

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-5-59-63

УДК 622.023.23

## ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД КУЗБАССА

### EFFECT OF MULTIPLE FREEZING AND THAWING ON THE STRENGTH PROPERTIES OF COAL-BEARING ROCKS OF KUZBASS

**Шаламанов Виктор Александрович,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: shalamanov49@mail.ru

**Victor A. Shalamanov, Dr. Sc. in Engineering,**

**Паначев Иван Андреевич,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: pia@kuzstu.ru

**Ivan A. Panachev, Dr. Sc. in Engineering, Professor**

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya street, Kemerovo,  
650000, Russian Federation

#### **Аннотация:**

В 2018 году в Кузбассе при добыче угля открытым способом было разрушено и отправлено в отвалы около 1,0 млрд т углевмещающих горных пород, более 50 % которых по своим физическим характеристикам отвечают требованиям, предъявляемым к дорожно-строительным материалам. Но для использования их при строительстве временных технологических дорог и дорог общего пользования необходима информация об изменении физических свойств в результате воздействия многократного замораживания и оттаивания. Такая информация необходима и при добыче угля, так как в условиях нашего региона огромное влияние на устойчивость бортов и уступов разрезов оказывают природные факторы в связи с тем, что породы в их контурной зоне в осенне-весенние периоды ночью замерзают, а днем частично или полностью оттаивают, и это происходит в большинстве случаев при полном насыщении их водой. В работе приведены результаты лабораторных исследований изменения скоростей распространения продольных ультразвуковых волн в образцах песчаников и алевролитов (наиболее распространенных углевмещающих горных пород полей разрезов Кузбасса) и влияния насыщения водой и многократного замораживания и оттаивания в воде и на воздухе на их прочностные свойства. В результате обработки экспериментальных данных были установлены соотношения прочностных показателей и скоростей распространения ультразвуковых упругих продольных волн. Сделаны выводы о возможности использования ультразвукового метода для контроля состояния бортов и уступов разрезов и изменения их прочностных свойств при насыщении водой и последующем замораживании и оттаивании. Данный вопрос мало изучен и требует проведения дальнейших исследований в каждом геолого-экономическом районе Кузбасса.

**Ключевые слова:** ультразвуковая волна, скорость, прочность, замораживание, оттаивание, насыщение водой.

#### **Abstract:**

In 2018, in the process of coal mining by the open method in Kuzbass, about 1.0 billion tons of coal-bearing rocks were destroyed and sent to dumps, more than 50% of which, by their physical characteristics, meet the requirements for road construction materials. But for their use in the construction of temporary technological roads and public roads, information is needed on changes in physical properties as a result of exposure to repeated freezing and thawing. Such information is also necessary in coal mining, because in our region, natural factors have a great influence on the stability of the benches and ledges of the open-pit mines, the rocks in their contour zone during the autumn and spring periods freeze at night, in daytime they partially or completely thaw, in most cases, with full water saturation. The paper presents the results of laboratory studies of changes in the propagation speeds of longitudinal ultrasonic waves in sandstone and aleurolite samples, the most common coal-bearing rocks

*of Kuzbass section fields, and the effects of water saturation and repeated freezing and thawing in water and in air on their strength properties. As a result of processing the experimental data, ratios of the strength parameters and propagation speeds of ultrasonic elastic longitudinal waves were established. Conclusions about the possibility of using the ultrasonic method to control the condition of benches and ledges of the open-pit mines and change their strength properties with water saturation and subsequent freezing and thawing are made. This question is studied insufficiently and requires further research in each geological-economic areas of Kuzbass.*

