

НОВАЯ ТЕОРИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Проведено короткий аналіз існуючих уявлень про стан розвитку теорій міцності гірських порід. Запропоновано описувати міцність матеріалів за допомогою диференціальних рівнянь. Уперше звернена увага на необхідність обліку рідинного тертя на площадках руйнування. Як головний показник властивостей матеріалу запропонований новий коефіцієнт крихкості як міра співвідношення між сухим і рідинним тертям на площадці зрушення. У висновках звернена увага на нові задачі, що стоять перед експериментаторами і теоретиками механіки гірських порід.

NEW ROCK STRENGTH THEORY

It is realized the brief analysis of present conceptions of rock strength theory. It is offered to describe the material strength with help of differential equations. It is proposed a new fragility coefficient. It is noticed the new tasks being to experimentalists and theorists of rock mechanics.

Введение

Проблема адекватного описания прочностных свойств естественных (горных пород, древесины) и искусственных (каменных, металлических, полимерных и др.) материалов является одной из важнейших в инженерных науках и пронизывает буквально все технологические направления производства. Несмотря на большие усилия многих поколений исследователей, - экспериментаторов и теоретиков, - эта проблема до настоящего времени не нашла должного решения, удовлетворяющего запросы практики.

Наука о прочности преследует цель определения предельного уровня напряжений, которое может выдержать материал без разрушения при произвольном способе его нагружения. Эту задачу пытались решить многочисленные классические теории прочности [1] и новые направления в механике деформируемого твердого тела (механика разрушения, кинетические теории прочности и др.) [2].

Однако традиционные подходы, как правило, оперируют алгебраическими представлениями в отрыве от рассмотрения процессов зарождения и развития микродефектов, то есть без привлечения реономной микромеханики разрушения [3]. Поэтому до сих пор не удалось получить удовлетворительного теоретического решения многих задач проблемы прочности. В частности, из экспериментов следует, что паспорта прочности реальных материалов существенно нелинейны, однако удовлетворительного теоретического объяснения этому до сих пор дано не было.

Предлагаемая новая теория прочности базируется на том, что макромеханические свойства материалов являются следствием развития неупругих процессов на отдельном дефекте типа сдвига или разрыва, причем разрушение сдвигом сопровождается не только сухим, но и жидкостным трением. Это позволяет впервые обосновать не алгебраическую, а дифференциальную запись паспорта прочности материалов, что открывает широкие возможности более широкой трактовки критерия прочности для различных горных пород и материалов.

1. Существующие критерии прочности

Сущность известной теории прочности Кулона-Мора [1] состоит в распространении закона сухого трения Кулона на критерий разрушения твердых тел. Согласно этой теории, сдвиг по некоторой плоскости происходит, если касательные напряжения на площадке сдвига станут равными сопротивлению сдвигу.

При наличии в материале сцепления к нормальным напряжениям на поверхности возможного сдвига следует прибавить когезию разрыва σ_0 , что дает нижеприведенное уравнение паспорта прочности идеально связного материала:

$$\tau_n = f(\sigma_n + \sigma_0) = f\sigma_n + \tau_0 \quad (1.1)$$

где $\tau_0 = \sigma_0 f$ - сдвиговая когезия, Па.

В главных напряжениях паспорт прочности идеально связного тела имеет вид (его можно получить из простейших геометрических построений на паспорте прочности рис. 1):

$$\sigma_1 = s\sigma_3 + \sigma_c \quad (1.2)$$

где σ, σ_3 - главные максимальное и минимальное напряжения, Па;

$s = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi / 2)$ - параметр угла φ внутреннего трения;

$\sigma_c = s\sigma_0$ - предел прочности материала на одноосное сжатие, Па.

