором соляной кислоты концентрацией 0,05 н. Количество поглощенного гидроксида кальция (1 мг на 1 г исследуемого вещества) из известкового раствора оценивалось разностью начальной и конечной концентраций. При этом измерения проводились через заданные промежутки времени (1; 3; 6; 24 и 30 ч с момента введения навески исследуемого материала в известковый раствор), выбранные согласно требуемой точности измерения и специфике образцов;

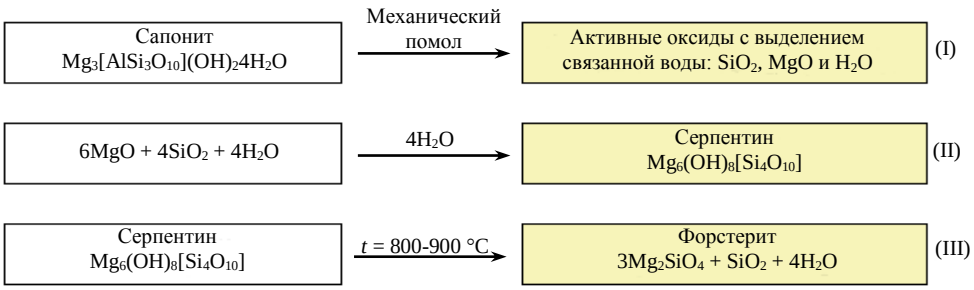


Рис.1. Схемы преобразований минералов [30]

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• кислотно-основных свойств, позволяющих оценивать изменение поверхностных характеристик за счет использования индикаторного метода распределения центров адсорбции (РЦА) и теории Бренстеда – Лоури и Льюиса. Суть метода заключается в том, что различные кислотные и основные центры на поверхности твердого тела избирательно адсорбируют молекулы индикаторов. Изучение поверхностных свойств твердого вещества подразумевает определение концентрации активных центров *q*pKa, эквивалентной количеству адсорбированного индикатора кислотной силы pKa. Полученные результаты позволяют регулировать и прогнозировать механизм протекания физико-химических процессов на поверхности твердого тела.

При определении активности производились три параллельных измерения отобранных проб, погрешность между полученными значениями составляла 2-3 %.

С помощью прибора синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter фирмы NETZSCH, позволяющего сочетать методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ), был исследован образец исходного ССМ, высушенный до постоянной массы, в температурном диапазоне 25-1200 °С. Метод основан на регистрации разницы тепловых потоков, идущих от испытуемого и эталонного образцов. Тепловой поток измеряется как разница температур в двух точках измерительной системы в определенный момент времени. Измерения потоков теплоты и массы проведены при полностью идентичных условиях.

Микроструктура ССМ изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (Tescan). Съемка происходила в режиме высокого вакуумного разряжения.

Обсуждение результатов

Для высушенного исходного ССМ, содержащего глинистый и песчаный компоненты, определена удельная поверхность – 165 м^2/кг, оптимальная для данного типа оборудования (шаровая мельница). Время помола при этом составило 40 мин. Более длительный помол не является эффективным, поскольку не происходит существенного роста удельной поверхности, но значительно увеличивается энергопотребление.

Для определения сорбционной емкости образцов после механоактивационного воздействия исследована активность и динамика поглощения извести $Ca(OH)_2$ из раствора навеской материала. С целью детализации результата изучены образцы ССМ на всех этапах помола – после 10, 20, 30 и 40 мин.

На основании полученных результатов можно заключить, что с повышением удельной поверхности растет объем поглощенной из раствора извести ($Ca(OH)_2$). Активность для образцов, измельченных в течение 40 мин, составляет 69,2 мг/г, что на 6 % выше, чем для измельченного при 10 мин, и на 39 % выше, чем для ССМ в высушенном состоянии (без помола – 0 мин). Положительная динамика вызвана механоактивационным воздействием, которое является доступным и эффективным способом повышения активности минеральных дисперсных материалов [23, 34].

