

ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЁННОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ МУСКОВИТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУРГОВАТ ТАДЖИКИСТАНА

¹Ф.Б. Мирзозода, ²Азим Иброхим

¹ Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

² Министерство транспорта Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

В статье представлены результаты исследований деформационных и прочностных свойств измельченных силикатных отходов, полученных после комплексной переработки минерала мусковит месторождения Курговат Таджикистана. На основе полученных компрессионных данных установлена умеренная сжимаемость материала. Полная вертикальная деформация при максимальном давлении 0,30 МПа составила 0,76 мм (3,04 % от начальной высоты образца). Интенсивная осадка на начальных ступенях нагружения обусловлена переупаковкой и параллельной ориентацией пластинчатых чешуек слюды. В ходе сдвиговых испытаний зафиксирован закономерный рост сопротивления сдвигу при увеличении нормального давления от 0,10 до 0,30 МПа. Построена линейная зависимость прочности, по которой определены основные механические параметры исследуемой дисперсной системы: удельное сцепление смеси составило 0,02 МПа, а угол внутреннего трения равен 32°. Показано, что отсутствие жестких цементационных связей между измельченными частицами обуславливает высокую деформируемость и умеренную прочность смеси на сдвиг.

Ключевые слова: минерал мусковит и силикатные отходы, система АСИС, компрессионные испытания, одноплоскостной сдвиг и деформация, безотходные технологии.

ОЗМОИШҶОИ ОМЕХТАИ МАЪДАНИИ МАЙДАКАРДАШУДАИ МУСКОВИТИ КОНИ КУРГОВАТИ ТОҶИКИСТОН

Ф.Б. Мирзозода, Азим Иброҳим

¹ Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ, ш.Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

² Вазорати нақлиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш.Душанбе, Республика Таджикистан

Дар мақола натиҷаҳои тадқиқоти ҳосиятҳои деформатсионӣ ва мустаҳкамии партовҳои силикати резакардашуда, ки пас аз коркарди комплекси минерали мусковити кони Курговати Тоҷикистон ба даст омадаанд, оварда шудаанд. Дар асоси маълумоти компрессионии бадастомадаи фишурдашавии муътадили материал муайян карда шуд. Деформатсияи пурраи амудӣ ҳангоми фишори максималии 0,30 МПа 0,76 мм (3,04 % аз баландии аввалии намуна)-ро таъшиқ дод. Нишастии бошиддат дар зинаҳои аввали боргузорӣ бо сабаби азнавҷойгиршавӣ ва самти мувозии пулакчаҳои лавҳашакли слюда ба амал омадааст. Дар рафти озмоишҳои лағзиш афзоиши қонунии муқовимат ба лағзиш ҳангоми зиёд шудани фишори нормалӣ аз 0,10 то 0,30 МПа ба қайд гирифта шуд. Вобастагии ҳаттии мустаҳкамӣ сохта шуд, ки тавассути он параметрҳои асосии механикии системаи дисперсии тадқиқшаванда муайян карда шуданд: ҳаспҳои ҳоси омехта 0,02 МПа ва қунҷи соиши дохилӣ ба 32° баробар шуд. Нишон дода шудааст, ки набудани алоқаҳои сахти сементатсионӣ дар байни зарраҳои резакардашуда боиси деформатсияи баланд ва мустаҳкамии муътадили омехта ба лағзиш мегардад.

Калидвожаҳо: минерали мусковит ва партовҳои силикатӣ, системаи АСИС, озмоишҳои компрессионӣ, лағзиши яктестура ва деформатсия, технологияҳои бепартов.

TESTING OF CRUSHED MUSCOVITE MINERAL MIXTURE FROM THE KURGOVAT DEPOSIT OF TAJIKISTAN

F.B. Mirzozoda, Azim Ibrohim

¹ Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

² Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

The paper presents the results of investigations into the deformation and strength properties of crushed silicate waste obtained after the complex processing of the muscovite mineral from the Kurgovat deposit in Tajikistan. Based on the obtained compression data, a moderate compressibility of the material was established. The total vertical deformation at a maximum pressure of 0.30 MPa was 0.76 mm (3.04% of the initial sample height). Intensive settlement at the initial loading stages is due to the repacking and parallel orientation of the platy mica flakes. During shear tests, a regular increase in shear resistance was recorded with an increase in normal pressure from 0.10 to 0.30 MPa. A linear strength relationship was constructed, from which the main mechanical parameters of the studied disperse system were determined: the specific cohesion of the mixture was 0.02 MPa, and the internal friction angle was equal to 32°. It is shown that the absence of rigid cementation bonds between the crushed particles causes high deformability and moderate shear strength of the mixture.

Keywords: muscovite mineral and silicate waste, ASIS system, compression tests, direct shear and deformation, waste-free technologies.

