

Т. В. Шилова¹✉, А. Н. Дробчик

Исследование деформационно-прочностных свойств разрушенной горной породы при закреплении эпоксидной смолой

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований закрепления механически разрушенной горной породы эпоксидной смолой, которая предназначена для повышения прочности пород и геоматериалов. Установлено, что в условиях трехосного сжатия геоматериалы, представляющие собой мраморную дресву, армированную эпоксидным составом с массовым расходом 0,03, разрушаются с выраженным пределом прочности, который достигается при относительной вертикальной деформации 0,02 – 0,0045. Увеличение содержания состава до 5 масс. % приводит к повышению механической прочности в 1,4 – 1,5 раза, а при дальнейшем двух- и трехкратном увеличении - образцы выдерживают нагрузки более 5000 кПа. Значения, полученные для геоматериалов с 3 - 5 масс. % и 10 – 15 масс. % содержанием эпоксидного состава, свойственны для полускальных пород пониженной прочности и скальных пород, соответственно.

Ключевые слова: разрушенная горная порода, эпоксидный состав, деформационно-прочностные свойства, трехосное сжатие, массовое содержание смолы

T. V. Shilova¹✉, A. N. Drobchik

Study of deformation and strength properties of destroyed rock when epoxy resin reinforcement

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of the reinforcement of mechanically destroyed rock with epoxy resin, which is designed to increase the strength of rocks and geomaterials. It was found that under triaxial compression, geomaterials which are marble pebble reinforced with an epoxy composition with a mass flow rate of 0.03 are destroyed with a pronounced tensile strength, which is achieved at a relative vertical deformation of 0.002 - 0.0045. Increasing the content of the composition to 5 wt. % leads to an increase in mechanical strength by 1.4 - 1.5 times, and with a further two- and three-fold increase, the samples withstand loads of more than 5000 kPa. The values obtained for geomaterials with 3 - 5 wt. % and 10 - 15 wt. % content of epoxy composition, are typical for semi-rocky rocks of low strength and hard rocks, respectively.

Keywords: destroyed rock, epoxy composition, deformation and strength properties, triaxial compression, resin mass content

Введение

С ростом глубины горно-геологические условия освоения подземного пространства осложняются вследствие выраженного развития систем трещин в массиве, зон техногенного разрушения и дробления пород. Распространенным методом улучшения физико-механических свойств является закрепление нарушенных

скальных пород цементными и полимерными составами [1, 2]. В то же время цементные материалы имеют такие недостатки, как низкая прочность на сжатие и на растяжение, высокая пористость, и при значительных внешних напряжениях они разрушаются [3, 4]. В горном деле широко распространены полимерные эпоксидные смолы, которые используют для армирования скального массива, зон трещиноватости, крепления горных выработок. Высокая связующая способность и прочностные свойства отвержденных эпоксидных составов обеспечивают долгосрочную стабильность закрепленного массива. Эпоксидные смолы используют как в трещиноватых, пористых материалах, так и с целью консолидации несвязных крупнообломочных пород [5 - 7]. Изучение механического поведения химически закрепленных горных пород (далее геоматериалов) под воздействием внешней нагрузки имеет важное значение при освоении подземных пластов, проектировании геотехнических инженерных сооружений. С целью оценки деформации геоматериалов часто определяют пределы прочности на сжатие, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и др. [8 - 10]. Полученные данные помогают в проектировании надежных систем поддержки массива, что в итоге приводит к более безопасным и эффективным горным работам. Однако, влияние полимерной обработки на поведение трещиноватых пород и крупнообломочных пород при статических и динамических нагрузках остается слабо изученным. В статье приведены результаты деформационно-прочностных испытаний геоматериалов, представляющих собой закрепленную эпоксидной смолой разрушенную породу, в условиях трехосного сжатия.

Материалы и методы

Эксперименты проводили с грубообломочной несцементированной породой, представляющей собой разрушенный мрамор. Предварительная обработка включала высушивание до постоянной массы, рассев и отбор фракции, соответствующей дресве (размером 3 - 10 мм), определение абсолютной и насыпной плотности, значения которых в среднем составили $2,6 \text{ г/см}^3$, $1,28 \text{ г/см}^3$. С целью армирования разрушенной породы в лабораторных условиях использовали двухкомпонентную низковязкую эпоксидную смолу (далее состав ЭС), которая предназначена для инъекционного укрепления, тампонирувания трещин мощностью от 0,05 мм, заполнения пустот, связывания скальных грунтов и др. Состав ЭС образуется при смешивании до однородной консистенции компонентов А и Б в объемном отношении 2:1. Время полного отверждения смолы составляет 40 - 45 минут, вязкость смеси при 20°C менее 200 мПа·с. В отвержденном виде состав ЭС представляет собой жесткий материал, стабильный при больших деформациях, разрушающие напряжения при сжатии, растяжении, изгибе составляют около 100, 65, 35 МПа, соответственно.