В связи с явным положительным влиянием механоактивации на величину сорбционной емкости обжигу подвергались образцы контрольного состава (исходный образец, без помола) и измельченного в течение 40 мин после обжига.

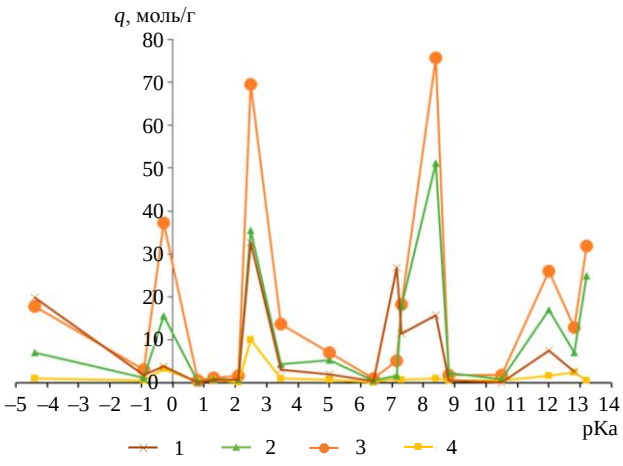


Рис.2. Распределение центров адсорбции на поверхности ССМ после механического и теплового воздействия
1 – без помола; 2 – помол 10 мин;
3 – помол 40 мин; 4 – помол 40 мин + обжиг

Температурная обработка способствует снижению активности материала на 5,7 %, по сравнению с материалом после 40 мин помола, что вызвано взаимодействием компонентов при обжиге, протеканием процессов разрушения кристаллической решетки глинистой фракции.

Для анализа кислотно-основных свойств поверхности изучались образцы ССМ, высушенные и отобранные на разных стадиях помола: контрольный – без помола, в начальной точке помола – помол 10 мин, конечной – помол 40 мин, а также проба после механоактивации в течение 40 мин и обжига при 700 °С (рис.2).

На всем диапазоне шкалы pKa наиболее высокой концентрацией активных центров обладает поверхность пробы ССМ после 40 мин помола.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 91-99
© Т.Н.Орехова, М.Н.Сивальнева, М.А.Фролова, В.В.Строкова, Д.О.Бондаренко, 2024

Отмечается их преобладание в области бренстедовских центров: для кислот Бренстеда (pKa = 2,5) – 70 ммоль/г, для оснований (pKa = 8,4) – 75 ммоль/г. Образец после 10 мин помола характеризуется снижением активности на 32 % (pKa = 8,4). Данное обстоятельство имеет логичное объяснение. Механоактивация в течение 10 мин недостаточна для достижения высокой дисперсности и высокоразвитой поверхности, как при 40 мин, когда достигается оптимальная удельная поверхность и более длительное измельчение не требуется. Механоактивированный и обожженный образец ССМ имеет минимальное количество активных центров во всех областях. Указанная корреляция значений сохраняется и при расчете общего количества центров адсорбции (табл.1).

Таблица 1

Количество центров адсорбции различной природы на поверхности частиц ССМ

Образец ССМ	Количество центров адсорбции, ммоль/г, ±2			
	Основания по Льюису	Кислоты по Бренстеду	Основания по Бренстеду	Общее количество
Без помола	25,5	39,7	64,9	130,1
Помол 40 мин	58,3	94,6	141,9	294,8
Помол 40 мин + обжиг	4,9	13,0	7,8	25,6
Помол 10 мин	23,7	47,5	98,2	169,5

Таким образом, отмечены рост активности поверхности частиц ССМ в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке, связанное с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы.

Проведено исследование реакционной активности сапонитсодержащего сырья в исходном и предварительно обработанном состоянии (помол, обжиг). Для развернутой оценки результатов представлено сравнение данных показателей с традиционными компонентами природного и техногенного происхождения, используемыми в настоящее время в качестве минеральных пуццолановых добавок (табл.2): природного кремнеземсодержащего сырья – кварцевого песка, гранита, опоки, перлита; техногенного сырья – золы Назаровской ТЭС (Красноярская обл.) и Троицкой ГРЭС (Челябинская обл.).

Следует отметить, что кислотно-основные свойства представлены избирательно, только в области кислотных центров Бренстеда, преимущественно определяющих рост активности.

Согласно данным табл.2 исследуемые образцы ССМ имеют достаточно высокие показатели активности, сопоставимые с результатами по активности для природных и техногенных материалов, применяемых в качестве пуццолановых добавок.

Таблица 2

Сравнение показателей реакционной активности традиционных и исследуемых компонентов минеральных пуццолановых добавок

Сырьевые компоненты	Способ обработки	Концентрация кислотных центров Бренстеда, ммоль/г	Сорбционная емкость, мг/г	Источник
Песок	Сухой помол	33,5	33,5	[36]
Гранит		36,3	27,9	
Опока		22,3	53,1	
Перлит		35,3	30,2	
Зола Назаровской ТЭС	–	4,4	1,0	[37]
Зола Троицкой ГРЭС		45,4	3,0	
ССМ	–	39,7	49,5	Данные автора
	Сухой помол (40 мин)	94,6	69,2	
	Сухой помол (40 мин) + обжиг	13,0	65,1	
	Сухой помол (10 мин)	47,5	65,2	

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

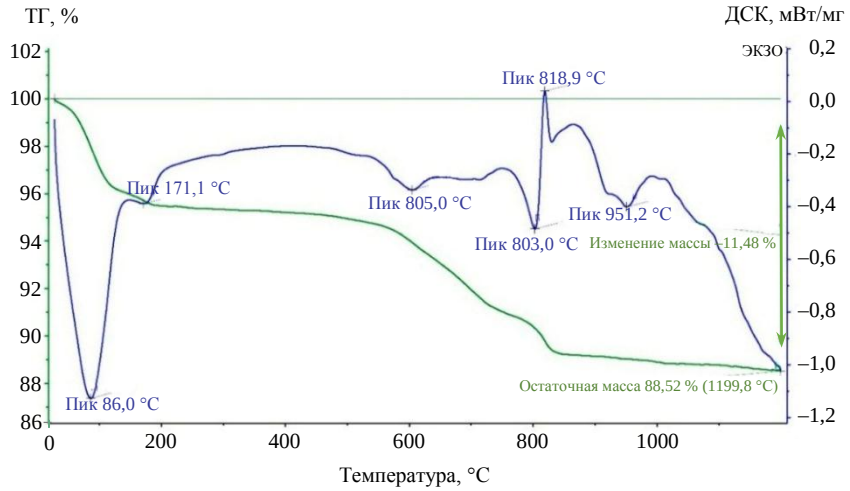


Рис.3. Термограмма образца ССМ

Термические методы анализа основаны на протекании различных химических превращений в материалах при их нагревании, которые обычно сопровождаются изменением массы. При проведении данного вида исследований образец исходного ССМ высушивался до постоянной массы и испытывался в температурном интервале 25-1200 °С.

На полученной термограмме (рис.3) отмечается наличие термических эффектов. Протекание эндотермических процессов приходится на пики, минимумы которых соответствуют температурам 86; 171; 605; 803; 819 и 951 °С.

Наличие первого пика (86 °С), представляющего эндотермический тепловой эффект, связано с удалением адсорбционно-связанной воды. Именно с этим фактом связан выбор температурного значения сушки образцов сапонитовой суспензии – 70 °С, обусловленный возможностью минимизации структурных изменений и сохранения исходных параметров и характеристик материала. Второй пик (171 °С) также характеризуется эндоэффектом и соответствует удалению межплоскостной/межпакетной воды.

Отмечен небольшой эндотермический пик при 575 °С (на термограмме он не обозначен), который связан с переходом низкотемпературного α-кварца SiO_2 в высокотемпературный β-кварц.