Введение

В последние годы в химической промышленности Республики Таджикистан проводятся широкомасштабные мероприятия по выпуску экспортоориентированной и конкурентоспособной продукции, что приводит к значительным научным и практическим результатам. В рамках инициативы Лидера нации, уважаемого Эмомали Рахмона объявленные 2022–2026 годы «Годами развития промышленности» ставится задача продолжить реализацию индустриальной политики, направленной на обеспечение стабильности национальной экономики, увеличение доли промышленности в валовом внутреннем продукте и рост объемов производства.

В этом контексте проводится ряд исследований по комплексной переработке местного минерального сырья и внедрению безотходных технологий. Одним из таких видов сырья является минерал мусковит. После его переработки и извлечения основных компонентов остаются силикатные отходы, содержащие около 43,6% оксида кремния, а также другие сопутствующие элементы [1]. С физико-химической точки зрения мусковит представляет собой слоистый алюмосиликат калия. Высокое содержание диоксида кремния и оксида алюминия в остаточных силикатных отходах переработки делает их ценным аморфно-кристаллическим сырьем [2].

В технологии вяжущих веществ такие отходы способны выступать в роли активной минеральной добавки, проявляющей пуццолановые свойства при взаимодействии с гидроксидом кальция в процессе гидратации цемента [3]. Кроме того, высокая термическая стабильность кристаллической решетки слюды и её способность выдерживать резкие тепловые перепады без разрушения структуры создают предпосылки для термомеханического синтеза муллитоподобных фаз, необходимых для производства огнеупорных материалов [4, 5]. В связи с этим актуальной задачей является проведение комплекса анализов прочностных и деформационных характеристик данных отходов с целью их дальнейшего использования в производстве цемента, огнеупоров и другой востребованной продукции.

Материалы и методы испытания

Исследование деформационных и прочностных свойств измельчённой грунтовой смеси минерала мусковита месторождения Курговат после дробления выполнялось в лабораторных условиях на автоматизированной системе испытаний грунтов (прибор АСИС). Прибор использовался для двух видов тестов: компрессионного сжатия и одноплоскостного сдвига. Это позволило одновременно оценить, как минеральная смесь уплотняется под действием вертикальной нагрузки и как она сопротивляется разрушению при сдвиге.

Подготовка образцов и методика компрессионных испытаний.

Перед началом опыта материал был высушен до воздушно-сухого состояния, просеян и тщательно перемешан до получения однородной массы. Средняя влажность смеси составляла около 3,2 %. Образец помещали в рабочую камеру прибора и слегка уплотняли для устранения крупных пустот между частицами. Это необходимо, так как при излишне рыхлой укладке начальные деформации отражали бы не реальные свойства смеси, а лишь её первичное оседание. Слюда в данной системе выступает в роли пластинчатого и подвижного компонента.

Компрессионное испытание проводилось ступенчато. На образец последовательно подавали вертикальное давление в диапазоне от 0,05 до 0,30 МПа, фиксируя величину вертикальной деформации на каждой ступени.

Методика испытаний на сдвиг. Испытания на сдвиг также выполнялись на приборе АСИС. Образец помещали в срезную коробку, после чего к нему прикладывали заданное нормальное давление. Затем создавали горизонтальное усилие, которое постепенно увеличивали до момента разрушения (сдвига) образца. Для проведения экспериментов были выбраны нормальные давления, равные 0,10, 0,20 и 0,30 МПа. На каждой ступени фиксировалось максимальное сопротивление сдвигу. Такой подход позволяет построить линейную зависимость между нормальным напряжением и прочностью материала на сдвиг.

Результаты и обсуждение

Результаты компрессионных испытаний. Согласно полученным данным, общая вертикальная деформация при максимальном давлении 0,30 МПа составила 0,76 мм, что эквивалентно примерно 3,04 % от начальной высоты образца. На начальных этапах нагружения деформация развивалась наиболее интенсивно. При дальнейшем росте давления плотность смеси увеличивалась, вследствие чего прирост осадки (деформации) постепенно затухал (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты компрессионного испытания

Table 1 – Results of the compression test

Вертикальное давление, МПа	Вертикальная деформация, мм	Относительная деформация, %	Коэффициент Уплотнения, 1/МПа	Модуль общей деформации, МПа	Разновидность грунта по деформируемости (ГОСТ 25100-2020)
0,05	0,18	0,007	0,29	4,1	очень сильно деформируемые
0,10	0,33	0,013	0,24	5,0	очень сильно деформируемые
0,20	0,57	0,023	0,19	6,3	сильно деформируемые
0,30	0,76	0,030	0,15	7,9	сильно деформируемые

График наглядно иллюстрирует характер сжимаемости измельченных силикатных отходов в заданном диапазоне нагрузок. Компрессионная кривая отражает изменение относительной деформации образца при ступенчатом увеличении вертикального давления до 0,30 МПа. Высокая скорость осадки на первых ступенях нагружения объясняется механической переупаковкой дисперсных частиц и параллельной ориентацией пластинчатых чешуек мусковита. При максимальном давлении деформация стабилизируется и составляет 3,04 %. Анализ графика зависимости относительной деформации от вертикального давления показывает, что материал обладает умеренной сжимаемостью. При этом кривая имеет выраженный нелинейный характер: наиболее интенсивный рост деформации фиксируется на начальном этапе нагружения (до 0,10–0,15 МПа), после чего график выполаживается, что свидетельствует о постепенном уплотнении структуры смеси (рис. 1).

