

*Т. В. Шилова\*, А. Н. Дробчик*

## **Исследование влияния полиуретановых составов на деформационно-прочностные свойства песков в условиях трехосного сжатия**

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: shilovatanya@yandex.ru

**Аннотация.** В работе приведены результаты экспериментальных исследований двухрастворной пропитки мелкозернистого песка высокоэластичной низковязкой полиуретановой смолой и быстродействующим полиуретановым составом, предназначенным для повышения прочности породы. Получено, что в условиях трехосного сжатия песок, пропитанный полиуретановыми смолами с суммарной объемной долей более 30 об. %, выдерживает незначительные нагрузки, образцы разрушаются неполностью и восстанавливаются до первоначального размера после снятия вертикальной нагрузки. Установлено, что использование двухрастворной пропитки полиуретановыми смолами песка приводит к повышению прочности породы в условиях трехосного сжатия при суммарном объеме составов менее 30 об. %. Добавка 5 об. % быстродействующей полиуретановой смолы повышает прочность песка, укрепленного высокоэластичной смолой, примерно в 1,5 раза. В то же время порода, пропитанная только высокоэластичным составом, выдерживает более значительные вертикальные деформации.

**Ключевые слова:** полиуретановые составы, деформационно-прочностные свойства, песок, трехосное сжатие

*T. V. Shilova\*, A. N. Drobchik*

## **Study of influence of polyurethane compositions on deformation-strength properties of sand under triaxial compression**

Chinakal 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 two-solution impregnation of fine sand with a highly elastic, low-viscosity polyurethane resin and a fast-acting polyurethane composition designed to increase the rock strength. It was obtained that sand impregnated with polyurethane resins with a total volume more than 30 vol. %, withstands minor loads under triaxial compression conditions. The samples are not completely destroyed and are restored to their original size after removing the vertical load. It has been established that the use of two-solution impregnation of sand with polyurethane resins with a total volume of the compositions of less than 30 vol. % leads to an increase in the rock strength under conditions of triaxial compression. Additive 5 vol. % fast-acting polyurethane resin increases the strength of sand reinforced with highly elastic resin by approximately 1.5 times. At the same time, rock impregnated only with a highly elastic composition can withstand more significant vertical deformations.

**Keywords:** polyurethane compositions, deformation-strength properties, sand, triaxial compression

## *Введение*

Физико-химические методы, такие как инъекционное укрепление, пропитка и тампонируание полимерными составами, смешивание с вяжущими материалами и др., широко используются для армирования рыхлых пород и предотвращения фильтрации флюидов в грунтовом массиве [1-4]. Преимущества и недостатки основных типов полимерных композиций рассмотрены в работах [5-8]. Лабораторные исследования свойств укрепленной породы позволяют прогнозировать эффективность работ с учетом различных факторов, рекомендовать для практического использования тот или иной способ стабилизации грунтов [9-12]. Изменение проницаемости песчаной породы при неполном насыщении высокоэластичной полиуретановой смолой изучено в работе [13]. Установлено, что при объемной доле смолы 20-40 об. %, коэффициенты проницаемости пропитанного песка соответствуют значениям практически непроницаемых пород. В то же время при избытке высокоэластичного полиуретанового состава укрепленная порода стабильна лишь при небольших нагрузках. В работе предложен способ, включающий дополнительную пропитку песка малым объемом быстродействующего полиуретанового состава для повышения прочности, приведены результаты лабораторных исследований деформационно-прочностных свойств в условиях трехосного сжатия.

## *Материалы и методы*

В экспериментах использовали двухкомпонентную, медленно-реагирующую высокоэластичную полиуретановую смолу (далее смола 1) и однокомпонентную быстродействующую полиуретановую смолу (далее смола 2). Смола 1 предназначена для консолидации и гидроизоляции грунтов, создания противофильтрационных завес и пр., образуется при смешивании до однородной консистенции двух компонентов А и Б в объемном отношении 1:1. Низкая вязкость смолы 1, сохраняющаяся на протяжении длительного времени способствует увеличению зоны пропитки рыхлых пород, снижению фильтрационных свойств и пр. В отвержденном виде смола 1 представляет собой непроницаемый, эластичный материал, стабильный при небольших деформациях. Смола 2 предназначена для укрепления рыхлых, неустойчивых пород, заполнения трещин в каменных конструкциях и др., в экспериментах использовалась для повышения прочности породы. Реакция полимеризации происходит при смешивании полиуретанового состава с водой до однородной консистенции. В экспериментах использовали соотношение объемов смолы и воды - 5:1. Время отверждения составляет около 90 секунд при температуре 25°C. Лабораторные исследования проводили с образцами мелкозернистого песка с размером основной фракции (более 90 мас. %) - 0,2 – 0,25 мм. Плотность частиц и скелета сухого грунта в среднем равны 2,64 г/см<sup>3</sup> и 1,6 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