Геоматериалы подготавливали посредством смешения разрушенной породы с составом ЭС. Образцы формировали при массовых соотношениях жидкой смолы и укрепляемого рыхлого материала 0,03; 0,05; 0,1; 0,15. Полученные смеси слоями размещали в пластиковых разъемных цилиндрических формах длиной 120 мм, диаметром 50 мм, уплотняя на каждом этапе, и оставляли до полного отверждения смолы. Далее геоматериалы извлекали из форм, на камнерезном станке уменьшали длину цилиндров до 100 мм. Армированную породу тестировали методом трехосного сжатия на приборе ГТ 1.3.5 при боковом давле-

нии 500 кПа, скорости осевой деформации 0,5 мм/мин до значения относительной деформации $\varepsilon_1 = 0,15$ (15%) с ограничением вертикальной нагрузки в 5000 кПа. По результатам экспериментов определяли особенности деформирования образцов, предельные нагрузки, оценивали значения модуля деформации, согласно методике ГОСТ 12248.3-2020 [11].

Результаты и обсуждение

Деформационно-прочностные свойства геоматериалов, представляющих собой разрушенный мрамор, закрепленный составом ЭС, существенно зависят от расхода смолы. В случае массового содержания состава ЭС 3 – 5 масс. % образцы разрушаются с выраженным пределом прочности (максимумом напряжения). Установлено, что для массового соотношения состава ЭС и рыхлой породы 0,03 предел прочности достигается при относительной вертикальной деформации 0,002 – 0,0045. Увеличение доли смолы до 5 масс. % приводит к повышению механической прочности геоматериала в 1,4 – 1,5 раза, при этом разрушение происходит при относительной вертикальной деформации 0,003 – 0,006 (рис. 1). Примеры геоматериалов, полученных при различных массовых соотношениях жидкого состава ЭС и разрушенного мрамора, протестированных методом трехосного сжатия, приведены на рисунке 2. По восходящим участкам зависимости «относительная вертикальная деформация – девиаторное напряжение» оценивали модуль деформации геоматериалов, значения которого в среднем составили около 1580 и 1850 МПа для образцов с 3- и 5 - % массовым содержанием жидкого состава ЭС, соответственно (рис. 1). Дальнейшее двух- и трехкратное увеличение количества укрепляющей смолы приводит к значительному росту механической прочности образцов. Они не разрушаются при вертикальной нагрузке 5000 кПа, достигая относительной вертикальной деформации 0,001-0,003. Значения модуля деформации геоматериалов, полученных при 10 – 15 % массовом содержании жидкого состава ЭС, в среднем составили 1950 – 2260 МПа.

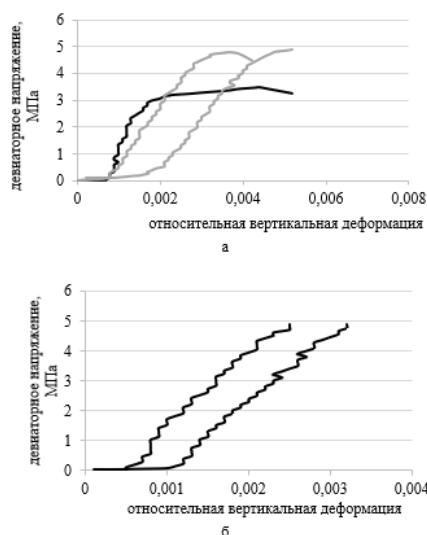


Рис. 1. Диаграммы «осевое напряжение – относительная осевая деформация» образцов геоматериалов, сформированных при массовом содержании состава ЭС: а. 3 - 5 %, серый цвет – образцы с содержанием смолы - 5 %, черный цвет – образец с содержанием смолы - 3%; б. 10 %

