

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.235

СВЯЗЬ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П. В. ЕГОРОВ, Л. А. КОЛПАКОВА, А. А. МАЛЬШИН, А. В. БАБЕНКО
Кузбасский государственный технический университет

Одним из перспективных методов изучения микроскопических явлений при разрушении пород является метод, основанный на регистрации импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ).

Его использование позволяет перейти от качественного описания процесса разрушения к определению механических и электрофизических характеристик разрушаемого материала, выявлению различных стадий разрушения, подойти вплотную к решению задачи создания оптимального алгоритма прогноза разрушения.

Образование и рост микротрещин приводят к локальным разрывам сплошности, при этом некоторая часть высвобождающейся энергии представляет собой импульсное электромагнитное излучение. Каждой конкретной ситуации нарушения сплошности соответствуют вполне определенные параметры ЭМИ. Частотные (или временные) параметры, такие как время нарастания τ_n , время релаксации τ_p , длительность сигнала и их частота появления, связаны со скоростью распространения образующейся трещины и ее размерами, а значит зависят и от структуры материала. Кроме того, в работах [1, 2] отмечалось, что каждому материалу соответствует характерный частотный диапазон импульсного ЭМИ, а в работах [3, 4] показано отличие формы сигнала для образцов различной природы и структуры и изменение ее в зависимости от стадии нагружения. Изучение отмеченных зависимостей на образцах горных пород крайне затруднено из-за их многокомпонентной гетерогенной структуры, включающей три фазы: твердую, жидкую, газообразную. Для определения грунта как объекта достаточно одной твердой составляющей. Грунт как целостный объект определяют такие элементы, как частицы (зерна), контакты между частицами (связь) и поры (пространство между твердыми частицами). Практически все горные породы относятся к зернистым структурам.

Известно, что структура материала зависит от размера и формы зерен, от их взаимного расположения и ориентации. Поэтому для определения распределения напряжений в грунтовом массиве необходимо как можно точнее знать параметры элементов структуры. Такими параметрами могут быть: размер фракций заполнителя d_3 , концентрация зерен n , размеры зерен цементирующего материала и т. д.

Для определения влияния перечисленных параметров структуры материала на параметры сигнала импульсного электромагнитного излучения при деформировании зернистых сред были изготовлены эталонные образцы с заранее заданным размером структурной неоднородности, но с разной массовой концентрацией компонента (10, 20, 40 %). Образцы изготавливались из раствора, состоящего из кварцевого песка и портландцемента марки ПЦ-400-Д20.

В качестве мелкого заполнителя использовался песок кварцевый (речной) с зернами округлой формы. Его зерновой состав определялся ситовым анализом. В результате просеивания песка через сите с отверстиями 0,25; 0,5; 1; 2; 3 мм были получены пески со следующими размерами зерен: менее 0,25 мм – мелкая фракция песка; 0,25–0,5 мм – средняя фракция песка; 0,5–1 мм; 1–2 мм – крупная фракция песка.

Эксперимент проводился на установке [4], позволяющей одновременно нагружать образцы с различными скоростями до полного разрушения и регистрировать величину нагружающего напряжения, величину деформации и фотографировать форму сигнала импульсов ЭМИ, их общее число, длительность и амплитуду.

Для каждого эталонного образца регистрировалась кинетика образования импульсов ЭМИ. Вид кинетических кривых для всех образцов оказался подобным. На рис. 1 показана характерная кинетика выделения импульсов ЭМИ при деформировании вплоть до раскола образца. Выделяются четыре стадии нагружения:

первая соответствует нагрузкам $\sigma < 0,2 \sigma_p$; вторая – $0,2\sigma_p < \sigma < 0,5 \sigma_p$; третья – $0,5\sigma_p < \sigma < 0,8 \sigma_p$ и четвертая – $0,8 \sigma_p < \sigma < \sigma_p$, где σ_p – разрушающее напряжение. Каждая стадия характеризуется индивидуальной интенсивностью протекающего разрушения. Можно предположить, что на первой стадии образуются трещины, формирование которых начинается с поверхности или в приповерхностных условиях. На второй – происходит перераспределение напряжений, в результате которого образуются трещины, размеры которых сравнимы с наименьшими размерами фракций зерен заполнителя d_3 . Третья стадия соответствует появлению больших трещин, имеющих размер кратный среднему размеру фракции зерна заполнителя nd_3 (образование очага разрушения). Четвертая стадия характеризуется способностью материала накапливать энергию перед разрушением, поэтому импульсов ЭМИ очень мало или их вообще нет (этому участку характерно «затишье»).