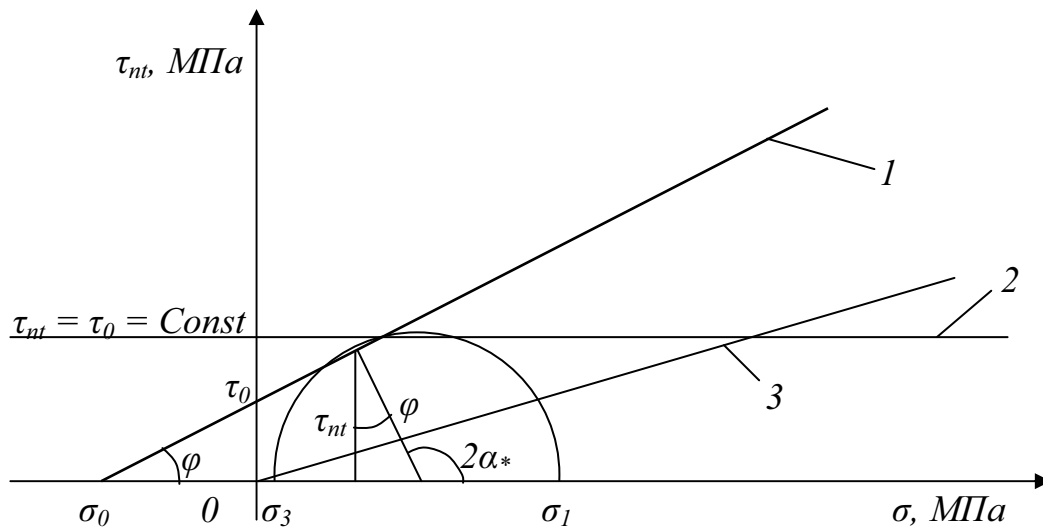
Несмотря на удобство и простоту полученных уравнений, они ввиду своей линейности являются мало пригодными для описания прочности реальных материалов и горных пород, паспорт прочности которых, как правило, криволинейен.

С целью устранения этого недостатка были предложены иные критерии разрушения, главным образом, с использованием алгебраических преобразований.

К числу широко известных критериев разрушения для горных пород следует отнести эмпирическую формулу Бенявского [4]

$$\sigma_1 = A\sigma_c^{0,25}\sigma_3^{0,25} + \sigma_c \quad (1.3)$$

где A - эмпирическая константа.



1 - идеальное связное тело ($f = Const; \sigma_0 \neq 0; \tau_0 \neq 0$); 2 - идеально пластическое тело ($f = 0; \tau_0 = Const$); 3 - идеально сыпучее тело ($f = Const; \sigma_0 = \tau_0 = 0$).

Рис.1 - Паспорта прочности идеальных материалов на диаграмме О.Мора

Самый удобный и распространенный в настоящее время эмпирический критерий прочности был предложен Хоеком и Брауном [5] в виде:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1.4)$$

где m и s - безразмерные константы материала.

Однако эмпирические критерии прочности пригодны лишь для узкого диапазона горных пород, а самым главным их недостатком является невозможность обобщения на более сложные случаи структурного строения горных пород.

2. Сущность новой теории прочности и вывод основного уравнения

Рассмотрим теоретические предпосылки получения обобщенного уравнения паспорта прочности твердого материала (в том числе горной породы). Будем исходить из того, что разрушение сдвигом происходит путем образования многочисленных сдвиговых микродефектов в сочетании с опережающими их разрывами. В совокупности сдвиги и разрывы, возникающие в теле, образуют многочисленные рассеянные по всему объему материала Z - дефекты.

Наука, изучающая законы зарождения, роста и залечивания микродефектов во времени и происходящие при этом изменения свойств и состояния материалов при внешних на него воздействиях, называется реономной микромеханикой. Эта наука описывает все сложные процессы деформирования и разрушения материалов на основе решения систем дифференциальных кинетических уравнений, которые отражают на микроуровне процессы изменения

внутренней структуры тела, состоящие из элементарных актов зарождения и залечивания различных микродефектов.

Для разработки новой теории прочности необходимо воспользоваться рядом положений реономной микромеханики и отказаться от традиционных воззрений. Так, в отличие от представлений о сухом трении Кулона, положенном в основу теории прочности О.Мора, мы считаем, что на площадке сдвига присутствуют два механизма трения - сухое и жидкостное. Это подтверждается экспериментальными данными физики деформирования и разрушения материалов [2], изучающей процессы образования и роста трещин в материале на микроуровне. В частности, в устье растущей трещины местная (локальная) температура превышает температуру плавления материала и там, очевидно, возникает жидкостное трение.

Следовательно, надо учесть не только сухое, но и жидкостное трение при образовании и росте трещин. Удобно выразить долю сухого трения на сдвиговых площадках параметром α , который назовем коэффициентом хрупкости ($0 \leq \alpha \leq 1$). Если $\alpha = 0$, то сухое трение отсутствует и материал идеально пластичен, если $\alpha = 1$ - материал представляет собой идеально связное (хрупкое) тело согласно уравнениям (1.1) или (1.2).

