

УДК 539.4.015

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ

Осипов С.Н., Смычник Е.А., Шваб Р.Г. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

Показано многообразие процессов разрушения пород и материалов в зависимости от их структуры, физико-механических свойств и воздействия внешних нагрузок. При этом существенное значение имеют величина и динамика изменения полей различных видов напряжений с учетом изменения во времени и пространстве.

Введение

При подземной разработке полезных ископаемых важнейшей проблемой является защита горных выработок от затопления из расположенных над ними водоносных пластов или расположенных на земной поверхности водоемов. Продолжающиеся случаи затопления рудников в различных регионах земного шара и, в частности, Верхнекамском месторождении калийных солей свидетельствуют о недостаточном познании процессов и закономерностей трещинообразования в породах водозащитной толщи (ВЗТ), деформируемых в результате ведения горных работ.

Проблеме трещинообразования и разрушения различных материалов, к которым относятся горные породы, за последние 100 лет посвящены тысячи опубликованных научных статей и сотни монографий, в которых предложено несколько механизмов разрушения. Однако до сих пор некоторые особенности процессов трещинообразования и разрушения многих материалов при сложных переменных режимах нагрузка – разгрузка остаются недостаточно изученными.

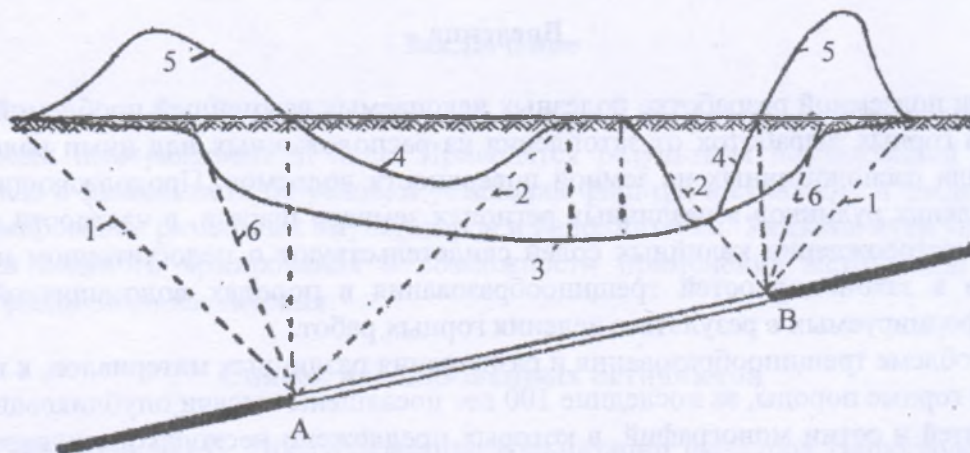
Необходимо иметь в виду, что при разработке многих месторождений полезных ископаемых пластовой формы залегания приходится отрабатывать несколько расположенных на разных глубинах пластов. При этом воздействие выработанных пространств нескольких отрабатываемых пластов может в различных сочетаниях, в том числе и последовательно, воздействовать на вышележащие породные пласты, создавая режимы многостадийного воздействия. Такое многорежимное воздействие на процессы трещинообразования еще мало изучено. Кроме того, сложная динамика изменения объемного напряженного состояния пород в зоне влияния подработки с учетом слоистости отложений с пластами пород, имеющих разные физические характеристики (от хрупких до пластичных) и разные показатели анизотропии, делает чрезвычайно сложным не только аналитическое описание процессов трещинообразования, но и объяснение физических процессов. Поэтому новые попытки научного анализа процессов трещинообразования могут представлять определенный интерес.

Анализ наблюдений и экспериментальных исследований

После разработки около 100 лет назад профессором М.М. Протодяконовым (старшим) теории свода естественного равновесия над горной выработкой ограниченной ширины (первые десятки метров) образование такого свода в различных модификациях было приурочено к выработанному пространству длинных очистных забоев (лав), особенно при управлении кровлей полным обрушением.

Одновременно развернулись работы по изучению закономерностей сдвижений и деформаций вокруг горных выработок. Основываясь на результатах наблюдений за относительно плавным деформированием земной поверхности, профессор С.Г. Авершин предложил [1] аналитическую зависимость для расчета вертикальных сдвижений земной поверхности при отработке пластов пологого залегания. Здесь [1] также приведены схемы сдвижения пород над выработанным пространством.

В этом отношении весьма характерной является работа профессора Р. Зельденрата [2], в которой приведена схема оседания земной поверхности (рисунок 1) над выработанным пространством длинного очистного забоя (лавы). Эти схемы, предложенные около 60-ти лет назад, полностью соответствует современным представлениям [5] опускания пород.