Из рис. 2, 3 видно, что с увеличением концентрации фракций зерен и размера фракции заполнителя соответственно, происходит увеличение выделения общего числа импульсов при деформировании.

Одним из наиболее информационных параметров является время нарастания импульса τ_n . Знание этого параметра позволяет получить информацию о скорости распространения образующейся трещины, ее размерах и свойствах разрушаемого материала.

На рис. 4 представлены зависимости распределения импульсов по времени нарастания сигнала для эталонных образцов с различными размерами фракций зерен и массовой концентрацией заполнителя 20 %. Для образцов с размерами

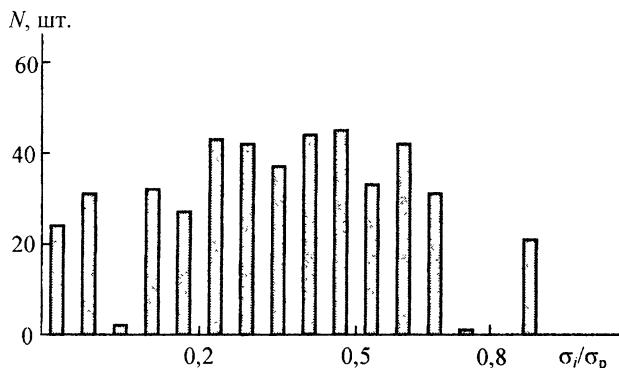


Рис. 1. Кинетика выделения импульсов ЭМИ при деформировании эталонного образца из 100 % цемента, $h = 30$ мм

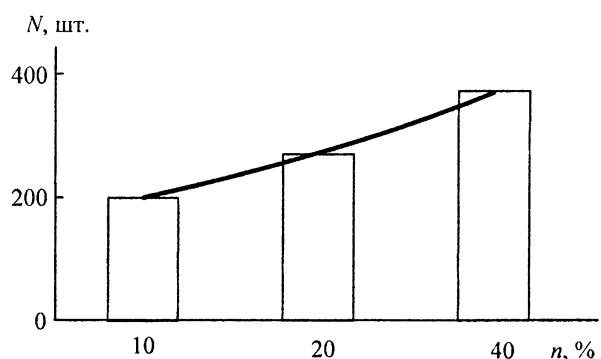


Рис. 2. Зависимость выделения общего количества импульсов при деформировании эталонных образцов с $d_3 = 0,5 \dots 1$ мм, $h = 30$ мм; $y = 145,97 \exp 0,3103 x$

фракций $d_3 < 0,25$ мм (рис. 4, а) большинство импульсов имеют время нарастания $(0,09 \dots 0,1) \cdot 10^{-4}$ с, причем количество импульсов с меньшим временем нарастания τ_h соизмеримо с числом импульсов с временем τ_h от $0,6 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-4}$ с. Образцы с размерами фракций $(0,25 \dots 0,5)$ мм (рис. 4, б) при нагружении испускают максимальное число импульсов с временем нарастания $\tau_h \sim 0,1 \cdot 10^{-4}$ с, причем как у образцов с $d_3 < 0,25$ мм так и у образцов с $d_3 = (0,25 \dots 0,5)$ мм эти максимумы очень резко выражены.

На рис. 4, в показано распределение импульсов по времени нарастания τ_h с $d_3 = (0,5 \dots 1)$ мм. В этом случае также имеется один резкий максимум, приходящийся на $\tau_h = 0,2 \cdot 10^{-4}$ с, но существенная доля импульсов (25 %) имеет $\tau_h = 0,1 \cdot 10^{-4}$ с.