В классической теории прочности О.Мора (рис.1) при наличии когезии разрыва коэффициент внутреннего трения постоянен (*Const*):

$$f = tg\varphi = \frac{d\tau_{nt}}{d\sigma_n} = \frac{\tau_n}{\sigma_n + \sigma_0} = Const, \quad (2.1)$$

где f - коэффициент трения, $f = tg\varphi$; φ - угол трения между контактирующими поверхностями; τ_{nt} , σ_n - касательное и нормальное напряжения на площадке сдвига, Па; σ_0 - когезия разрыва или прочность материала на всесторонне растяжение.

Угол внутреннего трения φ для твердого материала исторически был введен по аналогии с углом трения идеально сыпучего материала (песка). С геометрической точки зрения - это угол наклона предельной огибающей наибольших кругов напряжений диаграммы Мора (паспорта прочности) к оси нормальных напряжений в некоторой точке.

Мы будем исходить из более сложного, но теоретически более обоснованного и общего соотношения, учитывающего, что в материале на сдвиговых дефектах возникает не только сухое, но и жидкостное трение. Для этого уравнения прочности запишем в дифференциальном виде и введем в него новый показатель - коэффициент хрупкости α .

$$f = tg\varphi = \frac{d\tau_{nt}}{d\sigma_n} = \frac{\alpha\tau_{ne}}{\sigma_n + \sigma_0} = var, \quad (2.2)$$

Решая дифференциальное уравнение (2.2) и определяя постоянную интегрирования из естественного условия $\tau_{nt} = \tau_0$ при $\sigma_n = 0$, получим

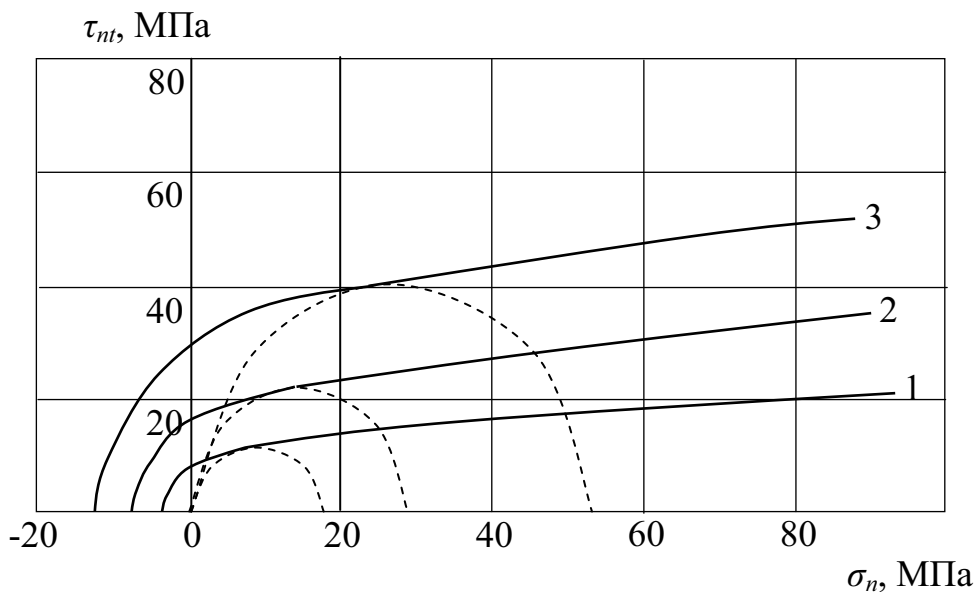
$$\tau_{nt} = \tau_0 \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^\alpha, \quad (2.3)$$

где τ_0 - когезия сдвига, численно равная на диаграмме О.Мора отрезку на оси τ , отсекаемому паспортом прочности при $\sigma_n = 0$, Па (рис. 1).

Уравнение (2.3) является критерием прочности однородного материала (горной породы). Обобщенные огибающие на диаграмме О.Мора представлены на рис.2.

Расчеты показывают, что задание трех параметров σ_0 , τ_0 , α вполне достаточно для описания любого типа паспорта прочности. При $\alpha = 0$ получим паспорт прочности идеально пластической породы с прямолинейной огибающей оси, параллельной оси σ . Если $\alpha = 1$ паспорт прочности вырождается в прямолинейную огибающую для идеально связного (хрупкого) материала с постоянным углом внутреннего трения, равным $\varphi_0 = \arctg(\tau_0/\sigma_0)$.