**Keywords:** *ultrasonic wave, speed, strength, freezing, thawing, water saturation.*

В 2018 году в Кузбассе добыли более 170 млн т угля открытым способом, при этом было разрушено и отправлено в отвалы около 1,0 млрд т углевмещающих горных пород, более 50 % которых по своим физическим характеристикам отвечают требованиям, предъявляемым к дорожно-строительным материалам. Но для использования их при строительстве временных технологических дорог и дорог общего пользования необходима информация о изменении физических свойств в результате воздействия многократного замораживания и оттаивания. Такая информация необходима и при добыче угля, так как в условиях нашего региона огромное влияние на устойчивость бортов и уступов разрезов оказывают природные факторы в связи с тем, что породы в их контурной зоне в осенне-весенние периоды ночью замерзают, а днем частично или полностью оттаивают, и это происходит в большинстве случаев при полном насыщении их водой. Существенное изменение влажности горных пород уступов и бортов разрезов наблюдается при таянии снегов, выпадении атмосферных осадков в весенний, летний и осенний периоды года. Объективной информации о влиянии влаги на физические свойства горных пород нет, следовательно, получение и систематизация такой информации приобретают особую актуальность. Проведенные лабораторные исследования водно-физических свойств показали, что водопоглощение пород вскрыши изменяется от 1,4 до 12%. Слабые тонкослоистые породы, имеющие большое количество трещин, в большинстве случаев полностью размокают в течение 4...11 часов нахождения в воде, а разделение их на отдельные обломки начинается в местах присутствия углистых веществ и глинистых прослоек, трещин и отдельных слоев. В породах с пределом прочности при сжатии более 70 МПа не замечено признаков размокания даже при пребывании их в воде более 30 дней. Однако предел прочности при сжатии у песчаников и алевролитов в зависимости от вещественного состава и типа цемента снизился на 15...35 и 25...55% соответственно. Все подвергшиеся испытаниям породы после пребывания в воде набухают, но величина набухания составляет не более 1%. Влияние водонасыщения и многократного замораживания и оттаивания углевмещающих горных пород Кузбасса изучено слабо. Специалисты-проектировщики и технологи не располагают подобной информацией и не могут обосновать оптимальные углы наклона бортов и рабочих уступов, осуществлять текущий

контроль прочностных свойств, следовательно, обеспечить безопасную добычу угля открытым способом. Убедительное свидетельство этому – техногенные катастрофы на юге Кузбасса, которые привели к оползням, нарушившим опоры ЛЭП, перекрытию русла рек и повреждению техники.

Достаточно много внимания изучению механических свойств углевмещающих горных пород уделяют зарубежные исследователи [1-13], но исследований, посвященных изучению того, как изменяются механические свойства углевмещающих горных пород при насыщении их водой и последующем попеременном замораживании и оттаивании в воде и на воздухе, не проводилось.

В лаборатории физики горных пород университета были исследованы прочностные свойства наиболее характерных песчаников и алевролитов, встречающихся при добыче угля открытым способом, которые позволили зафиксировать, что естественная влажность на момент распарафинирования изменяется от 1 до 5%, в песчаниках она не превышает 3%, а в алевролитах – 5%. Было установлено, что она снижается с возрастанием глубины изъятия кернов и на глубине более 50 м она не превышает 3%.

Из проб, доставленных в лабораторию, на камнерезном станке изготавливались цилиндры и частично диски цилиндрической формы, как того требуют действующие стандарты, при невозможности изготовления образцов цилиндрической формы испытания проводили на образцах полуправильной и неправильной формы. Подготовленные к исследованиям породы были разбиты на 6 групп. Породы первой группы испытывали в естественном состоянии. Остальные подвергались испытаниям после замораживания и оттаивания в естественном состоянии или после насыщения водой. Насыщенные водой образцы вначале замораживали в течение 20 часов при температуре минус 20°C, затем давали им оттаять в течение 24 часов, при этом одна часть оттаивала в воде, а другая – на воздухе при температуре 20...22°C. Насыщение водой прекращали после стабилизации скорости распространения ультразвуковых упругих продольных волн.

Песчаники, испытанные на морозостойкость, в подавляющем большинстве являлись среднезернистыми массивной текстуры. Четверть образцов песчаников содержала включения углистых веществ в виде тонких прослоек мощностью до 1

Таблица 1. Значения соотношения свойств

Table 1. The value of the ratio properties

Состояние породы											
Исходное				После насыщения водой							
На момент распада-фини-рования		После 50 циклов замораживания и оттаива-ния на воздухе		На момент оконча-ния водона-сыщения		Заморо-женное после водонасыще-ния		после 50 циклов заморажива-ния и оттаивания			
$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		на воздухе		в воде	
$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$ $k_v$		$k_{\sigma}$	$k_v$	$k_{\sigma}$	$k_v$
1	1	0,99	0,99	0,52	1,09	1,70	1,16	0,53	1,03	0,54	1,05

мм, прерывистых нитей, штрихов и точечных скоплений. Преобладающий угол залегания слоев из углистых материалов – 30°. Все испытанные образцы сложены на глинисто-известковом цементе, причем содержание глинисто-известкового материала довольно различное: в светлых песчаниках преобладает известковый цемент, в серых — глинистый. Значительными колебаниями содержания глинистого и известкового цемента в большей мере объясняются довольно существенные различия прочностных и водно-физических свойств испытанных песчаников (при сравнительно небольших отличиях размеров зерен и обломков).

Алевриты темно-серые, средне- и крупно-зернистые, сильнотрещиноватые. Подавляющее большинство трещин открытые, поверхности их покрыты окислами железа. Из-за большой трещиноватости невозможно было изготовить из них образцы правильной формы и испытать их на морозостойкость. Прочность этих пород определена на образцах полуправильной и неправильной формы.

Плотностные параметры исследованных песчаников и алевритов существенно не отличались. Примерно 60-65% этих пород обладают плотностью 2630...2690 кг/м<sup>3</sup>, а остальные – 2420...2540 кг/м<sup>3</sup>.

Насыщение водой снизило прочностные свойства пород в 1,2...3 раза, замораживание их привело к увеличению прочности и скорости распространения продольных ультразвуковых волн, а при оттаивании у этих пород практически не изменились прочность и скорость распространения продольных ультразвуковых волн.

Сильно трещиноватые породы, в особенности сложенные на глинистом цементе, в большинстве случаев полностью разрушаются на мелкие кусочки в процессе насыщения водой. У песчаников с преобладанием кремнистого цемента насыщение водой незначительно снизило прочностные характеристики.

Наиболее существенный рост прочностных (в 1,2...2,5 раза) и акустических свойств (в 1,05...1,2 раза) наблюдался у углевмещающих горных пород насыщенных водой и затем замороженных, особенно сложенных на глинистом и известково-глинистом цементах.

При многократном замораживании и оттаивании в воде водонасыщенных пород у

подавляющего большинства отмечался рост прочности (по сравнению с прочностью водонасыщенных пород) на 4...10%. Довольно заметно снизилась прочность (на 3...15%) слабых пород, сложенных в основном на глинистом и глинисто-известковом цементе. У этих пород под воздействием воды в процессе оттаивания происходит дальнейшее расслабление связей и их механическое разрушение. Анализ результатов проведенных экспериментов позволил установить соотношение основных прочностных свойств песчаников и алевритов: отношение предела прочности при одноосном сжатии после водонасыщения / замораживания и оттаивания к пределу прочности при одноосном сжатии

в исходном состоянии –  $k_{\sigma}$ ; отношение скорости распространения ультразвуковых продольных волн после водонасыщения/замораживания и оттаивания к скорости распространения ультразвуковых продольных волн в исходном состоянии –  $k_v$ . Эти породы широко представлены в пределах полей угольных разрезов (табл. 1).

В исследуемых образцах горных пород на момент их распадафини-рования скорости упругих продольных ультразвуковых волн изменялись от 2800 до 3600 м/с, а замораживание образцов практически не изменило их, они выросли на 2...3%. В результате насыщения водой скорости распространения ультразвуковых упругих продольных волн выросли незначительно, на 8...10%. Насыщение водой и последующее замораживание породных образцов дало значительное увеличение скорости распространения продольных ультразвуковых волн, до 3100...4200 м/с, так как вода, заполнившая открытые поры, перешла в твердую фазу. В то же время предел прочности при одноосном сжатии после оттаивания пород снизился более чем на 50%.

Установленные соотношения изменения скоростей распространения ультразвуковых продольных волн в образцах горных пород с учетом их состояния можно использовать для предварительной оценки их прочностных характеристик без проведения специальных лабораторных исследований.