Компрессионные испытания показали, что исследуемый материал обладает умеренной сжимаемостью. График деформации подтверждает, что материал не проявляет свойств высокопористого рыхлого грунта, но и не является абсолютно жестким. Высокая скорость осадки на первых этапах объясняется переупаковкой частиц, сокращением порового пространства и ориентацией чешуек слюды перпендикулярно направлению нагрузки. В дальнейшем частицы сближаются, увеличивая площадь контактов, и смесь эффективнее сопротивляется последующему уплотнению (табл. 1, рис. 1).

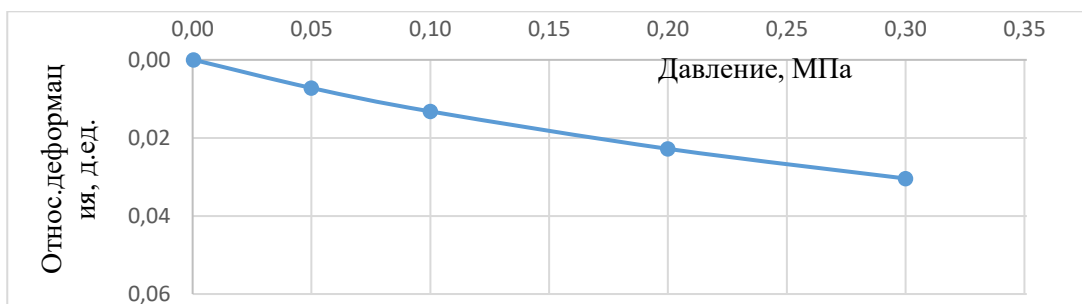


Рисунок 1 – Зависимость относительной деформации от вертикального давления

Figure 1 – Relative deformation vs. vertical pressure

Результаты испытаний на сдвиг. На рис. 2 приведена зависимость предельного сопротивления сдвигу от нормального давления, полученная по результатам одноплоскостных сдвиговых испытаний смеси в диапазоне нагрузок от 0,10 до 0,30 МПа. Прямолинейный характер графика подтверждает закономерный рост сопротивления сдвигу при увеличении нормального

давления. Графическим путем определены основные прочностные параметры дисперсной системы: угол внутреннего трения, составивший 32° , и удельное сцепление смеси 0,02 МПа. Невысокое значение удельного сцепления 0,02 МПа указывает на отсутствие жестких цементационных связей между частицами мусковита. При этом относительно высокий угол внутреннего трения 32° обусловлен шероховатостью измельченных частиц и эффектом заклинивания пластинчатых чешуек слюды при росте нормального давления.



Рисунок 2 – График зависимости предельного сопротивления сдвигу от нормального давления
Figure 2 – Shear strength vs. normal pressure

Выявленный характер деформирования измельченной смеси мусковита обусловлен выраженной анизотропией свойств слоистых минералов. Высокая сжимаемость (3,04 % от начальной высоты) на первых ступенях нагружения связана с упругим изгибом и сдвигом миканитовых чешуек относительно друг друга. При давлении до 0,10 МПа преодолевается хаотичное пространственное расположение частиц, и происходит их вынужденная плоскопараллельная ориентация (текстурирование). С завершением этого процесса при давлениях выше 0,10 МПа деформационные изменения замедляются, а контактная площадь между чешуйками существенно возрастает. Это приводит к мобилизации сил сухого трения на границах раздела фаз, что выражается в линейном росте сопротивления сдвигу при дальнейшем увеличении нормальной нагрузки (рис. 2).

Полученные значения демонстрируют закономерный рост сопротивления сдвигу с увеличением нормального давления. При нормальном давлении 0,10 МПа сопротивление сдвигу составило 0,082 МПа, а при давлении 0,30 МПа оно возросло до 0,207 МПа. Последующее возрастание давления до 0,30 МПа вызывает лишь незначительное сближение уже ориентированных слоев без разрушения самих кристаллических пластин. Сформированная таким образом плотная плоскопараллельная структура предопределяет умеренную прочность дисперсной системы на сдвиг при практически полном отсутствии сцепления (табл. 2). Вследствие такой переупаковки свободный объем пор между чешуйками слюды минимизируется, и материал переходит в более стабильное квазиоднородное состояние. Дальнейшее сопротивление смеси внешнему воздействию начинает полностью определяться внутренним трением ориентированных частиц.