Большинство горных пород обладают показателем хрупкости $\alpha < 0,5$, когда огибающая паспорта прочности пересекает ось σ под прямым углом. При $\alpha < 0,5$ когезия σ_0 и предел прочности на одноосное растяжение σ_p совпадают, что существенно упрощает вычисление параметров паспорта по экспериментальным данным. Если $\alpha > 0,5$, то этот угол оказывается меньше прямого, что редко встречается у горных пород.



1 – аргиллит $\alpha = 0,3$; $\sigma_0 = 3$ МПа; $\tau_0 = 7$ МПа; 2 - алевролит $\alpha = 0,35$; $\sigma_0 = 6$ МПа; $\tau_0 = 15$ МПа; 3 - песчаник $\alpha = 0,4$; $\sigma_0 = 10$ МПа; $\tau_0 = 25$ МПа.

Рис. 2 - Паспорта прочности типичных пород Донбасса и их основные параметры

3. Определение параметров нового паспорта прочности

Экспериментально параметры обобщенной огибающей (паспорта прочности) можно определить, испытав в лаборатории образцы горной породы на одноосное растяжение σ_p и сжатие σ_c , а также используя тот факт, что угол

внутреннего трения при одноосном сжатии пород φ_c достаточно хорошо известен. Так, например, для различных пород он изменяется в довольно узких пределах (табл. 1).

Формулы для определения параметров обобщенного паспорта прочности горной породы имеют вид:

$$\sigma_0 = \sigma_p; \quad (3.1)$$

$$\alpha = tg\varphi_c (\sigma_0 + \sigma_n^*) / \tau_n^*; \quad (3.2)$$

$$\tau_0 = \tau_{nt}^* / (\sigma_n^* / \sigma_0 + 1)^n. \quad (3.3)$$

где σ_n^* и τ_{nt}^* - напряжения на площадке сдвига при одноосном сжатии, равные:

$$\sigma_n^* = \sigma_0 (1 - \sin \varphi_c) / 2; \quad (3.4)$$

$$\tau_{nt}^* = (\sigma_c \cos \varphi_c) / 2 \quad (3.5)$$

В общем случае достаточно три произвольных прочностных показателя породы (материала), определенных экспериментально, чтобы путем решения системы трех трансцендентных уравнений (2.3) вычислить все искомые параметры (α , σ_0 , τ_0) обобщенного паспорта прочности. Подобные системы уравнений обычно решают с помощью популярных вычислительных программ (MathCAD, MathLAB) на компьютере.

Пределы численных значений параметров обобщений огибающей для различных типов пород Донбасса в зонах средней с тепени метаморфизма представлены в табл.2.1.

Таблица 2.1 - Параметры обобщенного паспорта прочности для осадочных пород Донбасса

ТИП ПОРОДЫ	ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЧНОСТИ			ПАРАМЕТРЫ ОГИБАЮЩЕЙ		
	φ , град	σ_p , МПа	σ_c , МПа	α	σ_0 , МПа	τ_0 , МПа
Аргиллиты	18-22	1-4	30-40	0,2-0,3	1-4	5-10
Алевролиты	23-27	3-8	30-80	0,3-0,4	3-8	7-20
Песчаники	28-32	5-12	50-150	0,4-0,45	5-12	10-40

С увеличением хрупкости горных пород параметр α возрастает, однако, как правило, для большинства пород он меньше 0,5. Следовательно, прочность на одноосное растяжение совпадает с когезией разрыва. В то же время соотношение между когезиями разрыва и сдвига может меняться в достаточно широких пределах, но, как правило, $\tau_0 \leq \sigma_0$.

4. Прочность трещиноватых массивов

Экспериментально установлено, что прочность массива горных пород на-

много меньше, чем прочность слагающих его пород. Это обусловлено наличием трещиноватости. Последняя, как правило, повышается по мере увеличения масштаба рассматриваемого участка (блока) массива. Такая особенность изменения прочности пород получила название масштабного эффекта. Если с помощью геофизических исследований и геологических изысканий удалось установить степень нарушенности массива трещинами, то можно рассчитать прочность массива на основании данных о степени его трещиноватости и прочности пород в образце.