Пики 605 и 803 °С, а также пики незначительного размера, приходящиеся на температуру около 700 °С (не обозначены на рис.3) – это эндотермические эффекты, соответствующие дегидроксилации серпентина, который в виде различных модификаций входит в состав сапонитсодержащего материала [30]. Его формирование может быть вызвано образованием активной формы оксидов магния и кремния в водной дисперсионной среде. Наиболее ярко выраженный пик экзотермического теплового эффекта соответствует 819 °С, связан с образованием высокотемпературного форстерита из серпентина (данный пик также означает, что дегидратация серпентина закончилась). Полученные результаты подтверждаются ранее выполненными исследованиями [8, 30]. По окончании нагрева происходит постепенное спекание частиц сапонитсодержащего материала.

При термогравиметрическом анализе фиксируется кривая потери массы в зависимости от температурных изменений. Общая потеря массы образца –11,48 %. На диапазоне температур 200-600 °С отмечается участок плато, который демонстрирует достаточную устойчивость и отсутствие химических превращений. Резкое падение на гравиметрической кривой свидетельствует о химическом разложении материала.

Изучение микроструктуры вещества – один из информативных методов исследований, позволяющий выявить структурные особенности объекта, определить размерные параметры отдельных элементов, форму и морфологию поверхности частиц, наблюдать взаимодействие компонентов системы, образование новых структур, дефектности и др. Применительно к сырьевым компонентам для производства строительных материалов данные исследования в комплексе с физико-химическими методами анализа вещества позволяют дать прогнозную оценку эффективности использования тех или иных компонентов в составе полиминеральных полидисперсных сырьевых смесей, а также объяснить результаты, полученные аналитическим путем.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 91-99
© Т.Н.Орехова, М.Н.Сивальнева, М.А.Фролова, В.В.Строкова, Д.О.Бондаренко, 2024

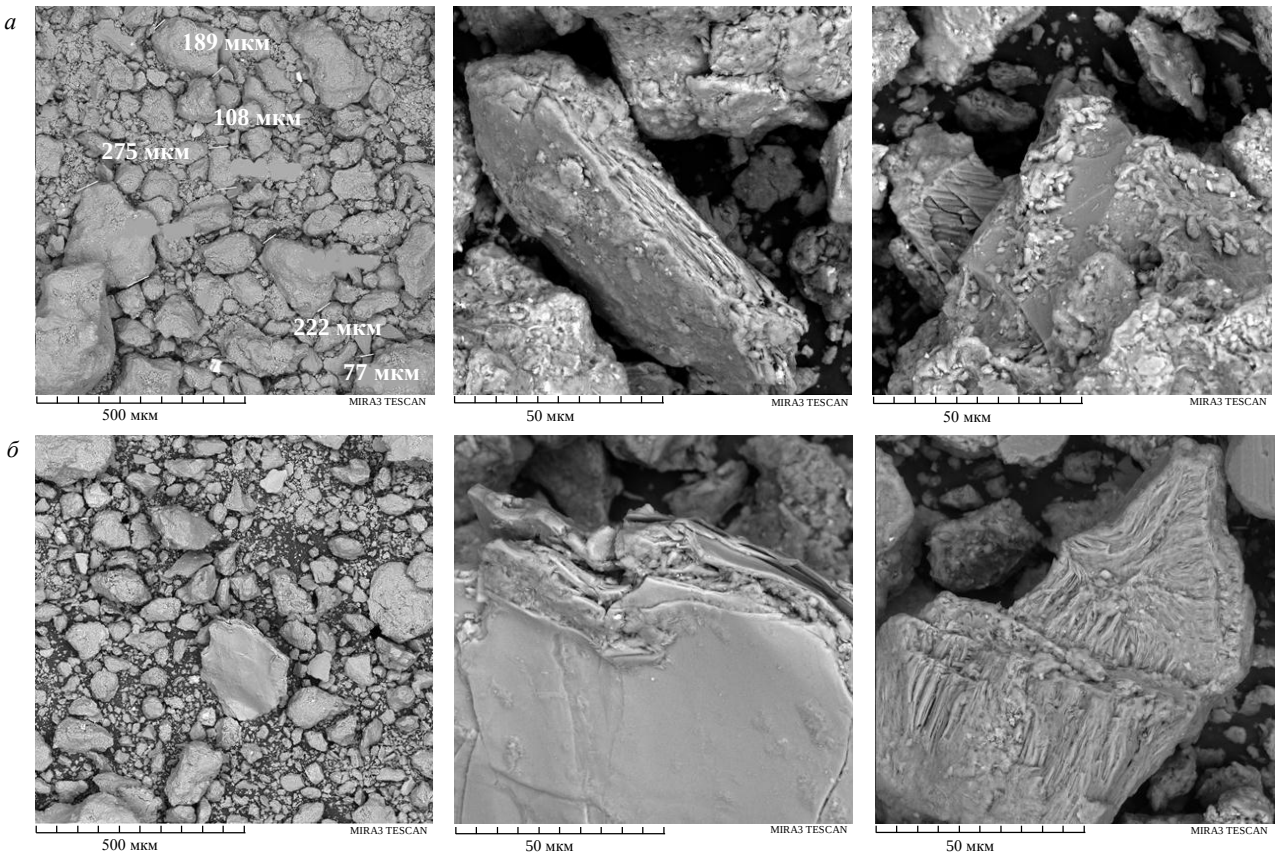


Рис.4. Микроструктура ССМ:
а – механоактивированного; *б* – механоактивированного и термообработанного

Изучение микроструктуры осуществлялось на аналогичных образцах высушенного ССМ после механической и тепловой обработки. Из анализа снимков следует, что основная масса образца механоактивированного ССМ сложена полидисперсными частицами песчаной и глинистой составляющих (рис.4, *а*). Наиболее крупными выступают частицы кварца, имеющие размер до 300 мкм. Морфология частиц угловатая, с раковистым изломом, характерным для кварца. Минеральные зерна кварца обладают различной степенью окатанности. Наблюдается «наливание» на частицы кварца глинистых агрегатов. Глинистые частицы хорошо идентифицируются по характерной пластинчатой форме и слоистой структуре. Слои глинистых минералов сформированы преимущественно тонкими листообразными структурами, плотно прилегающими друг к другу.

Общий характер микроструктуры образцов ССМ после температурного воздействия сохраняется и обеспечивается наличием полидисперсной системы зернистых частиц кварца и глинистых агрегатов пластинчатой формы (рис.4, *б*). Отличие от образцов до термообработки состоит в приобретении материалом некоторой консолидированной поверхности частиц ССМ.

На основе проведенного микроскопического анализа образцов ССМ в виде механоактивированного и обожженного дисперсного порошка определено, что основная масса материала сложена зернами кварца с угловатым изломом и пластинчатыми частицами глинистых минералов с различной слоистостью.

Заключение

В статье рассмотрена возможность применения сапонитсодержащего материала, являющегося отходом обогащения кимберлитовых руд при добыче алмазов на месторождении им. М.В.Ломоносова, в качестве активной минеральной добавки для цементных вяжущих и бетонов. С этой целью оценивалось влияние механической и температурной обработки на ряд свойств материала, отобранного из хвостохранилища и находящегося в исходном состоянии.

Изучение активности поверхности образцов ССМ сводилось к определению сорбционной емкости, кислотно-основных центров, их распределения и позволило определить рост активности

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

поверхности частиц материала в результате механоактивационного воздействия и ее снижение при температурной обработке, что связано с фазовыми перестройками и структурными изменениями песчано-глинистой породы.

В результате термического метода анализа выявлены эндотермические тепловые эффекты, связанные с удалением адсорбционно-связанной и межплоскостной воды, переходом низкотемпературного α-кварца SiO_2 в высокотемпературный β-кварц, дегидроксилацией серпентина и последующим образованием высокотемпературного форстерита.

Микроскопический анализ указывает на преобладание основной массы материала из зерен кварца и пластинчатых частиц глинистых минералов с различной слоистостью. Температурное воздействие не имеет выраженного влияния, отмечается некоторая «сглаженность» и консолидация (спекание) поверхности структурных элементов сапонитсодержащего материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ларичкина Ф.Д., Кныша В.А.* Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 252 с.
2. *Винслав Ю.Б., Лисов С.В., Лунькин А.Н.* К эффективному управлению развитием минерально-сырьевого комплекса России: проблемы недропользования // Российский экономический журнал. 2017. № 3. С. 37-60.
3. *Marrocchino E., Zanelli C., Guarini G., Dondi M.* Recycling mining and construction wastes as temper in clay bricks // Applied Clay Science. 2021. Vol. 209. № 106152. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106152
4. *Vo T.L., Nash W., Del Galdo M. et al.* Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 336. № 130213. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130213
5. *Benahsina A., El Haloui Y., Taha Y. et al.* Substitution of natural clay by Moroccan solid mining wastes to manufacture fired bricks // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 58. Part 4. P. 1324-1330. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.211
6. *Dod R.D., Dhodare S.S., Bhandari J. et al.* Extraction of sand from the complex matrix of coal mining dump waste: A sustainable approach in Indian context // Cleaner Materials. 2024. Vol. 12. № 100243. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100243
7. *Pashkevich M.A., Alekseenko A.V.* Reutilization Prospects of Diamond Clay Tailings at the Lomonosov Mine, Northwestern Russia // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 6. № 517. DOI: 10.3390/min10060517
8. *Малыгина М.А., Айзенштадт А.М., Дроздюк Т.А. и др.* Структурная модификация сапонитсодержащего материала при его механическом диспергировании // Строительные материалы. 2022. № 9. С. 32-38. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-32-38
9. *Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Parinov I.A.* Use of technogenic raw materials in ceramic technology // Open Ceramics. 2024. Vol. 18. № 100578. DOI: 10.1016/j.oceram.2024.100578
10. *Migunthanna J., Rajeev P., Sanjayan J.* Waste Clay Bricks as a Geopolymer Binder for Pavement Construction // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 11. № 6456. DOI: 10.3390/su14116456
11. *Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H.* Advances in alternative cementitious binders // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Iss. 12. P. 1232-1243. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012
12. *Зубкова О.С., Панкратьева К.А.* Комплексная переработка сапонитовых руд Ломоносовского месторождения алмазов // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 8 (243). С. 129-130.
13. *Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А.* Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 21-29. DOI: 10.31897/PMI.2023.1
14. *Косарева Е.Н., Кабачкова Н.В., Романов Е.М., Шабанова Е.Н.* Применение сапонитсодержащих материалов в качестве минерального удобрения при выращивании картофеля // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2018. № 28 (33). С. 11-20.
15. *Облицов А.Ю.* Некоторые аспекты утилизации высокоглинистых отходов обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 7. С. 390-392.
16. *Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С.* Усовершенствование технологии обогащения сапонитовой руды в процессе добычи алмазов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1 (205). С. 74-80. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-1-74-80
17. *Jones T.R., Poitras J., Paterson D., Southam G.* Historical diamond mine waste reveals carbon sequestration resource in kimberlite residue // Chemical Geology. 2023. Vol. 617. № 121270. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2022.121270
18. *Stroganov V., Sagadeev E., Ibragimov R., Potapova L.* Mechanical activation effect on the biostability of modified cement compositions // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 246. № 118506. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118506
19. *Sanchez F., Sobolev K.* Nanotechnology in concrete – A review // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Iss. 11. P. 2060-2071. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014
20. *Sadique M., Al-Nageim H., Atherton W. et al.* Mechano-chemical activation of high-Ca fly ash by cement free blending and gypsum aided grinding // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 43. P. 480-489. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.050
21. *Sharmin S., Sarker P.K., Biswas W. et al.* Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 412. № 134848. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134848
22. *Айзенштадт А.М., Строкова В.В., Нелюбова В.В. и др.* Физико-химические трансформации сапонитсодержащего материала при его активации измельчением // Физика и химия обработки материалов. 2024. № 1. С. 53-64. DOI: 10.30791/0015-3214-2024-1-53-64
23. *Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В. и др.* Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г.Шухова. 2016. № 6. С. 85-89.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

24. *Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L.* The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41. Iss. 1. P. 113-122. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.013

25. *Sabir B.B., Wild S., Bai J.* Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review // Cement and Concrete Composites. 2001. Vol. 23. Iss. 6. P. 441-454. DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5

26. *Балыков А.С., Низина Т.А., Володин В.В., Коровкин Д.И.* Прочность цементного камня с минеральными добавками на основе обожженной глины и карбонатных пород // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4 (7). С. 26-30. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10031

27. *Володин В.В., Балыков А.С., Низина Т.А. и др.* Активность смешанного цементного вяжущего с добавками термоактивированных глин // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК): сборник материалов Национальной молодежной научно-технической конференции, 22-24 апреля 2020, Иваново, Россия. 2020. № 1. С. 779-782.

28. *van Jaarsveld J.G.S., van Deventer J.S.J., Lukey G.C.* The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers // Chemical Engineering Journal. 2002. Vol. 89. Iss. 1-3. P. 63-73. DOI: 10.1016/S1385-8947(02)00025-6

29. *Gerasimov A.M., Eremina O.V.* Application microwave radiation for directional changes of layered silicates properties // Eurasian Mining. 2021. № 1. P. 55-60. DOI: 10.17580/em.2021.01.11

30. *Drozdyuk T., Frolova M., Ayzenshtadt A. et al.* Preliminary Study on the Mechanical Activation and High-Temperature Treatment of Saponite-Containing Tailings Generated during Kimberlite Ore Dressing // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 10. № 4957. DOI: 10.3390/app12104957

31. *Jain A., Agrawal V., Gupta R.* Using serpentine in concrete: A literature review // Materials Today: Proceedings. 2023. 5 p. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.138

32. *Зинчук Н.Н.* Особенности серпентинизации кимберлитовых пород // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2017. № 3. С. 66-74.

33. *Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M. et al.* Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements – A step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. P. 22-33. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270

34. *Ядыкина В.В., Траутваин А.И.* Влияние активности наполнителей из техногенного кремнеземсодержащего сырья на прочность цементных систем // Фундаментальные исследования. 2015. № 5. С. 174-179.

35. *Скворцова Л.Н., Чухломина Л.Н., Минакова Т.С., Шерстобоева М.В.* Исследование кислотно-основных и сорбционных свойств поверхности металлокерамических композитов // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. Вып. 8. С. 1014-1019.

36. *Нелюбова В.В., Строкова В.В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М.* Комплексная оценка активности кремнеземсодержащего сырья как показателя эффективности механоактивации // Обогащение руд. 2022. № 2. С. 17-25. DOI: 10.17580/or.2022.02.03

37. *Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю.* Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 77-83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83

Авторы: **Татьяна Николаевна Орехова,** *канд. техн. наук, доцент,* https://orcid.org/0000-0002-8284-9811 (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), **Мариана Николаевна Сивальнева,** *канд. техн. наук, доцент,* 549041@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4957-9207 (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), **Мария Аркадьевна Фролова,** *канд. хим. наук, доцент,* https://orcid.org/0000-0003-4079-5066 (*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В.Ломоносова, Архангельск, Россия*), **Валерия Валерьевна Строкова,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой,* https://orcid.org/0000-0001-6895-4511 (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), **Диана Олеговна Бондаренко,** *канд. техн. наук, доцент,* https://orcid.org/0000-0001-9708-2791 (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0