

УДК 539.4:622.02

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОДЕФЕКТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

© 2021 г. А. Н. Кочанов¹, *, И. Ж. Бунин¹, О. Н. Малинникова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: kochanov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Представлены новые результаты экспериментальных исследований влияния нетеплового воздействия мощных наносекундных электромагнитных импульсов на процесс развития микродефектов в образцах горных пород. Для оценки изменений микроструктуры образцов использован метод растровой электронной микроскопии, а для угля дополнительно – компьютерной рентгеновской микротомографии. Измерена величина раскрытия микротрещин и проанализированы их структурные особенности, а также обсуждается возможный механизм образования микродефектов.

DOI: 10.31857/S0367676521090179

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение геоматериалов (минералов, горных пород и руд) является научной проблемой, имеющей как прикладную, так и фундаментальную направленность, связанную с установлением закономерностей развития трещин на разных масштабных уровнях [1–6]. Процесс разрушения твердых тел, наряду с условиями нагружения (внешних воздействий) и другими факторами, во многом обуславливается структурно-химическими свойствами материала (химический и фазовый состав, размер зерен, естественная пористость), а также наличием микродефектов на различных структурных уровнях, что определяет физические свойства материалов, в том числе прочностные, а для газонасыщенных материалов еще и их способность к газоотдаче [7]. Микротрещины, как нарушения сплошности твердых тел, между берегами которых разорваны молекулярные связи, являются важным элементом структуры (субмикроструктуры) геоматериалов и представлены в виде дефектов от атомного до субзеренного масштаба [3, 4, 7, 8]. Микротрещины могут изначально присутствовать в твердом теле или образовываться в результате внешних воздействий. Вопросам образования и развития микротрещин в материалах, в том числе горных породах, минералах и рудах, в результате механических, физи-

ко-химических, электрохимических, тепловых, электроимпульсных и других энергетических воздействий в последнее время уделяется много внимания, например, в [6, 9–14]. Для изучения свойств и механизмов образования микротрещин в горных породах применяются методы оптической, электронной и сканирующей зондовой микроскопии, рентгеновской компьютерной микротомографии, акустической эмиссии и другие экспериментальные методы [6, 7], а также аналитические методы с использованием численного моделирования [6, 15].

В рамках указанной проблематики мы впервые представляем результаты экспериментальных исследований по влиянию нетеплового [14–16] воздействия периодически следующих мощных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ [6, 14–17]) на процесс образования, структурные и морфологические особенности микротрещин в образцах горных пород (угля, песчаника и гранита).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на образцах горных пород неправильной формы со свежесколотой поверхностью и специально приготовленных полированных аншлифах размером $\sim(10-15) \times (10-15) \times 5$ мм. Электромагнитную импульсную обработку

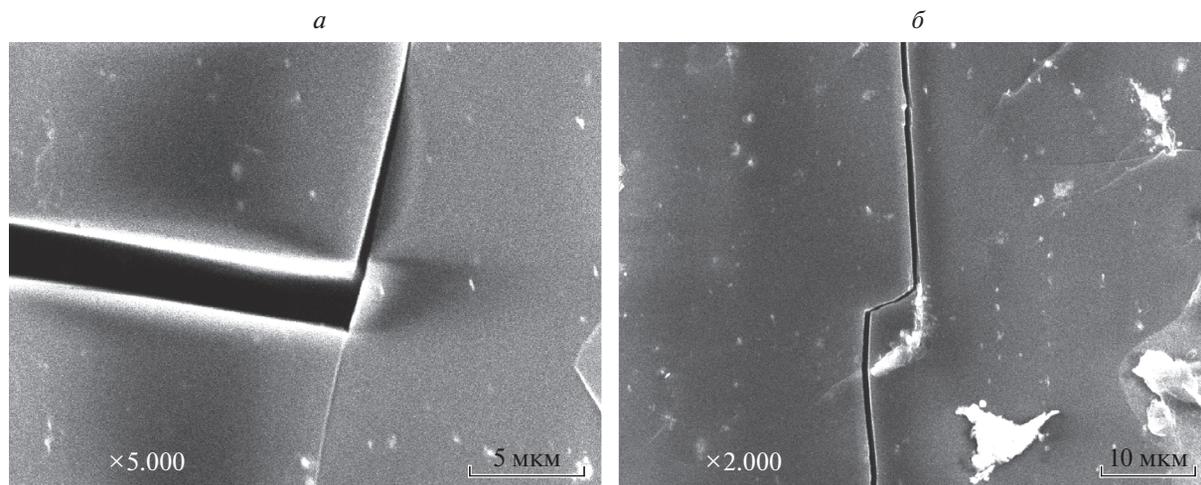


Рис. 1. Морфология микротрещин на поверхности образца угля после воздействия МЭМИ. РЭМ, масштабные линейки: 5 (а) и 10 мкм (б).

образцов проводили при стандартных условиях; продолжительность энергетического воздействия (время обработки $t_{\text{обр}}$) изменяли в диапазоне от 60 до 300 с; выходные электрофизические параметры генератора наносекундных импульсов (длительность импульса — ~ 10 нс, амплитуда импульса — ~ 30 кВ, напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке порядка $E \sim 10^7$ В \cdot м $^{-1}$; частота повторения импульсов — ~ 100 Гц) подробно приведены в [18–20].

Морфологические особенности поверхности образцов до и после воздействия МЭМИ изучали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Использовали электронный микроскоп JEOL JSM-6610 LV с низковакуумным режимом работы (LV), что позволяло исследовать образцы горных пород без предварительного напыления на их поверхность токопроводящих слоев или применения специального скотча. При обработке и анализе цифровых РЭМ-изображений поверхности образцов основное внимание уделяли развитию микротрещиноватости. Для угля проведены исследования изменений внутренней структуры образцов с использованием рентгеновской компьютерной микротомографии (РКМТ, настольный рентгеновский микротомограф высокого разрешения SkyScan 1172).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты растровой электронной микроскопии поверхности образцов горных пород свидетельствовали в целом об отсутствии микродефектов типа трещин и пор в исследуемых геоматериалах в исходном (до воздействия МЭМИ) состоянии. Исключения составляли небольшая часть образцов угля, в которых наблюдали немногочисленные мик-

ротрещины с раскрытием 0.2–0.3 мкм. По данным РЭМ в результате воздействия МЭМИ в течение $t_{\text{обр}} = 300$ с на поверхности образцов угля происходило формирование системы микротрещин, распространяющихся, как правило, по строго прямолинейным траекториям (рис. 1а). Величина раскрытия отдельных трещин составляла 0.2–0.5 мкм и ~ 2.5 мкм. На характер формирования микротрещин и их распространение оказывало влияние наличие включений в угле (рис. 1б). Структурные изменения после электроимпульсной обработки в большей степени характерны для образцов, отобранных из выбросоопасных угольных пластов, которые отличаются хрупкостью.

Методом рентгеновской компьютерной микротомографии произведено сканирование и получены изображения (срезы) внутренней структуры образца угля по трем взаимно-перпендикулярным направлениям до и после электромагнитной импульсной обработки. В отдельных образцах угля при сканировании внутреннего объема выявлена система микротрещин. В качестве примера на рис. 2 представлена система протяженных микротрещин длиной до 6.0 мм и с величиной раскрытия до 30–40 мкм в одной из проекций сканирования образца. В то же время необходимо отметить, что после электроимпульсной обработки в тех образцах угля, на поверхности которых по данным РЭМ наблюдались многочисленные новообразования в виде микротрещин, при исследованиях методом РКМТ новых микротрещин в объеме материала обнаружить не удалось. Объяснение этому экспериментальному факту может быть следующее.

Одним из возможных механизмов дезинтеграции углей при воздействии МЭМИ является скин-эффект, связанный с концентрированием

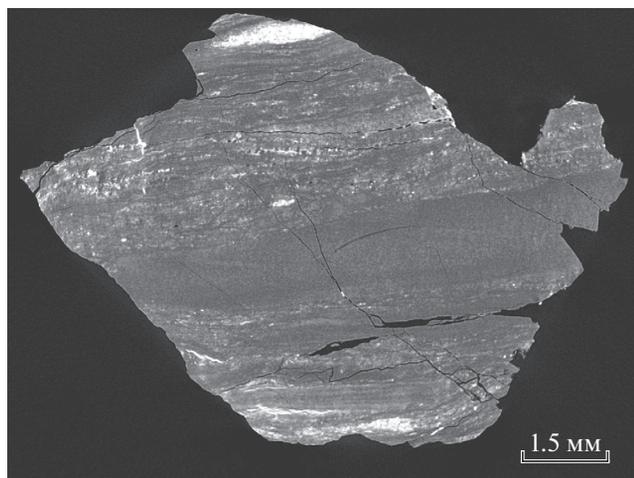


Рис. 2. Образование микротрещин в объеме образца угля при воздействии МЭМИ. РКМТ, масштабная линейка – 1.5 мм.

полного тока преимущественно вблизи поверхности проводника с повышением частоты переменного электромагнитного поля [21], в результате чего диссипация энергии поля происходит не равномерно по сечению образца, а в поверхностном слое. Следует отметить, что вопрос об электрофизических свойствах углей неоднозначен: в угольном веществе кристаллоподобная графитизированная фаза близка по своим свойствам к металлам, а аморфизированная фаза – к диэлектрикам [22].

Для образцов песчаника в результате воздействия МЭМИ наблюдалось образование и распространение микротрещин преимущественно по границам зерен (интеркристаллитное разрушение) (рис. 3), однако, анализ РЭМ-изображений свидетельствует о немногочисленности дефектов та-

кого вида. На поверхности образцов гранита вновь образованных микротрещин и других четко выраженных микроструктурных изменений не наблюдали.

Определенный научный интерес представляет сравнение результатов исследований по влиянию различных видов энергетических воздействий на процесс образования и параметры микродефектов в геоматериалах с различными структурно-химическими, электрофизическими и физико-химическими свойствами [6, 23]. При сопоставлении полученных в данной работе результатов с экспериментальными данными [12] по формированию системы микротрещин в горных породах при взрывном воздействии установлено, что минимальная величина раскрытия микротрещин в горных породах после взрывного и электромагнитного импульсного (МЭМИ) воздействий составляет $\sim 0.2\text{--}0.3$ мкм, а наиболее характерная ширина раскрытия – $2\text{--}3$ мкм. Также по данным РЭМ, большинство микротрещин, возникающих в горных породах в результате действия высокого импульсного давления, создаваемого взрывом, и влияния воздействия наносекундных импульсов высокого напряжения, имеют характер трещин нормального отрыва; сдвиговый характер формирования дефектов в целом не наблюдался.

При взрывном воздействии вновь образующиеся трещины распространялись в пределах границ зерен горных пород, т.е. характер разрушения преимущественно транскристаллитный [7, 8, 12], однако, также наблюдались микротрещины по границам раздела зерен, связанные или полностью совпадающие с границей их раздела [12]. При воздействии коротких высоковольтных импульсов для песчаника и гранита наблюдалось образование и распространение микротрещин преимущественно по границам зерен (интеркристаллитное разруше-

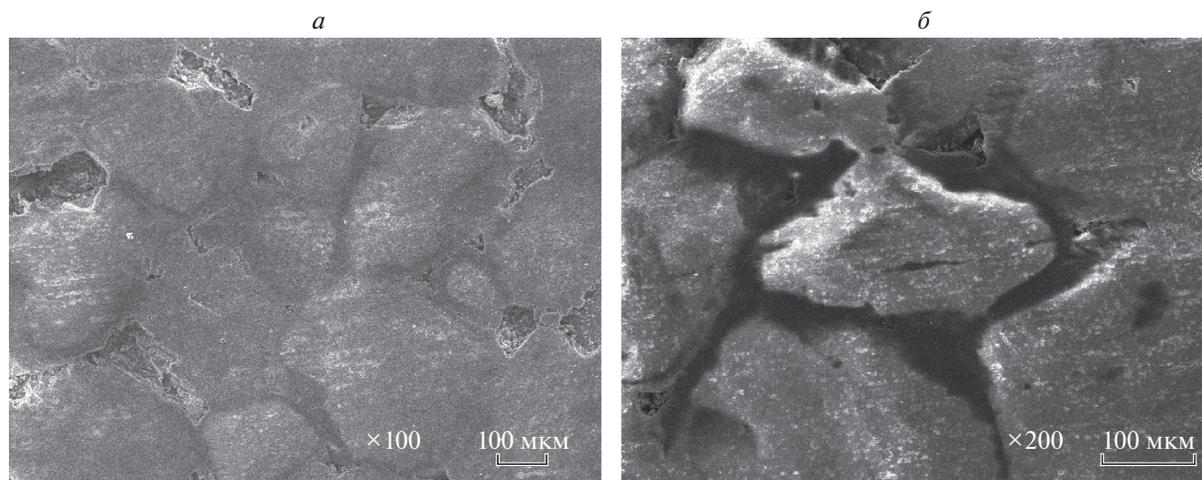


Рис. 3. Вид микродефектов в песчанике до (а) и после (б) воздействия МЭМИ. РЭМ, масштабные линейки – 100 мкм.