У образцов с размерами фракций $d_3 = (1 \dots 2)$ мм (рис. 4, г) распределение импульсов по τ_h имеет достаточно четко выраженные три максимума с $\tau_h \sim (0,2; 0,5; 1) \cdot 10^{-4}$ с, которые у образцов с $d_3 = (0,25 \dots 0,5)$ мм и $d_3 = (0,5 \dots 1)$ мм только намечались. Необходимо отметить,

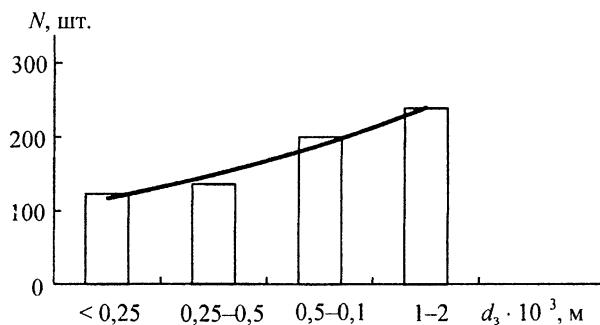


Рис. 3. Зависимость выделения общего количества импульсов при деформировании эталонных образцов с $n = 10\%$, $h = 30$ мм; $y = 91,691 \exp 0,241 x$

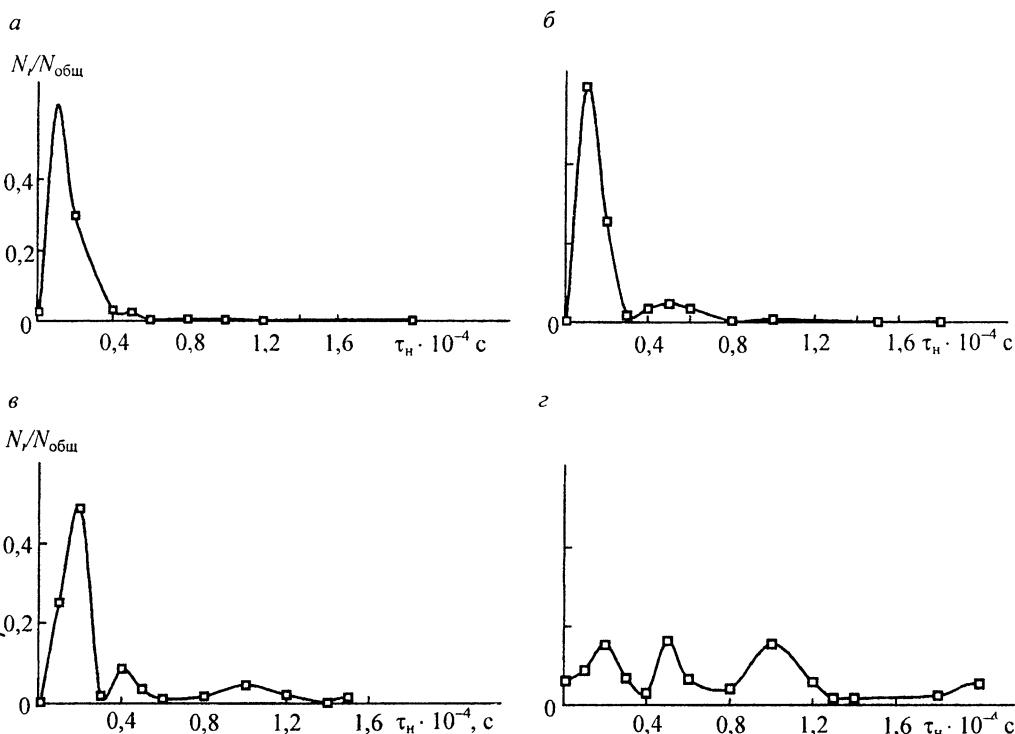


Рис. 4. Распределение числа импульсов ЭМИ по времени нарастания для $n = 20\%:$
а – $d_3 < 0,25$ мм, б – $0,25 < d_3 < 0,5$ мм; в – $0,5 < d_3 < 1$ мм, г – $1 < d_3 < 2$ мм

что у образцов $d_3 = (0,25 \dots 0,5)$ мм (рис. 4, б) присутствует небольшой «пик» для времени: $\tau_h = 0,5 \cdot 10^{-4}$ с, а у образцов с $d_3 = (0,5 \dots 1)$ мм – уже два «пика» с временем $\tau_h = 0,4 \cdot 10^{-4}$ с и $\tau_h = 1 \cdot 10^{-4}$ с (рис. 4, в). Для образцов с массовой концентрацией компонентов 10 и 40 % наблюдалась аналогичные зависимости

распределения импульсов по времени нарастания, однако с увеличением массовой концентрации заполнителя в образце более четко выражались описанные выше максимумы по времени нарастания.

На рис. 5 показано распределение времени нарастания для образца цемента, которое сильно отличается от зависимостей, полученных на эталонных образцах с различными массовыми концентрациями компонентов и размерами фракций зерен. Четко выраженный максимум для времени нарастания τ_n у цемента еще раз подтверждает

некоторое различие процесса разрушения материалов различных структур: однородных, представителем которых служит образец из одного цемента, и неоднородных – эталонные образцы.

Для получения более полной информации о кинетике процесса трещинообразования необходимо определять скорость образования и размеры микротрещин.

Как отмечалось, время нарастания τ_n импульса ЭМИ прямо пропорционально размеру образующейся трещины. Были рассчитаны экспериментальные

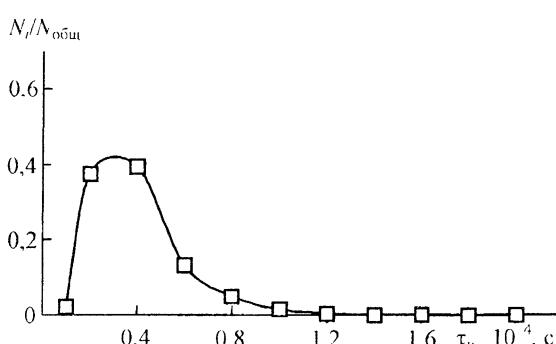


Рис. 5 Распределение числа импульсов ЭМИ по времени нарастания для образца из 100 %-ного цемента

скорости образования микротрещин и трещины раскола для всех исследуемых образцов. Затем, полученные экспериментальные значения сравнивались с теоретическими значениями предельной скорости распространения трещин, рассчитанными по формуле Берри, Робертса и Уэлса.

Таблица 1

Значения экспериментальной и расчетной скорости распространения микротрещин и трещины раскола в эталонных образцах

$n, \%$	$d_i \cdot 10^{-3}, \text{м}$	Скорость распространения трещин		
		экспериментальная		теоретическая
		$v_{\text{exp}} \cdot 10^3, \text{м/с}$	$v_{\text{th}} \cdot 10^3, \text{м/с}$	$v_{\text{th}} \cdot 10^3, \text{м/с}$
10	< 0,25 мм	0,019	1,87	1,26
	0,25 < $d_i < 0,5$	0,023	1,57	0,92
	0,5 < $d_i < 1$	0,026	1,32	1,23
	1 < $d_i < 2$	0,046	0,31	1,18
20	< 0,25 мм	0,015	1,62	1,68
	0,25 < $d_i < 0,5$	0,018	1,56	0,917
	0,5 < $d_i < 1$	0,025	0,77	1,2
	1 < $d_i < 2$	0,04	0,17	1,18
40	< 0,25 мм	0,012	1,65	1,16
	0,25 < $d_i < 0,5$	0,014	1,5	0,98
	0,5 < $d_i < 1$	0,023	0,83	1,16
	1 < $d_i < 2$	0,035	0,45	1,12
100		0,035	0,009	1,5

В табл. 1 приведены значения экспериментальных и теоретических скоростей трещинообразования для эталонных образцов. В нашей работе по времени нарастания

и размерам зерен минералов рассчитывались скорости образования микротрещин v_3 , м для каждого исследуемого образца. При сравнении полученных значений оказалось, что с увеличением размера зерна происходит увеличение скорости образования микротрещин в ходе деформирования. Это можно объяснить тем, что с увеличением размера зерна увеличивается объем связующих частиц (зерен цементирующего материала) между полусферами зерен, а с увеличением размеров концентратора напряжения d_3 подводимая энергия увеличивается и при достижении ею определенной величины происходит одновременно разрыв большего количества связей. По измеренному времени нарастания и высоте образца рассчитывались скорости распространения магистральной трещины раскола $v_{t,p}$. Оказалось, что скорость образования трещины раскола на порядок больше скорости микротрецинообразования и уменьшается с увеличением размера зерна минерала.

Как видно из табл. 1, теоретические $v_{t,p}$ и расчетные v_3,p значения совпадают в пределах одного порядка, предпочтительнее экспериментальные данные, так как модель Мотта, Берри, Робертса и Уэлса не учитывает зависимости напряжений от скорости движения трещины, исходную дефектность образца, потери тепла в процессе разрушения материала, а также модуль линейной упругости (модуль Юнга) для каждого образца.

При сравнении значений скорости микротрецинообразования v_3,m при различных размерах зерен, оказалось, что с увеличением размера зерен скорость увеличивается. Для значения скорости раскола v_3,p наблюдается обратная зависимость: она уменьшается с увеличением размера зерна. Это можно объяснить только тем, что у образцов с большим размером зерен нарушенность материала перед разрушением большая. Причем следует отметить, что значение скорости микротрецинообразования на порядок меньше скорости распространения трещины раскола.

На основании кинетического уравнения прочности твердых тел С. Н. Журкова [5] и вытекающего из него концентрационного критерия разрушения твердых тел [6] найдены средние размеры микротрещин для эталонных образцов. Все полученные расчетные значения размеров микротрещин представлены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения размеров микротрещин, формирующихся в процессе разрушения образцов

$n, \%$	$d_3 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$L_{cp} \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$d_{sp} \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$L_{cp}/d_{sp}, \text{шт}$
100	0,035	0,8	2,03	23
10	< 0,25	1,2	2,45	5
	(0,25...0,5)	1,21	2,85	4
	(0,5...1)	1,24	3,06	2
	(1...2)	1,28	3,53	1
20	< 0,25	0,9	2,43	4
	(0,25...0,5)	0,83	2,54	2
	(0,5...1)	1,17	2,73	2
	(1...2)	1,53	3,79	1
40	< 0,25	1,16	2,37	5
	(0,25...0,5)	0,97	2,43	3
	(0,5...1)	1,1	2,77	2
	(1...2)	1,8	4,09	1

При сравнении средних размеров микротрещин с размерами зерен оказалось, что эти величины всегда сравнимы между собой. Кроме того, их отношение, возможно, указывает на количество зерен, участвующих в формировании микротрешины (L/d_3).

Деформирование образцов сопровождается поглощением определенного количества механической энергии. Поэтому процесс разрушения характеризуется энергосмкостью и эффективной поверхностной энергией. А отношение эффективной поверхностной энергии к плотности энергии разрушения является величиной, характеризующей размер разрушения [7]. В работе был рассчитан критический размер разрушения d_{kp} по формуле Е. И. Шемякина [8] для каждого исследуемого образца (табл. 2) и сравнен с размерами зерен, а критический размер разрушения во всех случаях больше, чем размер зерна и средний размер трещины. Это является подтверждением справедливости формулы Е. И. Шемякина и еще раз показывает, что размер микротрещины соизмерим с размером фракции зерна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курленя М. В. Оценка длительности сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород / М. В. Курленя, А. Г. Вострецов, Г. И. Кулаков, Г. Е. Яковицкая // ФТИРПИ. 1999. № 4. С. 61–65
2. Вострецов А. Г. Прогнозирование разрушения горных пород по спектральным характеристикам сигналов электромагнитного излучения / А. Г. Вострецов, Г. И. Кулаков, Ю. А. Тимоненков, Г. Е. Яковицкая // ФТИРПИ. 1998. № 4. С. 21–25.
3. Егоров П. В. Определение кинетических констант прочности и критического размера разрушения композиционных материалов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при их разрушении / П. В. Егоров, В. В. Иванов, А. А. Мальшин и др. // Прикладная механика и техническая физика 1994 Т. 35, № 4. С. 153–159
4. Исследование разрушения твердых тел методом регистрации импульсного электромагнитного излучения / П. В. Егоров, Л. А. Колпакова, А. А. Мальшин. Кемерово. Кузбассвузздат, 2001. 204 с.
5. Журков С. Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР. 1981 Г. 259 В. 6. С. 1350–1353.
6. Петров В. А. О механизме и кинетике макроразрушения // ФТГ. 1979 Т. 21. В. 12. С. 3681–3686
7. Методика исследований электромагнитного излучения при разрушении образцов горных пород Новосибирск ИГД СО АН СССР. 1989.
8. Шемякин Е. И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН СССР 1988 Т. 300, № 5 С. 1090–1094