В экспериментах использовали однорастворный и двухрастворный способы пропитки песка составами. В способе однорастворной пропитки приготовлен-

ную смесь компонентов А и Б смолы 1 добавляли в песок и перемешивали до образования однородной массы. В случае двухрастворной пропитки песок последовательно смешивали с готовыми смолами 1 и 2. Образцы формировали при удельных расходах смолы 1 на единицу объема рыхлой породы 5, 10, 20, 40 об. %. Объемный расход смолы 2 составлял 5, 10 об.%. (см. табл. 1) Полученные смеси реагентов с песком размещали слоями, уплотняя на каждом этапе, в стальных цилиндрических формах диаметром и высотой: 50 мм и 120 мм и оставляли до полного отверждения составов. Затем образцы извлекали из форм и обрезали их на станке до высоты 100 мм.

*Таблица 1*

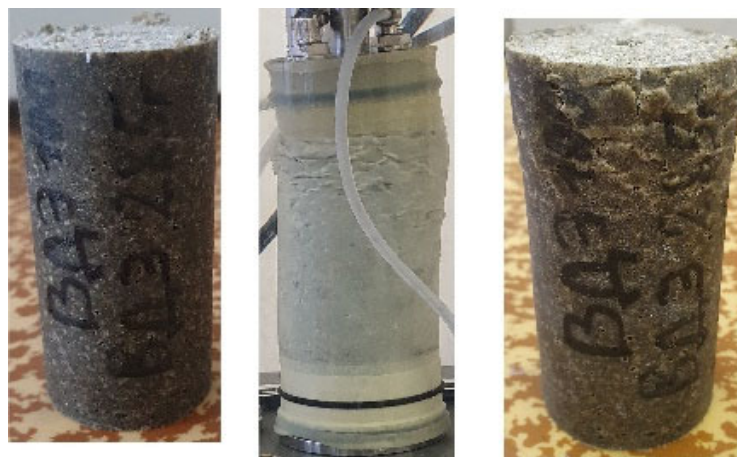
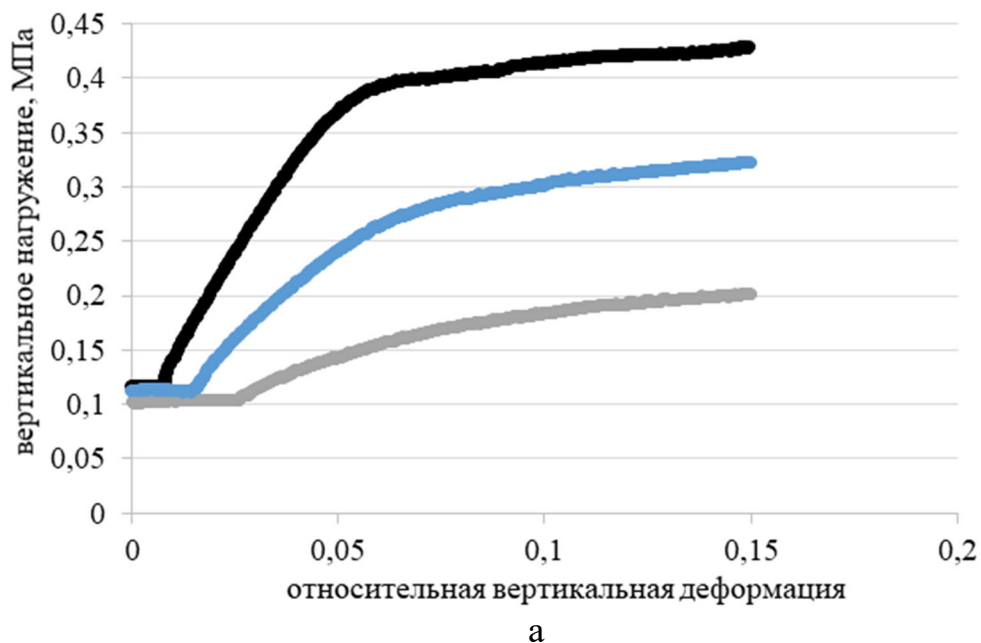
Расход полиуретановых смол для пропитки мелкозернистого песка

Тип образцов	Расход смолы 1, об. %	Расход смолы 2, об. %
1	40	0
2	20	0
3	40	10
4	40	5
5	20	10
6	20	5

Сформированные цилиндрические образцы пропитанного песка диаметром 50 мм и длиной 100 мм использовались для проведения деформационно-прочностных тестов. Испытания проводились методом осесимметричного трехосного сжатия на приборе ГТ 1.3.5. Эксперименты проводили при боковом давлении 100кПа, с шагом вертикального штока 0,5 мм и с ограничением вертикальной нагрузки 5000 кПа. По результатам тестов определяли значения вертикального нагружения и характер деформирования образцов до значения относительной вертикальной деформации образца - 15%.

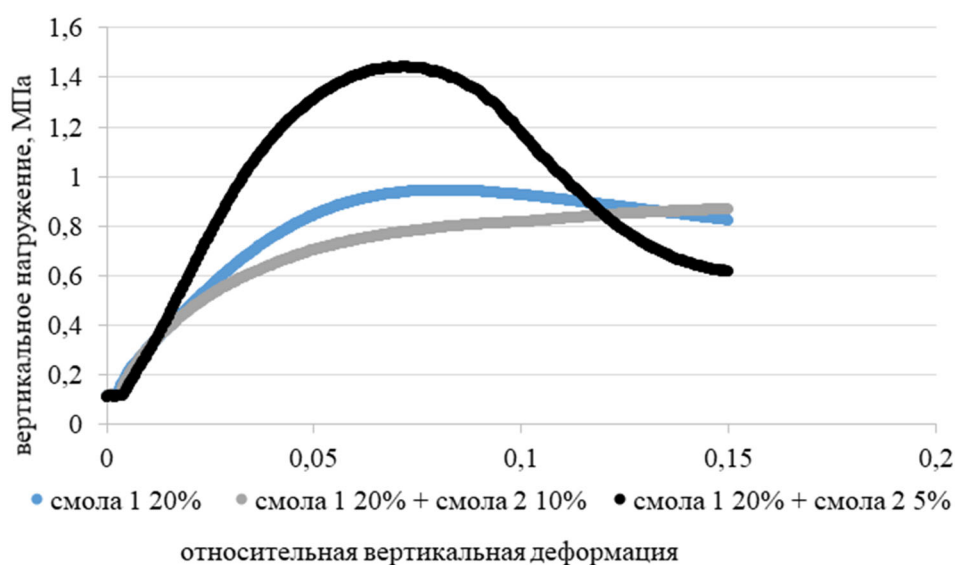
### ***Результаты***

Экспериментальные исследования показали, что образцы пропитанного песка, сформированные с объемным расходом высокоэластичной полиуретановой смолы 1 40 об. %, достигают относительную деформацию 15% при значениях вертикальной нагрузки 0,2 – 0,45 МПа. Образцы полностью не разрушаются и после снятия вертикальной нагрузки восстанавливаются до начальной высоты (рис. 1). В случае объемного расхода 20 об. % смолы 1 укрепленный песок разрушается при величине вертикальной нагрузки около 1 МПа. В случае добавки быстродействующей полиуретановой смолы 2 10 об. %, образцы достигают относительную деформацию 15%, полностью не разрушаясь, а при двукратном уменьшении объема смолы 2 до 5 об. % - разрушаются, когда вертикальная нагрузка достигает значений 1,4 – 1,5 МПа. Относительная вертикальная деформация образцов составляет 6 – 8 % (рис. 2).