ние, определяющее селективную дезинтеграцию руд при воздействии МЭМИ [6, 15, 23, 24]), а для образцов угля на характер траектории распространения микротрещин существенное влияние оказывает наличие микровключений. Следует отметить, что в данной работе рассмотрен процесс образования новых (вновь образованных) микротрещин, а не развитие ранее существующих микродефектов. Структура микротрещин в угле существенно отличалась от субструктуры микродефектов в других горных породах, так что микротрещины в угле могут иметь значительную длину и распространяться до границ образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что воздействие мощных электромагнитных импульсов наносекундной длительности вызывает образование в горных породах (угле, песчанике и граните) отдельных межкристаллитных микротрещин с минимальной и максимальной величиной раскрытия 0.2 мкм и 2–3 мкм соответственно. Эффективность влияния нетеплового воздействия МЭМИ на процесс образования микротрещин в изученных горных породах в наибольшей степени проявилась для образцов угля. Для песчаника и гранита (горных пород – природных диэлектриков) эффект образования микротрещин в результате воздействия МЭМИ имеет менее выраженный характер. Морфология и субструктура микротрещин в угле, песчанике и граните существенно различалась, так что для песчаника и гранита образование и распространение микротрещин происходило преимущественно по границам зерен; для образцов угля, по всей видимости, характерен смешанный механизм разрушения. В целом большинство микротрещин, образующихся в рассмотренных горных породах в результате воздействия МЭМИ, имели характер трещин нормального отрыва. Полученные в работе экспериментальные результаты имеют актуальность и научную новизну для понимания механизмов образования микротрещин в геоматериалах и изменения структурно-чувствительных свойств горных пород при различных внешних энергетических воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 374 с.
2. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 5. С. 801.
3. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогов А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
4. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
5. Веттегрень В.И., Лазарев С.О., Петров В.А. Физические основы кинетики разрушения материалов. Л.: ФТИ, 1989. 247 с.
6. Чантурия В.А., Трубецкой К.Н., Викторов С.Д., Бунин И.Ж. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. М.: ИПКОН РАН, 2006. 216 с.
7. Кочанов А.Н. // Фунд. и прикл. вопр. горн. наук. 2019. Т. 6. № 1. С. 139.
8. Кочанов А.Н. // Горн. информ.-аналит. бюлл. (науч.-тех. журн.). 2015. № 7. С. 221.
9. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Корост Д.В., Дамаскинский К.А. // ФТТ. 2021. Т. 63. № 1. С. 103.
10. Веттегрень В.И., Пономарев А.В., Мамалимов Р.И. и др. // Физ. Земли. 2019. № 6. С. 76.
11. Costin L.S. // J. Geophys. Res. 1983. No. 88. Art. № 9485.
12. Викторов С.Д., Кочанов А.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 6. С. 820; Viktorov S.D., Kochanov A.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 6. P. 743.
13. Griffiths L., Heap M.J., Baud P., Schmittbuhl J. // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 2017. No. 11. P. 138.
14. Бунин И.Ж., Бунина Н.С., Вдовин В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 12. С. 1788; Bunin I.Zh., Bunina N.S., Vdovin V.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2001. V. 65. No. 12. P. 1959.
15. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т. // Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. № 5. С. 629; Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Kovalev A.T. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2004. V. 68. No. 5. P. 629.
16. Черепенин В.А. // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1124.
17. Чантурия В.А., Гуляев Ю.В., Лунин В.Д. и др. // ДАН. 1999. Т. 366. № 5. С. 680.
18. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Анашкина Н.Е. и др. // Физ.-тех. пробл. разраб. полезн. ископ. 2015. № 4. С. 130.
19. Бунин И.Ж., Чантурия В.А., Рязанцева М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 6. С. 738; Bunin I.Zh., Chanturiya V.A., Ryzantseva M.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 6. P. 668.
20. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 6. С. 789; Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Ryzantseva M.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 6. P. 716.
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред, 2016. 656 с.
22. Панченко Е.М. Электретное состояние в оксидах. М.: Физматлит, 2009. 248 с.
23. Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Самусев А.Л. и др. // Горн. журн. 2017. № 11. С. 77.
24. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Ковалев А.Т. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 7. С. 1057; Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Kovalev A.T. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2005. V. 69. No. 7. P. 1186.

Experimental study of the mechanism of formation of microdefects in rocks under the influence of high-voltage nanosecond pulses

A. N. Kochanov^{a,*}, I. Zh. Bunin^a, O. N. Malinnikova^a

^aInstitute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020 Russia

**e-mail: kochanov@mail.ru*

Experimental studies were conducted to study the development of microdefects in rock samples under the influence of high-power (high-voltage) nanosecond pulses. Scanning electron microscopy was used to assess changes in the microstructure of the samples, and computer X-ray microtomography was used in addition to coal. The size of the opening of microcracks is determined, their structural features are analyzed, and the possible mechanism of their formation is discussed.