Для этого введем новый параметр ψ ($0 \leq \psi \leq 1$) для характеристики сплошности массива. С физической точки зрения он представляет собой часть ненарушенной трещинами площади, оставшейся на некоторой произвольной плоскости в массиве. Если породы разбиты хаотическими трещинами, причем они открытые (с несомкнутыми берегами), то обобщенное уравнение прочности массива можно записать следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\tau_{nt}}{d\sigma_n} = \frac{\alpha\psi\tau_{nt}}{\sigma_n + \sigma_0\psi}, \quad (4.1)$$

решение которого, с учетом очевидного граничного условия $\tau_{nt} = \psi\tau_0$ при $\sigma_n = 0$, будет :

$$\tau_{nt} = \tau_0\psi\left(\frac{\sigma_n}{\psi\sigma_0} + 1\right)^{\alpha\psi}. \quad (4.2)$$

Тем самым получили уравнение обобщенного паспорта прочности трещиноватого массива. С его помощью можно определить прочность горного массива, ненарушенного хаотическими трещинами, у которых берега раскрыты. Таким же образом решаются и более сложные задачи расчета прочности свойств массива с самими разнообразными трещинами и условиями изменения сплошности ψ .

На рис. 3 можно проследить, как изменяется паспорт прочности алевролита, если в нем увеличивается число открытых трещин, что вызывает уменьшение сплошности ψ породы. Здесь ψ же показаны круги пределов прочности алевролита на одноосное сжатие.

Более сложным случаем для получения уравнения прочности является наличие в материале закрытых трещин сдвига, которые имеют сомкнутые берега. Пусть на площадке сдвига таких трещин будет $1 - \psi$. Тогда дифференциальное уравнение прочности для такой породы имеет вид:

$$\frac{d\tau_{nt}}{d\sigma_n} = \frac{\alpha\psi\tau_{nt}}{\sigma_n + \sigma_0} + \frac{\alpha_c(1-\psi)\tau_{nt}}{\sigma_n + \sigma_0\psi}, \quad (4.3)$$

где α_c - коэффициент хрупкости на берегах сомкнутых трещин. В частности, если в трещинах имеется заполнитель или влага, то это учитывается соотношением $\alpha_c < \alpha$.

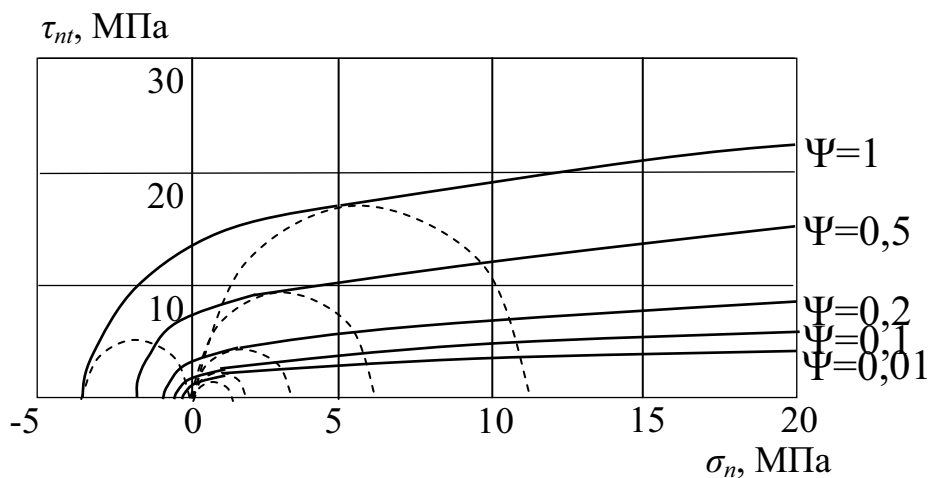


Рис. 3 - Паспорта прочности алевролита ($\sigma_n = 2$ МПа, $\tau_n = 10$ МПа, $\alpha = 0,4$) с различной степенью сплошности, вызванной наличием открытых трещин

Решение уравнения (4.3) с теми же граничными условиями $\tau_{me} = \psi\tau_0$ при $\sigma_m = 0$, оказывается равным:

$$\tau_{me} = \tau_0 \psi \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} + 1 \right)^{\alpha\psi} \left(\frac{\sigma_m}{\psi\sigma_0} + 1 \right)^{\alpha_c(1-\psi)}. \quad (4.4)$$

Несмотря на сложный вид полученного уравнения прочности (4.4), его использование не представляет труда. При $\psi = 1$ уравнение (4.4) переходит в исходный критерий прочности (2.3).

5. Объемная прочность неоднородной (зернистой) породы

Рассмотрим нетривиальную проблему определения критерия прочности для горной породы, состоящей из различных минералов. Такая постановка задачи невозможна в рамках традиционных теорий прочности. Пусть путем обычных минералогических и петрографических исследований установлена структура, строение и минералогический состав конкретной горной породы. Кроме того, известны все необходимые механические свойства (деформационные и прочностные) слагающих породу минералов.