- 1 – первая граничная плоскость влияния; 2 – вторая граничная плоскость влияния;
3 – линия оседания; 4 – сжимающие напряжения; 5 – растягивающие напряжения;
6 – плоскость разлома

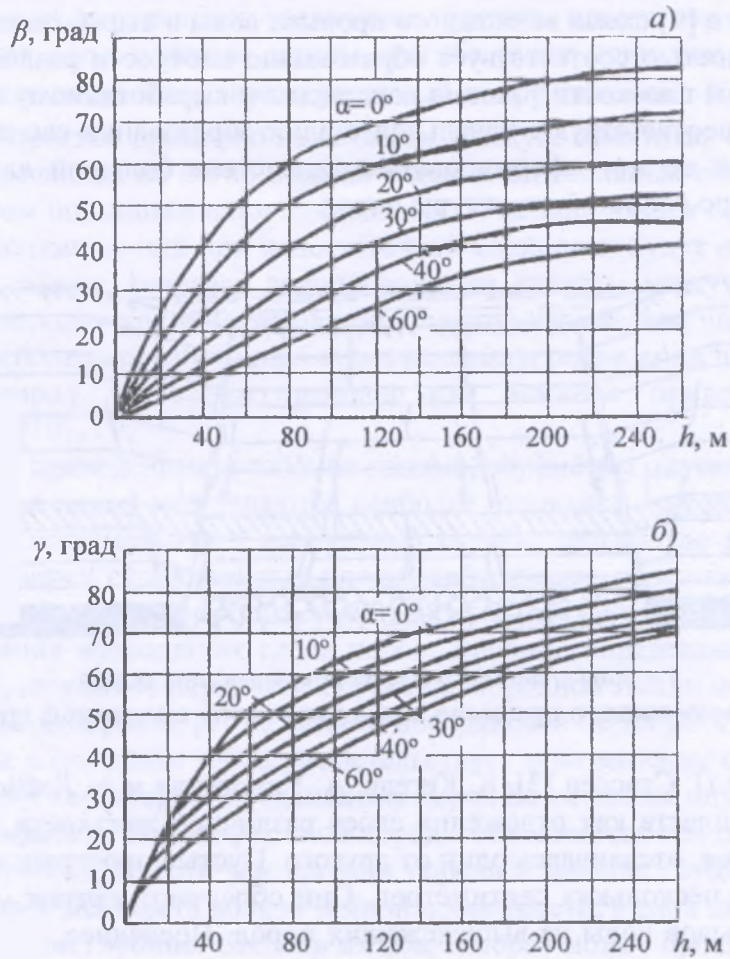
Рисунок 1 – Схема оседания земной поверхности

Однако в соответствии с этой схемой величины граничных углов влияния подработки на границы полностью сформированных во времени зон влияния не зависят от углов падения и вертикальных расстояний на разрезе вкрест простирания от отработанного пласта.

Еще в 1959 г. для условий Донецкого бассейна на базе обширных наблюдений и расчетов были предложены [6] приведенные на рисунке 2 зависимости величины граничных углов на разрезе вкрест простирания от угла падения и вертикального расстояния h горных работ.

Использование этих зависимостей приводит [7] к несколько иным (криволинейной вместо прямолинейной) граничным плоскостям влияния подработки вышерасположенных пластов (рисунок 3), что особенно важно при оценке необходимой мощности ВЗТ, которая обычно должна составлять $200 \div 300$ м [8], где деформация краевых зон в примыкающих к выработанному пространству целиках особенно заметна.

Как отмечено в [2], плоскость разлома пород кровли прослеживалась на расстоянии 80 м выше обрабатываемого пласта под углом падения на выработанное пространство $67-72^\circ$ к горизонту. В Бельгийских шахтах установлено, что сильные обрушения (посадка основной) кровли при глубине разработки до 300 м отражаются на земной поверхности уже через 24 часа.



а – по падению пласта; б – по восстанию пласта

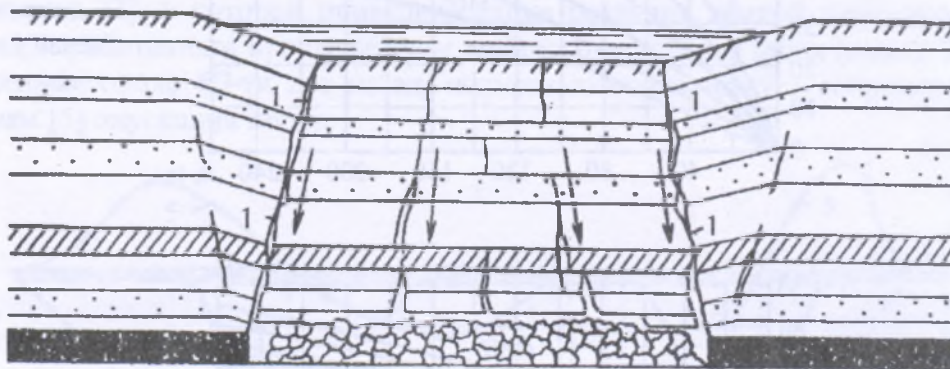
Рисунок 2 – Зависимость величины граничных углов на разрезе вкрест простирания от угла падения и вертикального расстояния от границы горных работ