б

Рис. 1. а. Диаграммы «вертикальное нагружение – деформация» образцов пропитанного песка с объемной долей высокоэластичной полиуретановой смолы 1 - 40 об. % и быстродействующей смолы 2 - 5 об. %, 10 об. %, полученные при испытаниях на трехосное сжатие. Содержание смолы 1 и смолы 2: черный цвет - 40 об. %; голубой цвет - 40 об. % и 5 об. %; серый цвет - 40 об. % и 10 об. %. б. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановой высокоэластичной смолой 1 с объемным расходом 40 об. %: слева – до, по центру – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие



а



б

в

Рис. 2. а. Диаграммы «вертикальное нагружение – деформация» образцов пропитанного песка с объемной долей высокоэластичной полиуретановой смолы 1 - 20 об. % и быстродействующей смолы 2 - 5 об. %, 10 об. %, полученные при испытаниях на трехосное сжатие. Содержание смолы 1 и смолы 2: черный цвет - 20 об. % и 5 об. %; голубой цвет - 20 об. % и 10 об. %; серый цвет - 20 об. %. б. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановой смолой 1 с объемным расходом 20 об. %: слева – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие. в. Образец мелкозернистого песка, пропитанного полиуретановыми смолами 1 и 2 с объемными долями 20 об. % и 5 об. %: слева – в процессе, справа - после эксперимента на трехосное сжатие.

## **Обсуждение**

В условиях трехосного сжатия песок, пропитанный полиуретановыми смолами с суммарной объемной долей более 30 об. %, выдерживает незначительные нагрузки, образцы разрушаются неполностью и восстанавливаются до первоначальной высоты после снятия вертикальной нагрузки. Добавка 10 об. % быстродействующей полиуретановой смолы 2 увеличивает прочность пропитанной породы. Образцы песка, укрепленного высокоэластичной полиуретановой смолой с объемной долей 20 об. %, разрушаются при вертикальной нагрузке около 1 МПа. Использование двухрастворного способа пропитки с добавкой 5 об. % смолы 2 увеличивает прочность породы примерно в 1,5 раза. В то же время установлено, что песок, пропитанный только высокоэластичной смолой 1 выдерживают более значительные вертикальные деформации.

## **Заключение**

По результатам экспериментальных исследований установлено, что использование двухрастворной пропитки полиуретановыми смолами мелкозернистого песка приводит к повышению прочности в условиях трехосного сжатия при суммарном объеме составов менее 30 об. %. Добавка 5 об. % быстродействующей полиуретановой смолы повышает прочность песка, укрепленного высокоэластичной смолой, примерно в 1,5 раза.

## **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках госзадания (проект № 0256-2021-0001, шифр темы FWNZ-2021-0001). В работе использовано оборудование ЦКП ГГГИ СО РАН.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Jinpeng Z., Limin L., Yang L. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 131. – С. 104826.
2. Chen Z., Zhu S. S. In-situ polymerization of dicyclopentadiene for rock reinforcement //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Т. 173. – С. 912-921.
3. Климчук, И.В., Маланченко В.М. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России // Горная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 22–25.
4. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. – 1986.
5. Hu X., Cheng W., Wang D. Properties and applications of novel composite foam for blocking air leakage in coal mine //Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Т. 87. – №. 8. – С. 1099-1108.
6. Ortiz R. C. Mechanical behavior of grouted sands. – 2015.
7. Sabri M. M., Shashkin K. G. The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature //Magazine of Civil Engineering. – 2020. – №. 6 (98). – С. 9811.
8. Bohloli B. et al. Cements for tunnel grouting—Rheology and flow properties tested at different temperatures //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – Т. 91. – С. 103011.
9. Nowamooz H. Resin injection in clays with high plasticity //Comptes Rendus Mécanique. – 2016. – Т. 344. – №. 11-12. – С. 797-806.

10. Yang J. et al. Pre-grouting reinforcement of underwater karst area for shield tunneling passing through Xiangjiang River in Changsha, China //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – Т. 100. – С. 103380.

11. Liu J. et al. Study on engineering properties of sand strengthened by mixed fibers and polyurethane organic polymer //Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2020. – Т. 79. – С. 3049-3062.

12. Anagnostopoulos C. A. et al. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand //Tunnelling and underground space technology. – 2011. – Т. 26. – №. 6. – С. 718-724.

13. Шилова Т. В., Сердюк И.М., Сердюков С.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. - № 1. – С. 26 – 32.

© Т. В. Шилова, А. Н. Дробчик, 2024