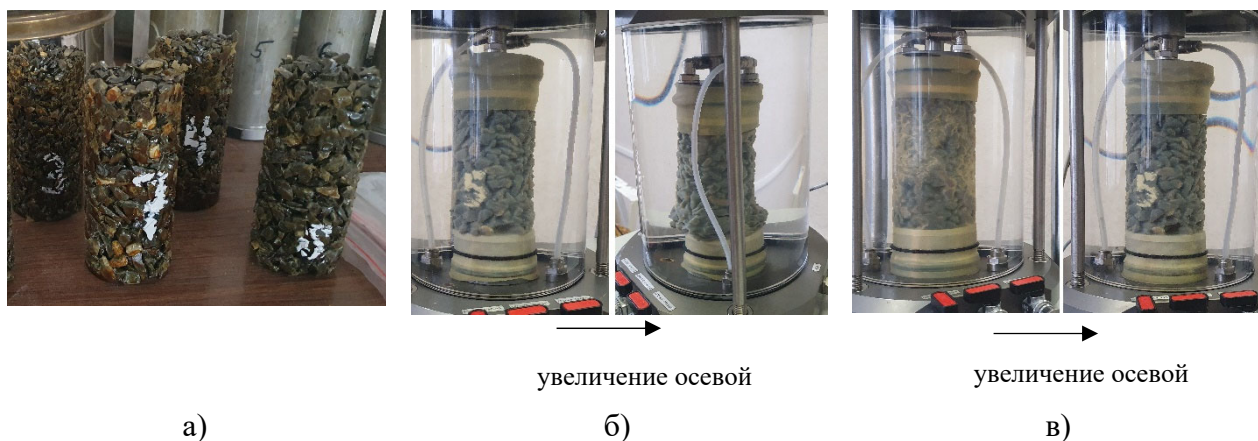


Рисунок 2 - Примеры геоматериалов до и во время испытаний на трехосное сжатие при разном массовом содержании эпоксидного состава ЭС: а – геоматериалы, армированные составом ЭС до экспериментов; б – образец с содержанием состава ЭС 3 масс. % в процессе испытания на трехосное сжатия; в – образец с содержанием состава ЭС 10 масс. % в процессе испытания на трехосное сжатия

Физико-механические свойства геоматериалов сравнивали с типичными значениями для полускальных пород, которые характеризуются жесткими структурными связями цементационного типа между образующими их минеральными зернами и агрегатами [12]. Установлено, что механическая прочность образцов, полученных при закреплении мраморной дресвы 3 - 5 масс. % состава ЭС, соответствует полускальным породам пониженной прочности. Увеличение эпоксидной смолы до 10 масс. % приводит к формированию геоматериалов с прочностью, свойственной для пород, относящихся к подклассу скальных и характеризующихся наличием кристаллизационных и цементационных жестких структурных связей.

Заключение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что расход эпоксидной смолы значительно влияет на деформационно-прочностные свойства механически разрушенной породы. Наиболее высокая прочность геоматериалов, сравнимая со значениями для скальных грунтов, возникает при массовом содержании связующего состава не менее 10 масс. %. В случае двух- и трехкратного снижения массового содержания эпоксидной смолы (до 3 – 5 масс. %) образцы разрушаются с выраженным пределом прочности, он снижается до значений 3 – 5 МПа. Выявлено, что при повышении доли эпоксидного состава в 1,5 – 1,7 раза, значения относительной вертикальной деформации образцов, которую они достигают до разрушения, в среднем увеличиваются в 1,4 раза.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052500138-4, код (шифр) научной темы FWNZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилова Т.В., Сердюков С.В., Рыбалкин Л.А. Закрепление рыхлой породы инъекцией двухкомпонентной органоминеральной смолы // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 5. – с. 178 – 187.
2. Hu Q. et al. Effect of grouting on damage and fracture characteristics of fractured rocks under mode I loading //Construction and Building Materials. – 2024. – Т. 418. – С. 135376.
3. Zhou Y. et al. Strength Recovery Effect of Bisphenol A Epoxy Resin E44 on Rock Masses with Various Crack Widths //Advances in Civil Engineering. – 2023. – Т. 2023. – №. 1. – С. 8005622.
4. Ghassemi P. and Toufigh V., Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments, Construction and Building Materials. (2020) 234, 117887.
5. Sun Y. et al. Grouting material development and dynamic grouting test of broken rock mass //Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Т. 34. – №. 5. – С. 04022072.
6. Демин В. Ф. и др. Применение закрепляющих смол для стабилизации неустойчивого горного массива в угольных шахтах //Современные тенденции и инновации в науке и производстве. – 2020.
7. Ietto F. et al. Epoxy resin for the slope consolidation intervention on the Tropea sandstone cliff (southern Calabria, Italy) //Geoheritage. – 2018. – Т. 10. – С. 287-300.
8. Isah B. W., Mohamad H., Ahmad N. R. Rock stiffness measurements fibre Bragg grating sensor (FBGs) and the effect of cyanoacrylate and epoxy resin as adhesive materials //Ain Shams Engineering Journal. – 2021. – Т. 12. – №. 2. – С. 1677-1691.
9. Hu Q. et al. Fracture behavior and microcracking mechanism of epoxy resin-grouted fractured granite under different loading conditions //Construction and Building Materials. – 2024. – Т. 449. – С. 138545.
10. Блинов П.А., Садыков М. И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. - № 1. – с. 97-105.
11. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – Москва: Стандартинформ, 2020 – 28с.
12. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. - Москва: Стандартинформ, 2020 – 38с.

© Т. В. Шилова, А. Н. Дробчик, 2025