1, 2, 3 – нижележащий, сближенный и вышележащий пласты соответственно;
 I-I – граница зоны, расположенной непосредственно над выработанным пространством;
 II-II – граница зоны влияния горных работ по падению и восстанию от границ выемочного участка;
 l' и l'' – зоны влияния горных работ на сближенный пласт 2 соответственно по восстанию и падению разрабатываемого пласта

Рисунок 3 – Влияние прямого порядка отработки выемочного поля на образование зон деформации пород над угольными целиками

Приведенная в [9] схема возможного прорыва воды в выработанное пространство (рисунок 4) полностью соответствует образованию плоскости разлома подработанных пород. При этом плоскости разлома наклонены к выработанному пространству и вблизи последнего соответствуют начальной стадии образования свода естественного равновесия, который не мог сформироваться вследствие большой длины основания свода и преобладанию слоистой структуры пород.



1 – зона главного разлома покрывающих пород

Рисунок 4 – Схема возможного прорыва воды через зону сплошной трещиноватости

Как указывал П. Стассен [3], К. Кегель, А. Уинстенли и А. Лабасс рассматривают породы кровли пласта как отложения слоев различной жесткости, которые более или менее изгибаются, отслаиваясь один от другого. Пустые пространства между слоями могут достигать нескольких сантиметров. Они облегчают каптаж метана и объясняют причину прорывов воды из вышележащих пород. Последнее, по-видимому, связано с тем, что эти полости (пустые пространства) создают гидравлическую связь между различными системами примерно вертикальных трещин в налегающих породных пластах с различными горно-геологическими и физико-механическими характеристиками, которые могут являться итогом не только эндогенных (природных), но и экзогенных (техногенных) процессов.

В таблице, заимствованной у Ф. Шпрута [3], приведены результаты теоретических расчетов возможного прогиба консольного слоя породы длиной 8 м, из которых первые 3 м от точки зажатия расположены на упругой подложке (угольном пласте) толщиной 1,5 м.

Таблица – Расчетные значения стрелы прогиба консольного слоя породы длиной 8 м при упругой заделке первых 3 м

Породы	Толщина пласта, см	Теоретически возможная стрела прогиба, см		$K_{пл}$
		в пределах упругости	до разрыва	
Песчаник (предел прочности на изгиб 10 МПа, модуль упругости $2 \cdot 10^4$ МПа)	150	1,8	2,3	1,28
	100	2,6	3,3	1,27
	50	5,4	6,7	1,24
Глинистый сланец (предел прочности на изгиб 15 МПа, модуль упругости $4,5 \cdot 10^4$ МПа)	150		1,5	
	100		2,2	
	50		4,4	

Как видно из этих данных, увеличение толщины пласта породы в 3 раза (с 50 до 150 см) приводит к уменьшению стрелы прогиба также примерно в 3 раза. Учет пластических свойств песчаника, характеризуемый коэффициентом $K_{пл}$, увеличивает возможную стрелу прогиба примерно на четверть. Следует отметить, что прочностные характеристики песчаника на изгиб больше таковых для соляных пластов. Поэтому при последовательном опускании даже одинаковых по механическим свойствам отдельных пластов более тонкие из них при недостаточной спайности будут отделяться от вышерасположенной толщи, создавая водопроводящие каналы между системами трещин разрыва, параллельных краям целиков или не вынутого массива полезного ископаемого. Такая же, но более проработанная схема разлома и расслоения подработанной слоистой толщи пород по краям целиков или массива приведена профессором А.А. Борисовым [10].

Исходя из приведенных в таблице данных, параметры опускания и разлома подработанной толщи пород определяются наиболее мощными и прочными пластами, характеризующимися минимальными величинами стрелы прогиба до разлома. Поэтому в пределах образования существенных плоскостей разлома пересекающих ВЗТ и достигающих до водоносных горизонтов весьма вероятен пульсирующий режим последовательного опускания восходящих слоев пород. Влияние определенного сейсмического воздействия на ускоренное первичное опускание породной толщи мощностью до 300 м, отмеченное Р. Зельденратом [1] на земной поверхности через 24 ч после сильного обрушения кровли в очистном забое, свидетельствует о возможном существенном влиянии динамических характеристик сдвижения пород на их режим опускания.

Как указывает А. Лабасс [4], слои породы оказываются тем более жесткими, чем меньше в них трещин, то есть чем прочнее порода и меньше глубина залегания. Слои сланцев проявляют жесткость вблизи земной поверхности, а слои песчаника становятся гибкими на большой глубине. Степень изгиба, которая может проявиться в этих слоях, зависит не только от их жесткости, величины пролета и нагрузки, но и от времени. Жесткий слой, имеющий меньший изгиб, должен нести на себе вес находящихся над ним гибких слоев. Если жесткий слой находится над гибкими слоями, то последние могут отделяться от него с образованием пустот, проводящих газ и воду.

Основываясь на теории обволакивающих поверхностей ослабленных подработкой пород, А. Лабасс [4] считает, что расстояние между крайними трещинами, определяющими возможности разлома, в двух соседних пластах зависит от прочности пород – чем больше различие, тем больше расстояние между этими трещинами. Если трещиноватость дойдет до очень гибкого слоя или до зоны, где трещины произошли ранее в связи со старыми работами, то здесь явление отслаивания пород может не происходить, но явления изгиба еще продолжают.

Процессы трещинообразования при изгибе породных пластов в реальных условиях в значительной мере зависят не только от природных физико-механических свойств этих пород, но и от их напряженно-деформированного состояния, которое скорее всего является объемным неравнокомпонентным. Так, согласно исследованиям В.В. Виноградова [11], при осесимметричном сжатии геоматериалы изменяют тип своего запредельного поведения, приближаясь по мере роста бокового давления $P = \sigma_2 = \sigma_3$ к псевдопластичным и пластичным материалам. Испытания горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии показали, что тип запредельного поведения определяется в основном величиной минимальной компоненты напряжений σ_3 , что приводит к переходу от механизма хрупкого и псевдохрупкого разрушения к прерывистому скольжению, псевдопластическому и пластическому течению. Поэтому по

характеру перехода к разрушению горные породы могут подразделяться на геоматериалы с хрупким и псевдохрупким разрушением, прерывистым скольжением, псевдопластическим и пластическим течением. Эти результаты [11] получены при неравнокомпонентном объемном сжатии образцов горных пород, но случай растяжения в одном направлении (например, σ_2) и неравнокомпонентного сжатия в двух остальных (σ_1 и σ_3) совершенно не изучен, хотя именно такое поле напряжений возникает и возможно сохраняется в течение какого-то времени в зонах растяжений при сдвигении пород в краевых зонах мульды.

Учитывая заметные пластические свойства пород ВЗТ Старобинского месторождения калийных солей, необходимо использовать исследования [11], которые показали, что для пород с прерывистым скольжением потеря несущей способности происходит при чередовании актов хрупкого разрушения и псевдопластического течения. Для пород, склонных к пластическому течению, разупрочнение, если происходит, то с модулем спада, отношение которого к модулю упругости $M/E < 1$. Поперечные деформации на этой стадии деформирования пород развиваются в 3-10 раз интенсивнее продольных, что важно учитывать при оценке возможности залечивания трещин.

Для хрупких и псевдохрупких материалов при боковых давлениях $P \geq (0,1 \div 0,2) \cdot \sigma_{сж}$ проявляется режим прерывистого скольжения, а при $P \geq (0,4 \div 0,5) \cdot \sigma_{сж}$ – псевдопластического течения. Для пород с прерывистым скольжением при одноосном сжатии псевдопластическое течение возникает при $P \geq (0,3 \div 0,4) \cdot \sigma_{сж}$. В отличие от существующих представлений развитие поперечных деформаций ε_2 и ε_3 в условиях осесимметричного сжатия происходит неравномерно как по значению, так и по направлению [11]. Для пород, склонных к хрупкому разрушению, уже на стадии разупрочнения преимущественное развитие поперечная деформация получает в одном из направлений.

При трехосном неравнокомпонентном сжатии развитие процесса микроуплотнения происходит неравномерно по объему, что ведет еще на допредельных стадиях формирования зон повышенных концентраций напряжений и разрыву внутренних связей. Остаточная несущая способность весьма чувствительна к боковому давлению (при неравнокомпонентном сжатии к σ_3), а изменение бокового давления на 1 МПа ведет к изменению несущей способности нарушенного материала на 5÷10 МПа, что в несколько раз выше, чем для не нарушенного материала. После цикла нагружения практически стабилизировавшееся значение остаточной прочности существенно снижается по сравнению с начальной величиной.

Используя достижения математики и механики, Гриффитс и Орован разработали теорию трещинообразования под действием возникающих напряжений в твердых телах. Основные положения этой теории используются до сих пор при описании процессов разрушения в результате развития трещин. Согласно теории Гриффитса и Орована, для развития трещины необходимо наличие зародыша, в качестве которого могут служить микротрещина или точка неоднородности свойств материала, возникшая в результате структурной или прочностной (композитные материалы) неоднородности.

Как указывает У.Д. Кингери [12], теоретическое напряжение разрушения при действии нормального растягивающего напряжения в направлении главной оси трещины в определенных границах обратно пропорциональна корню квадратному из длины главной оси трещины. Поэтому рост трещин в итоге приводит к разрушению твердого тела.

Известно много попыток разработать статистическую теорию прочности твердых тел. При этом использовалось предположение, что количество опасных трещин в образце связано с его объемом и площадью поверхности.

Анализ прямых наблюдений за трещинами [13] и степенью поврежденности грунта [14], способными привести к разрушению, показывают, что это количество меняется от одного материала к другому [12-14] и, по-видимому, существенно зависит от свойств материала (хрупкость, пластичность, термостойкость и т.п.), условий эксплуатации (переменные нагрузки, существенно нестационарный температурно-влажностный режим, агрессивность среды и т.п.), качества обработки и покрытия поверхностей. Однако до сих пор общей статистической теории нет. Одной из наиболее известных статистических теорий прочности является теория, развитая Вейбуллом еще в 1939 г.

Существенный рост расчетных возможностей ЭВМ в последние годы с одной стороны позволил производить расчеты все более крупных, сложных и многозвенных строительных конструкций, а с другой стороны повысил вероятность и размер возможных итоговых погрешностей. Как известно, уже при выводе фундаментальных дифференциальных уравнений строительной механики отбрасываются многие величины низших порядков малости. При обычных расчетах такой прием не оказывает заметного влияния на погрешность конечного результата, но при расчете многозвенных (несколько тысяч) конструкций результат может быть иным. Кроме того, требования к устойчивости решения возрастают с увеличением последовательных шагов расчета на ЭВМ, т.к. каждый последовательный шаг расчета вносит хотя и очень малую, но определенную погрешность аналогично методу смены стационарных состояний. Кроме того, часто аналитические решения дифференциальных уравнений по разным причинам получаются в виде, которому при определенных значениях параметров свойственна осцилляция и даже сингулярность. С подобной проблемой столкнулся автор при теоретическом исследовании газодинамики угленосных отложений еще 40 лет назад, когда возможности ЭВМ были несравнимо меньше чем теперь. Только использование определенных аналитических приемов и ЭВМ БЭСМ-4 позволили решить возникшие проблемы.

Еще одной причиной существенных отклонений расчетных параметров строительной конструкции от фактических, что может привести к резкому снижению надежности, может являться значительное влияние пластичности материалов, которое не учитывается или учитывается недостаточно при расчете. Особенно важно учитывать пластичность при нагрузках близких к пределу упругости и при обеспечении долговечности, что необходимо при расчете устойчивости фундаментов на достаточно слабых грунтах.

Как указывает С.С. Вялов [14], многие осадочные породы, находящиеся под нагрузкой, с течением времени существенно теряют свои прочностные свойства, что связано с пластическими и вязкими свойствами. У пластичных глинистых грунтов, которые зачастую являются основой ВЗТ, прочность при одноосном сжатии снижается сравнительно быстро, а отношение прочностей при τ_{∞} и τ_0 (здесь τ – время воздействия нагрузки, а индекс «о» обозначает разрушение образца при обычном испытании в лабораторных условиях в течение 1 минуты и менее) колеблется в пределах от 0,2 до 0,6. У плотных глин это отношение повышается до 0,5-0,8 и даже доходит до 0,9. У скальных и полускальных пород в зависимости от вязких свойств, как цементационных связей, так и самих кристаллов, отношение прочностей варьируется преимущественно в пределах 0,6-0,8. Для сильвинита это отношение составляет около 0,5-0,6. Многие металлы также обладают подобными свойствами, но с меньшей потерей прочности. Кривые ползучести грунта и длительной прочности для иллюстрации методики определения τ_0 и τ_{∞} приведены на рисунке 5.

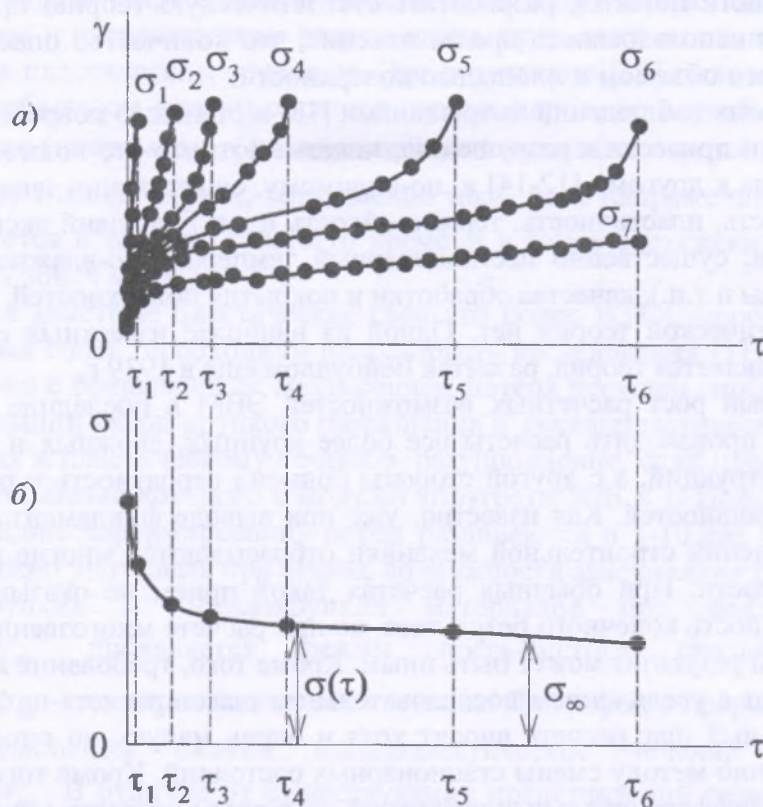


Рисунок 5 – Кривые ползучести материала (а) при различных одноосных сжимающих напряжениях ($\sigma_1 \div \sigma_7$) и кривая длительной прочности (б)

Снижение прочностных свойств материалов происходит за счет образования и развития трещин, а также поврежденности внутренней структуры материала в процессе деформирования.

Как показала обработка результатов испытаний на сжатие сильвинита, проведенных А.Н. Ставрогиным [17], а также известняка, песчаника и сланца (изгиб), проведенных В.С. Артемьевым и В.Л. Водопьяновым [18], наилучшей формой аппроксимации (рисунок 5б) является уравнение:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 [\alpha_1 + \alpha_2 \exp(-c\tau)], \quad (1)$$

где σ_τ – прочность породы на сжатие (изгиб) через время τ пребывания в напряженном состоянии, МПа;

σ_0 – прочность породы на сжатие (изгиб) при весьма кратковременном действии напряжения, МПа;

α_1 – доля прочности при весьма длительном ($\tau \rightarrow \infty$) действии напряжений;

α_2 – доля прочности, зависящая от времени действия напряжений;

c – эмпирический коэффициент показателя степени, сут⁻¹;

τ – промежуток времени действия напряжения, сут.

Например, для сильвинита выражение (1) аппроксимирует экспериментальные точки с корреляционным отношением 0,99 и относительным коэффициентом вариации $K_{\text{в.о.}} = 0,42\%$ при $\sigma_0 = 32$ МПа, $\alpha_1 = 0,6$; $\alpha_2 \approx 0,4$ и $c = 0,3235$ сут⁻¹. Результаты экспери-

ментов со скальными и полускальными породами также хорошо аппроксимируются приведенным выражением.

Дальнейшему развитию теории Гриффитса-Орована посвящены сотни научных работ, анализ которых и результаты новых исследований приведены в изданной недавно монографии С.Н. Леоновича [19], посвященной трещиностойкости и долговечности бетонных и железобетонных элементов.

Однако, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор проблемы расчета долговечности строительных конструкций не получили достаточно законченного решения. Последнее в первую очередь относится к описанию закономерностей вероятностной составляющей природы разрушения. Поэтому работа Б.Г. Холодарь [13] представляет особый интерес.

Хотя основные кинетические уравнения получены около 30 лет назад, но их дальнейший анализ и интерпретация и теперь представляют теоретический и практический интерес, особенно в связи с возникшей проблемой контроля прочности бетона [20].

Новая интерпретация результатов испытаний на долговечность образцов из поликристаллического цинка [21, 22] позволила Б.Г. Холодарь получить [13] новые интересные результаты. К таковым в первую очередь следует отнести распределение плотности вероятности разрушения образцов во времени при постоянной нагрузке $dP/d\tau$ и исходной поврежденности $dP/d\omega_0$, плотность вероятности которой представляет большой интерес. Форма этой плотности вероятности (рисунок 6) больше напоминает логнормальное распределение, а не распределение Вейбулла [23], чего можно было ожидать. Однако в этой работе [13] рассматривается статистическая вероятность разрушения образцов с начальным и неизменным во времени распределением повреждений, приводящим к различным вероятностям и моментам разрушений в зависимости от величины и режима нагружения.

Как пишет автор работы [13] в ее заключительной части: «Поскольку частотный параметр ν в уравнении (2)* рассматривался выше как некоторая константа материала, то само уравнение при этом не описывает режимов зарождения и размножения дефектов структуры, появляющихся в материале в процессе его активного нагружения, например, циклического. В этом смысле сделанный выше вывод о применимости критерия Бейли фактически относится к случаю медленноменяющихся нагрузок, для которых непосредственно вызываемая ими (наведенная в материале) поврежденность составляет некоторую достаточно малую долю от исходной «технологической» поврежденности». Однако, как видно из [13, рисунок 5], уровень нагруженности ($x = 4; 16; 32$) не влияет на изменение максимального уровня начальной поврежденности материала ($\omega_0 \approx 0,22$), что противоречит физике процесса подготовки разрушения, т.к. разрушение 25 % образцов (12 из 48) происходит уже при $x = 8$. Последнее также видно из рисунка 6, заимствованного из [13]. Здесь также необходимо отметить, что практикой установлена особая опасность превышения расчетной нагрузки различных элементов строительной конструкции (дополнительная нагрузка на кровлю в результате укладки новых слоев кровельных материалов без удаления старых [24], превышения снеговой нагрузки расчетной, обледенения и т.п.).

Интересно отметить, что при повторном нагружении образцов (рисунок 6) произошел сдвиг по времени кривой вероятности разрушения образцов по сравнению с непрерывным нагружением. Повторное нагружение образцов производилось после первого

* Уравнение (2) в [13] описывает скорость изменения меры поврежденности ω во времени при одноосном растяжении. Уравнения (1) в [13] описывают изменение меры поврежденности за счет гидростатической и девиаторной (сдвиговой) компонент.

нагружения при $\sigma = 8 \text{ кгс/мм}^2$ в течение времени $T_0 = 3000 \text{ с}$ в результате чего из 48 образцов разрушилось 12 (25 %). Оставшиеся 36 образцов кратковременно «отдохнули» и были нагружены повторно при $\sigma = 8 \text{ кгс/мм}^2$ (рисунок 6, кривая 2). Новая кривая вероятности разрушения проходит существенно выше таковой при непрерывном нагружении (кривая 1). Необходимо отметить, что если провести уровень $P = 0,75$ (пунктир 3), то есть вычесть использованный при первичном нагружении уровень вероятности 0,25 (25 %), до кривой 1 и перенести точку пересечения на кривую 2 (точка 4), то уровень достигнутой вероятности практически приближается к 1. Таким образом, первичная нагрузка в течение $T_0 = 3000 \text{ с}$ уменьшила завершение процесса разрушения всех образцов с 20000 с до примерно 10000 с. Первичная нагрузка в течение 3000 с оказалась эквивалентной конечной части процесса разрушения в 10000 с. Поэтому при переменном режиме нагрузки даже с одинаковой предельной нагрузкой интенсивность процесса разрушения не остается постоянно соответствующей режиму непрерывного нагружения.

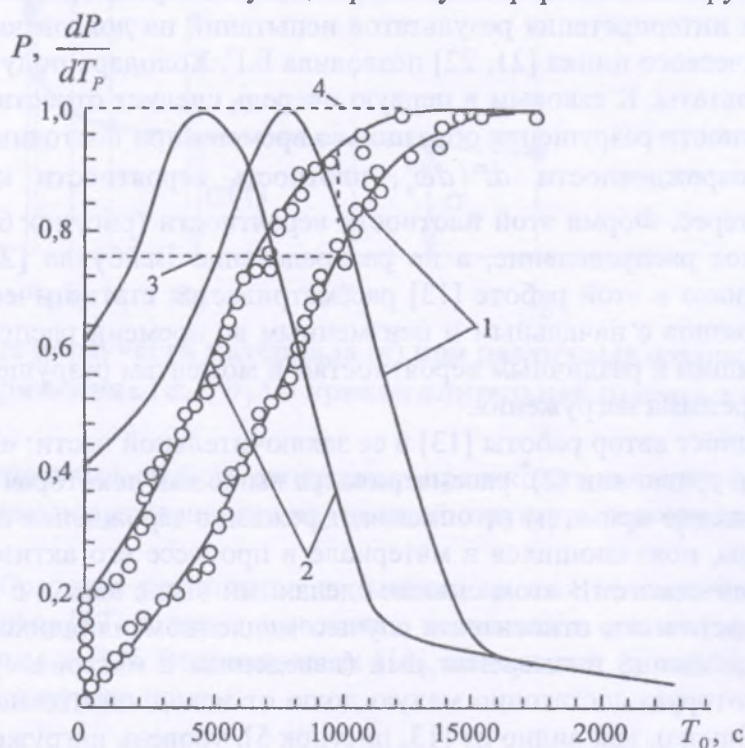


Рисунок 6 – Вероятность разрушения и плотность ее распределения при непрерывном нагружении (кривые 1) и нагружении с прерыванием (кривые 2). Пунктирная линия 3 – уровень вероятности разрушения 0,75; 4 – время почти полного разрушения всех образцов при повторном нагружении

Заключение

Многолетние исследования процессов разрушения пород и материалов показали решающее значение их структуры, свойств образующих минералов и связей между ними, определяющими возможную пластичность, а также влияние видов полей напряжений и динамики их воздействия во времени и пространстве. Сам процесс разрушения может быть описан сочетанием детерминированных и стохастических закономерностей.

Список использованных источников

1. **Авершин, С.Г.** Сдвигение горных пород при подземных разработках / С.Г. Авершин. – М.: Углетехиздат, 1947. – 245 с.
2. **Зельденрат, Р.** Являются ли породы каменноугольных отложений сыпучими телами и можно ли применить к ним законы механики грунтов / Р. Зельденрат // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 80-88.
3. **Стассен, П.** Обзорный доклад подсекции / П. Стассен // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 157-170.
4. **Лабас А.** Давление и сдвигение пород / А. Лабас // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 23-27.
5. **Турчанинов, И.А.** Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л-д: Недра, 1977. – 368 с.
6. **Прокофьев, В.П.** Рациональные способы подготовки и системы разработки сближенных пластов / В.П. Прокофьев, К.П. Заика. – М.: Углетехиздат, 1959. – 234 с.
7. **Осипов, С.Н.** Метановыделение при разработке пологих угольных пластов / С.Н. Осипов. – М.: Недра, 1964. – 256 с.
8. Месторождения калийных солей Беларуси / под ред. Э.А. Высоцкого и А.Д. Смычника. – Мн.: БГУ, 2003 – 264 с.
9. **Проскуряков, Н.М.** Управление состоянием массива горных пород / Н.М. Проскуряков. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
10. **Борисов, А.А.** Расчеты горного давления в лавах пологих пластов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1964. – 278 с.
11. **Виноградов, В.В.** Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
12. **Кингери, У.П.** Введение в керамику / У.П. Кингери. – М.: Изд. лит. по строительству, 1967. – 500 с.
13. **Холодарь, Б.Г.** Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности / Б.Г. Холодарь // Строительство и архитектура (Вестник Брестского государственного технического университета). – 2005. – № 1. – С. 40-46.
14. **Вялов, С.С.** Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
15. **Черепанов, Г.П.** Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
16. **Панасюк, В.В.** Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1968. – 246 с.
17. **Ставрогин, А.И.** Исследование реологических свойств грунтов / А.И. Ставрогин. – М.: Энергия. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 38, 1968.
18. **Артемьев, В.Г.** О длительной прочности горных пород / В.Г. Артемьев, М.М. Водопьянов // Проблемы реологии горных пород. – Киев: Наукова думка, 1970.
19. **Леонович, С.Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов / С.Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1996. – 266 с.
20. **Блещик, Н.П.** К вопросу о контроле прочности бетона в свете требований ГОСТ 18105-86 и общеевропейского стандарта EN206-1:2001 / Н.П. Блещик, В.В. Тур, В.К. Кравченко // Строительная наука и техника. – 2005. – № 1.
21. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуджер, Э.И. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560с.

22. **Бобоев, Т.Б.** Статистический разброс значений долговечности при механическом испытании и необратимость разрушения твердых тел / Т.Б. Бобоев, В.Р. Регель, А.И. Слуцкер // Проблемы прочности. – 1974. – № 3. – С. 40-44.

23. **Хастингс, Н.** Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. – М.: Статистика, 1980. – 96 с.

24. **Лапчинский, А.К.** Эксплуатационная надежность железобетонных безраскосных ферм / А.К. Лапчинский // Архитектура и строительство. – 2005. – № 2. – С. 114-116.

Osipov S.N., Smychnik E.A., Shvab R.G.

Some features of rock breaking and material breakage processes

Variety of rock breaking and material breakage processes depending on their structure, physical and mechanical properties and external loads is presented. The magnitude and dynamics of changes in fields with different types of stresses taking into account temporal changes and space variation are essential.

Поступила в редакцию 04.08.2011 г.