Таблица 2 – Результаты испытания на одноплоскостной сдвиг
Table 2 – Direct shear test results

Вертикальная нагрузка, МПа	Касательная нагрузка, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
0,10	0,082	0,02	32
0,20	0,145		
0,30	0,207		

Комплексный анализ деформационных и прочностных свойств измельченных силикатных отходов мусковита позволил установить характер их механического поведения под нагрузкой. Согласно компрессионным испытаниям (рис. 1), материал обладает умеренной сжимаемостью с выраженной нелинейностью на начальном этапе (до 0,10 МПа), вызванной плоскопараллельной переориентацией пластинчатых чешуек слюды. Результаты одноплоскостного сдвига (рис. 2) подтверждают, что сформированная текстурированная структура обеспечивает закономерный рост сопротивления сдвигу за счет сил трения 32° при слабом удельном сцеплении 0,02 МПа. Отсутствие жестких цементационных связей между частицами предопределяет высокую деформируемость смеси, что необходимо учитывать при разработке безотходных технологий и вторичном использовании данных отходов в строительной индустрии.

Результаты сдвиговых испытаний отражают классическую тенденцию, характерную для всех зернистых и дисперсных минеральных материалов: с усилением прижатия частиц друг к другу возрастает межчастичное трение, что требует больших усилий для их взаимного смещения. Значение угла внутреннего трения указывает на то, что после завершения фазы уплотнения сопротивление сдвигу начинает определяться преимущественно силами зацепления шероховатых кромок измельченных кристаллов и базовым трением гладких базисных плоскостей слюды. Низкое удельное сцепление научно доказывает отсутствие капиллярного или химического связывания (отсутствие цементационной матрицы), что подтверждает дисперсный статус материала. Тем не менее, для дисперсной смеси на основе слюды такие значения вполне закономерны.

Заключение

В целом результаты испытаний показали, что измельчённая минеральная смесь относится к сильнодеформируемым материалам и обладает умеренной прочностью на сдвиг. С точки зрения дальнейшего использования в производстве цементного клинкера и огнеупорных материалов, высокая деформируемость материала при компрессии является технологическим преимуществом. Она облегчает процессы сухого или мокрого прессования шихты, повышая плотность сырца перед обжигом. При этом в интервале температур 800–1000 °С в процессе дегидратации мусковита происходит разрушение его гидроксильных групп, что активизирует фазовые переходы с образованием термостойких кристаллических фаз (муллита и кристобалита), обеспечивающих высокую механическую прочность готового огнеупорного или цементного камня. Таким образом, на основе изученных физико-механических свойств отходов переработки мусковита была обоснована и разработана технология их утилизации для нужд цементного и огнеупорного производств.

Рецензент: Рузиев Дж.Р. – д.т.н., профессор Таджикского национального университета.

Литература

1. Дудеров, И.Г. Общая технология силикатов / И.Г. Дудеров, Г.М. Матвеев, В.Б. Суханова. – М.: Стройиздат, 1987. – 560 с.
2. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Стройиздат, 1983. – 438 с.
3. Алексеев, Б.В. Технология производства цемента / Б.В. Алексеев. – М.: Высшая школа, 1980. – 264 с.
4. Верней, И.И. Технология асбестоцементных изделий / И.И. Верней, В.М. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 400 с.
5. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

References

1. Duderov, I.G. General Technology of Silicates / I.G. Duderov, G.M. Matveev, V.B. Sukhanova. – Moscow: Stroyizdat, 1987. – 560 p.
2. Butt, Yu.M. Chemical Technology of Binding Materials / Yu.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – Moscow: Stroyizdat, 1983. – 438 p.
3. Alekseev, B.V. Technology of Cement Production / B.V. Alekseev. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1980. – 264 p.
4. Vernei, I.I. Technology of Asbestos-Cement Products / I.I. Vernei, V.M. Kolbasov. – Moscow: Stroyizdat, 1985. – 400 p.
5. Volzhensky, A.V. Mineral Binding Materials / A.V. Volzhensky. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 464 p.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

RU	TJ	EN
Мирзозода Фарход Баходур соискатель	Мирзозода Фарход Баходур унвонҷӯ	Mirzozoda Farhod Bahodur applicant
Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАН Таджикистана	Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИ Тоҷикистон farhodpiurr@mail.ru	Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the NAS of Tajikistan
RU	TJ	EN
Азим Иброҳим	Азим Иброҳим	Azim Ibrohim
кандидат технических наук, академик МИА	номзади илмҳои техникӣ, академики АМБ	candidate of technical sciences, academic IAE
Министерство транспорта Республики Таджикистан	Вазорати нақлиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон	Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan