

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина,
 В.М. Кучеровский, канд. техн. наук, А.М. Барак, Москва, Россия,
 А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина,
 С.Г. Серебренникова, Москва, Россия.

СУЩНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Ця проблема пов'язана з деформацією матеріалів за межею їх пружності, тобто практично з руйнуванням. Любе руйнування - процес швидкодіючий, при якому в попередньо непошкодженому матеріалі руйнуються зв'язки і з'являються порожнини. Теорія руйнування Гриффітса з успіхом застосовується для опису процесу руйнування, що має місце в ідеально крихкому середовищі. Але для більшості випадків руйнування, де має місце пластична деформація, цей підхід неможливий. Пластичними деформаціями супроводжується руйнування матеріалів, а також зсувне руйнування гірських порід. У цьому випадку не виникає макроскопічних тріщин, і руйнування проходить внаслідок зародження росту та змикання великої кількості мікроскопічних порожнин. Експериментальні дані і практичний досвід свідчать, що швидкодіючі процеси, зокрема ударна дія забезпечують найбільш високі показники ефективності руйнування.

Рассматриваемая проблема связана с деформированием материалов за пределами их упругости, т.е. практически с разрушением. Любое разрушение - процесс быстротекающий, при котором в первоначально неповрежденном материале разрушаются связи и образуются пустоты. Теория разрушения Гриффитса с успехом применяется для описания процесса разрушения в том случае, когда основную роль в разрушении играет единичная трещина, что имеет место в идеально хрупкой среде. Но для большинства случаев разрушения, где имеет место пластическая деформация, этот подход неприемлем. Пластическими деформациями сопровождаются разрушения материалов, а также сдвиговые разрушения горных пород. В этом случае не возникает макроскопических трещин, и разрушение происходит вследствие зародения роста и слияния огромного количества микроскопических пор. Экспериментальные данные и практический опыт свидетельствуют, что быстротекающие процессы, в частности ударное воздействие обеспечивают самые высокие показатели эффективности разрушения.

A.I. BAZHAL, V.M. KUCHEROVSKIY, A.M. BARAK, A.A. BAZHAL, ANT.A. BAZHAL, S.G. SEREBRENNIKOVA

THE INTRINSIC ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF DESTRUCTION OF FIRM BODIES

The problem matter is defined as deformation of materials beyond its elasticity limit, another word destruction of integrity of same. Any destruction is a very fast flowing process. An initially integral material during such process looses internal ties and forms empty spaces within its body. The theory of destruction by Griffith is well applicable to a phenomena where one fracture is formed as the result of an impact, another word in an ideally fragile material. But to vast majority of materials this theory does not apply. Destruction of materials passes through period of plastic deformations, as well as inner-particle shifting deformation within the mass of material. In this case destruction of material occurs not as of large macro fractures but rather large number of microscopic fractures that form large number of micro pores. Lab tests, as well as other kinds of practical experience, confirms that short term but strong impacts, such as striking, lead to high efficiency of such material destruction.

Рассматриваемая проблема связана с деформированием материалов за пределами их упругости, т.е. практически с разрушением. Любое разрушение – процесс быстротекающий, при котором в первоначально не поврежденном материале разрушаются связи и образуются пустоты.

Пионерами количественного описания процессов разрушения были Гриффитс и Ирвин. Они рассматривали микротрещину, как свободную от напряжения поверхность. Поровое (граничное) условие роста трещины задавалось мерой величины напряжений и деформаций на вершине трещины, определяющей критическую плотность энергии. С этими условиями решалась динамическая краевая задача. Такой подход с успехом применялся для предсказания разрушения в тех случаях, когда основную роль в разрушении играет единичная трещина, что имеет место в идеально хрупкой среде. Но для большинства случаев разрушения, где имеет место пластическая деформация, эта схема неприемлема. Пластическими деформациями сопровождаются разрушение металлов, а также сдвиговые разрушения горных пород. В этом случае не возникает макроскопических трещин, и разрушение происходит вследствие зарождения, роста и слияния огромного количества микроскопических пор (пустот).

Теория Гриффитса в этом случае неприменима. В таких случаях невозможно рассматривать каждую микротрещину отдельно. Поэтому был развит новый аппарат для описания процессов разрушения, согласно которому в число определяющих внутреннее состояние среды параметров в уравнение состояния твердого тела вводятся ключевые переменные, характеризующие усредненное состояние микропустот в сплошной среде. Это позволяет при описании текущего состояния микрообъема среды кроме деформации, энтропии и температуры, ввести еще показатель концентрации микропустот и функцию распределения этой концентрации от размера микропустот. При таком подходе кинетика разрушения охватывает поведение микропустот и приводит к соответствующей зависимости от скорости образования микропустот. Рассматриваемый подход учитывает микроструктурные переменные и, тем самым, создает связующее звено между механикой разрушения и материаловедением.

В практическом плане это открывает возможности получить расчетные методы управления пористостью и жидкостной проницаемостью твердых тел в зависимости от начальной структуры и условий последующего нагружения твердых тел.

При упруго-пластическом деформировании твердых тел наблюдаются три вида микроповреждений:

- эллипсоидные пустоты,
- раскрытые трещины,
- полосы сдвига.

Если длительность нагружения выбрана достаточно малой по сравнению со временем, необходимым для зарождения, роста и слияния микропустот, трещин или полос сдвига, то повреждение замораживается на разных стадиях развития и, таким образом, можно получить сведения, характеризующие процессы разрушения. Режим объемного нагружения материала должен обеспе-

чить наличие растягивающих напряжений, т.к. количество вновь образовавшихся пустот пропорционально величине растягивающих напряжений.

Эксперименты проводят при различных амплитудах напряжений и различной длительности нагружения. После каждого эксперимента образцы распиливают и полируют с целью выявления повреждений. Размеры пустот и трещин измеряют и подсчитывают количество пустот, пор и трещин одного размера. Далее строят график, где на оси ординат откладывают число трещин и пор в единице объема, радиусы которых превышают заданное значение (после которого, например, появляется жидкостная проницаемость в образце), а по оси абсцисс откладывают радиус трещины (рис.1).

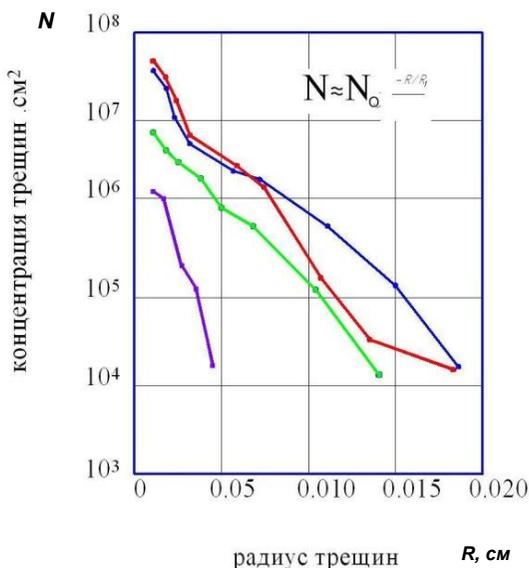


Рисунок – Кривые распределения микротрещин

N – число дефектов, приходящихся на 1 см^3 , радиусы которых больше R ; N_0 – общее число дефектов в 1 см^2 ; R – радиус трещин, см; R_0 – параметр характерного размера распределения дефектов (например, миделево сечение).

Микроповреждения зарождаются на неоднородности материалов, таких, как границы зерен, вакансии и т.п. Зарождение дефектов происходит в два этапа.

На первом этапе должен быть превзойден некоторый пороговый критерий параметра нагружения, который приводит в движение характерный для данного материала процесс дефектообразования. Таких механизмов дефектообразования исследовано много.

На втором этапе после достижения порогового критерия, начинают возникать дефекты с характерной для материала скоростью в диапазоне размеров имеющихся неоднородностей.

Собственно пороговый критерий зарождения дефекта требует выполнения сразу двух условий.

Первое условие - энергетическое. Оно состоит в том, что рассматриваемый процесс должен происходить только за счет энергии, накопленной в окрестности появляющегося дефекта: свободная энергия при этом должна убывать – требование энтропии при стремлении процесса к устойчивому состоянию. Например, в случае, когда дефект образуется в результате диффузионного роста скопления вакансий на границе зерен до критического размера (порог насыщения), возникновение дефекта возможно лишь в случае превышения локальными напряжениями поверхностного натяжения.

Второе условие – механическое. Например, если дефект возникает вследствие нарушения связи с включением, напряжение на поверхности раздела с включением должно превзойти прочность этой связи.

В поликристаллических материалах (металлах, например), процесс зарождения дефектов вблизи включений зависит от порогового условия механического типа, поскольку энергетическое условие обычно выполняется автоматически, за исключением субмикронных включений. Последнее условие означает, что для пустот больше 1 мкм, поверхностное натяжение пренебрежимо мало. Процесс зарождения дефектов (трещин) рассматривается, как следствие конкуренции между процессами диффузии, определяемыми температурой и напряжением, и процессами механического разрыва, которые можно считать мгновенными на реальной шкале времени.

Этап роста дефектов по определению есть увеличение размеров микроскопических трещин и пустот.

Когда микротрещины (пустоты) вырастают до размеров, сопоставимых со средним расстоянием между пустотами, начинается их слияние. В некоторых крайне пластичных материалах, этот процесс происходит путем непосредственного соприкосновения эллипсоидальных пустот. Однако в большинстве пластичных материалов, сначала происходит своего рода пластическая локализация между пустотами.

Механизмом слияния дефектов в случае микротрещин и полос сдвига является их столкновение. В процессе слияния дефектов, материал разделяется на изолированные куски, а распределение их по размерам тесно связано с распределением по размерам трещин, существовавшим до слияния. По мере роста микроповреждений в материале, появляется свободная от напряжения поверхность, что приводит к уменьшению напряжений, вызванных общей деформацией. Это релаксация напряжений происходит из-за двух, по существу разных процессов.

Во-первых, под действием растяжения существующие трещины и пустоты открываются, чтобы «приспособиться» к наложенным объемным деформациям. Следовательно, объемная деформация матрицы материала может упруго релаксировать (восстанавливаться) и соответствующие средние растягивающие напряжения также релаксируют.

Во-вторых, из-за уменьшения площади, несущей нагрузку поверхности, появляется поправочный множитель:

$$\Omega = \Omega_0(1 - \nu), \quad (1)$$

где, Ω_0 – тензор напряжений в материальной матрице; Ω – тензор напряжений в среде, как в сплошном континууме (осредненное напряжение, полученное делением силы на площадь поверхности, содержащей пустоты); ν – относительный объем пустот, равный, как показано в [1], поверхностной плотности пустот в пространстве, занятом равномерно распределенными и ориентированными пустотами.

Для движения и размножения дислокаций достаточны относительно малые напряжения. Это обстоятельство имеет решающее значение для той роли, которую играют дислокации в образовании трещин и пор, вызванных пластическими деформациями.

Эксперименты показывают [1], что пластическое течение в кристаллах имеет место уже при относительных деформациях порядка 10^{-4} – 10^{-3} , что соответствует волновому деформированию со скоростью частиц в волне, равной 1-10 м/с.

$$\varepsilon = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{1 \div 10}{6000} = 0,15 - 1,5 \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где ε – относительная волновая деформация; ν – скорость частиц в волне; α – скорость волны.

Каким же образом дислокации могут вызвать пластическое течение при наблюдаемых малых деформациях и, соответственно, малых напряжениях?

В атомном масштабе существует единственный способ вызвать остаточную деформацию – необходимо, чтобы атомы, участвующие в этом процессе деформации, окончательно переместились из одного места решетки в другое.

Хрупкость кристаллов объясняется тем, что процессы разрушения начинаются прежде, чем дислокации могут обеспечить достаточно большие сдвиги. Это характерно для горных пород при их нагружении нагрузками большой амплитуды, в которых, в отличие от металлов, движение дислокаций сильно затруднено дефектами.

При многоцикловом нагружении твердых тел напряжениями небольших амплитуд происходит усталость, характеризующаяся накоплением пластических деформаций и появлением на этой основе трещин и пор в нагружаемом объеме. Началом трещино-, порообразования и химической активации твердых тел считается выход дислокаций на поверхность кристалла. Время, необходимое для выхода дислокаций на поверхность кристалла равно:

$$t = \frac{d}{c}, \quad (3)$$

где d – средний поперечный размер кристалла, c – скорость движения дислокации в кристалле ($c=100$ м/с).

Если поставить целью обеспечение выхода дислокации на поверхность кристалла за одно прохождение волны, то длительность волны для такого случая можно определить из соотношения:

$$t = \frac{d}{c} < \frac{\lambda}{a} = T, \quad (4)$$

где λ – длина волны нагружения; a – скорость упругой волны; T – длительность волны нагружения.

Из приведенного соотношения следует, что длина волны нагружения должна превышать размеры кристаллов не менее, чем в пять раз.

Удельная энергоёмкость различных технологий разрушения горных пород

Из известных технологий ударный способ разрушения горных пород является одним из наиболее перспективных, как по производительности, так и по удельным энергозатратам [2, 3, 4, 5, 6].

В таблицах 1 и 2 приведены сравнения этих показателей ударного разрушения с другими технологиями разрушения.

Таблица 1 – Удельная энергоёмкость различных технологий разрушения горных пород

№ п/п	Технология разрушения горных пород	Удельная энергоёмкость разрушения, Дж/см ³
1	Разрушение ультразвуком	10104
2	Разрушение водяными струями	1684
3	Ударное разрушение маломощными механизмами	253
4	Разрушение шарошечным инструментом	126-253
5	Разрушение мощным ударом (со скоростью удара до 10 м/с)	17-25
6	Разрушение взрывом (удар со скоростью 700-900 м/с)	6

Сравнительная энергоёмкость разрушения горных пород применительно к процессам бурения и разрушению негабаритов для пород различной прочности приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная удельная энергоёмкость различных технологий разрушения в зависимости от крепости горных пород

№ п/п	Технология разрушения	Виды горных пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Удельная энергоёмкость, квт.час/т
1	Разрушение токами высокой частоты	Негабариты гранита, габбро	–	5–7
2	Разрушение волнами СВЧ	Бурение крепких железистых руд	–	60 – 80
3	Разрушение гидравлическими струями	Разрушение горных пород	14	21
4	Разрушение дисковыми шарошками	Разрушение горных пород	35 – 86	3,9 – 8,5
5	Разрушение резцово-шарошечным инструментом	Разрушение горных пород	67 –74	4,0 – 8,0
6	Разрушение резцово-отрывным инструментом	Разрушение горных пород	50	2,5 – 4,5
7	Разрушение резанием (статика)	Разрушение горных пород	180 – 200	6 – 7
8	Разрушение резанием (статика)	Разрушение горных пород	40	3 – 6
9	Разрушение резанием (статика)	Разрушение углей	–	0,6 – 0,8
10	Ударное разрушение	Разрушение горных пород	20 – 8	0,2 – 0,72

В табл.3 приведены интегральные показатели энергоёмкости различных технологий разрушения горных пород, коэффициент энергоёмкости, определяемый из отношения энергий разрушения к временному сопротивлению горных пород при одноосном сжатии.

Таблица 3 – Интегральный показатель энергоёмкости различных технологий разрушения горных пород. Коэффициент энергоёмкости

№ п/п	Технологии разрушения горных пород	Коэффициент энергоёмкости, квт.ч/МПа
1	Электрические и термические технологии разрушения	
	-лазерный луч	450
	- плазма	120
	- электронный луч	8
2	Гидравлические технологии разрушения	
	- низкоскоростная струя	85
	- непрерывная струя высокого давления	45
	- импульсная струя высокого давления	1

Механические технологии разрушения		
3	- ультразвук	1,5
	- конические шарошки	0,7
	- удар средней мощности и скорости	0,2
	-удар мощный высокоскоростной	0,07
Комбинированные технологии разрушения		
4	- гидравлическая	4,0
	- термомеханическая	0,1

Экспериментальные данные и практический опыт свидетельствуют, что быстропотекающие процессы, в частности ударное воздействие обеспечивают самые высокие показатели эффективности разрушения горных пород.

Именно в этом направлении самостоятельно или ударные (быстропотекающие) разрушения в комбинации с другими технологиями необходимо двигать при совершенствовании технологий разрушения, в частности горных пород.

Новые технологии и оборудование для ударного разрушения горных пород при бурении и дроблении с целью извлечения полезных ископаемых способны на порядок увеличить скорости бурения и дробления. При использовании этих инноваций себестоимость добычи твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых снижается в несколько раз.

Список используемой литературы: 1. Удар, взрыв, разрушение. Сборник переводов с англ. «Механика». М. Мир. 1981. с.166-203. 2. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев. Наукова думка. 1980. с.154. 3. Ржевский В.В., Бажал А.И. и др. Изменения свойств горных пород в массиве импульсно-волновыми полями при подземном выщелачивании руд. М. Цветметинформация, выпуск 2. 1985, с. 55. 4. Бегагоен И.А., Дядюра А.Г., Бажал А.И. Бурильные машины. М. Недра. 1972 с. 350. 5. Иванов К.И., Андреев В.Д. и др. Техника бурения. М. Недра. 1974. 6. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М. Наука. 1988 с.38.

Поступила в редколлегию 15.03.2011

Bibliography (transliterated): 1. Udar, vzyryv, razrusheniye. Sbornik perevodov s angl. «Mehanika». M. Mir. 1981. s.166-203. 2. Mihaljuk A.V. Gornye porody pri neravnomernyh dinamicheskikh nagruzkah. Kiev. Naukova dumka. 1980. s.154. 3. Rzhhevskij V.V., Bazhal A.I. i dr. Izmeneniya svojstv gornyh porod v massive impul'sno-volnovymi poljami pri podzemnom vyvelachivanii rud. M. Cvetmetinformacija, vypusk 2. 1985, s. 55. 4. Begagoen I.A., Djadjura A.G., Bazhal A.I. Buril'nye mashiny. M. Nedra. 1972 s. 350. 5. Ivanov K.I., Andreev V.D. i dr. Tehnika burenija. M. Nedra. 1974. 6. Zababahin E.I., Zababahin I.E. Javlenija neogranichennoj kumuljacji. M. Nauka. 1988 s.38.