Проведенный анализ результатов лабораторных экспериментов доказал, что процессы насыщения водой углевмещающих горных пород и

изменения их прочностных свойств при попеременном замораживании и оттаивании в воде и на воздухе можно контролировать, измеряя скорость ультразвуковых продольных упругих волн, что свидетельствует о целесообразности применения ультразвука для оценки физических свойств углевмещающих горных пород в процессе добычи угля открытым способом. Это позволит принимать

верные инженерные решения при выборе углов наклона бортов и уступов, вести расчет паспортов ведения буровзрывных работ, выбирать технику для экскавации горной массы и решать вопросы использования углевмещающих горных пород в качестве дорожно-строительных материалов при строительстве временных технологических дорог.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Czermak V., Huckenholz H.G., Rybach L., et al. Physical properties of rocks. 1982. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9783540103332>.
2. Monicard R.P. Properties of reservoir rocks: core analysis. 1982. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9789401750189>.
3. Bucher, Kurt, Grapes, Rodney. Petrogenesis of metamorphic rocks. 2011. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9783540741688>.
4. Farmer I.W. (Ed.). Engineering behaviour of rocks, 1983. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9789400959804>.
5. LianYing Zhang, XianBiao Mao, AiHong Lu. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature // Science in China Series E: Technological Sciences. March 2009, Volume 52, Issue 3, pp 641-646.
6. A. Kılıc, A. Teymen. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. May, 2008, 67:237.
7. P. Hartlieb, M. Toifl, F. Kuchar et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution // Minerals Engineering. Volume 91, May 2016, Pages 34-41.
8. Chandong Abbas Khaksar. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. Volume 51, Issues 3–4, 16 May 2006, Pages 223-237.
9. Mario Parise. Applying rock mass classifications to carbonate rocks for engineering purposes with a new approach using the rock engineering system // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Available online 19 January 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S16747755163009>
10. Antonio P. Rinaldi, Frederic Cappa et al. Fault activation and induced seismicity in geological carbon storage – Lessons learned from recent modeling studies // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 8, Issue 6, December 2016, Pages 789-804.
11. Zong-Xian Zhang. Failure of hanging roofs in sublevel caving by shock collision and stress superposition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 8, Issue 6, December 2016, Pages 886-895.
12. Yixin Zhao, Hongwei Wang et al. A review of mechanism and prevention technologies of coal bumps in China // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Available online 24 October 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516301925>.
13. L. Dormieux, E. Lemarchand, D. Kondo et al. Strength criterion of porous media: Application of homogenization techniques // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. January 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516300646>.

## REFERENCES

1. Czermak V., Huckenholz H.G., Rybach L., et al. Physical properties of rocks. 1982. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9783540103332>.
2. Monicard R.P. Properties of reservoir rocks: core analysis. 1982. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9789401750189>.
3. Bucher, Kurt, Grapes, Rodney. Petrogenesis of metamorphic rocks. 2011. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9783540741688>.
4. Farmer I.W. (Ed.). Engineering behaviour of rocks, 1983. – URL: <http://www.springer.com/gp/book/9789400959804>.
5. LianYing Zhang, XianBiao Mao, AiHong Lu. Experimental study on the mechanical properties of rocks

at high temperature // *Science in China Series E: Technological Sciences*. March 2009, Volume 52, Issue 3, pp 641-646.

6. A. Kılıç, A. Teymen. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. May, 2008, 67:237.

7. P. Hartlieb, M. Toifl, F. Kuchar et al. Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution // *Minerals Engineering*. Volume 91, May 2016, Pages 34-41.

8. Chandong Abbas Khaksar. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Volume 51, Issues 3–4, 16 May 2006, Pages 223-237.

9. Mario Parise. Applying rock mass classifications to carbonate rocks for engineering purposes with a new approach using the rock engineering system // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Available online 19 January 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S16747755163009>

10. Antonio P. Rinaldi, Frederic Cappa et al. Fault activation and induced seismicity in geological carbon storage – Lessons learned from recent modeling studies // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 8, Issue 6, December 2016, Pages 789-804.

11. Zong-Xian Zhang. Failure of hanging roofs in sublevel caving by shock collision and stress superposition // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Volume 8, Issue 6, December 2016, Pages 886-895.

12. Yixin Zhao, Hongwei Wanget al. A review of mechanism and prevention technologies of coal bumps in China // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Available online 24 October 2016. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516301925>.

13. L. Dormieux, E. Lemarchand, D. Kondo et al. Strength criterion of porous media: Application of homogenization techniques // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. January 2017. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516300646>.

Поступило в редакцию 29.11.2019

Received 29 November 2019