Пусть площадь, занимаемую минералом (зерном) с индексом i обозначим через ψ_i , причем всего имеется n минералов на площадке сдвига ($0 \leq i \leq n$). Для решения задачи исходными данными будут механические свойства всех слагающих породу минералов $\alpha, \sigma_{0i}, \tau_{0i}, E_i, G_i, \psi_i; 0 \leq i \leq n$ где дополнительно необходимо знать модули Юнга и сдвига для учета неоднородности распределения напряжений на минералах.

Введем оператор средневзвешенного осреднения любого показателя свойств минерала a_i по всей площади сдвига породы с весом ψ_i :

$$\bar{a} = \sum a_i \psi_i. \quad (5.1)$$

Тогда нормальные и касательные напряжения на минерале i в микронеоднородном материале с учетом (5.1) будут равны

$$\sigma_i = \sigma_n E_i / \bar{E} = \sigma_n e_i; \quad \tau_i = \tau_n G / \bar{G} = \tau_n g_i, \quad (5.2)$$

где $e_i = E_i / \bar{E}$ и $g_i = G_i / \bar{G}$ соответственно относительные продольная и сдвиговая жесткости каждого входящего в породу минерала.

Запишем дифференциальное уравнение прочности микронеоднородного материала на основании (2.3) и введенных обозначений:

$$\frac{d\tau_{nt}}{d\zeta_n} = \tau_{nt} \sum \frac{\alpha_i \psi_i g_i}{\sigma_n e_i + \sigma_{0i}}. \quad (5.3)$$

Решение уравнения (5.2) при подстановке граничного условия $\tau_{nt} = \bar{\tau}_0 = \sum \tau_{0i} \psi_i$ при $\sigma_n = 0$, дает критерий прочности зернистой породы в виде уравнения обобщенной огибающей диаграммы О.Мора:

$$\tau_{0i} = \bar{\tau}_0 \prod \left(\frac{\sigma_n e_i}{\sigma_{0i}} + 1 \right)^{\beta_i}, \quad (5.4)$$

где для упрощения записи введено обозначение

$$\beta_i = \frac{\alpha_i \psi_i g_i}{e_i}. \quad (5.5)$$

Нетрудно убедиться, что в предельных случаях уравнение (5.4) переходит в более простые модификации уравнения прочности, выведенные в предыдущих разделах. Полезно обратить внимание на то, что приведенные относительные жесткости i -компонента породы e_i , g_i по разному влияют на его вклад в прочность. При увеличении сдвиговой жесткости повышается хрупкость компонента а при увеличении продольной приведенной жесткости улучшаются пластические свойства зерна.

Тем самым решена проблема определения прочности микронеоднородного материала (например, зернистой породы) по известным механическим свойствам компонент. Практическая важность этого теоретического решения состоит в том, что во многих случаях можно отказаться от сложных и трудоемких натурных и лабораторных испытаний горных пород, если изучить их минералогический состав. Поскольку механические свойства ингредиентов яв-

ляются стабильным и давно установленным, то определить прочность горных пород самого сложного состава. Главное внимание при этом следует уделить созданию базы данных о механических свойствах наиболее распространенных минералов, входящих в состав горных пород.

Выводы:

На основании дифференциальной модели прочности горной породы с учетом возможности одновременного проявления сухого и жидкостного трения на площадках сдвига разработана методика описания разрушения горных пород различной структуры;

Угол внутреннего трения ввиду его изменчивости нельзя считать показателем прочностных свойств горных пород и должен быть изъят из расчетной практики, а ему на смену должен прийти параметр хрупкости, обобщающий феномен внутреннего трения и жидкостного скольжения, обладающий стабильностью и отражающий сущность процессов разрушения в материале;

За счет введения показателя сплошности ψ_i и дифференциальной модели впервые определена прочность структурно-сложных (неоднородных) материалов, что было невозможным с позиций традиционных алгебраических подходов. В результате четкой интерпретации описания сложных структур появилась необходимость пересмотра методики натуральных и экспериментальных исследований по исследованию трещиноватости и неоднородности горных пород и массивов. Базовым требованием новой методики является описание относительной площади, которую занимают различные неоднородности на площадке сдвига и механические характеристики этих неоднородностей;

На основе полученного уравнения прочности неоднородного материала (зернистых пород) появилась возможность значительно сократить объем длительных и сложных лабораторных и натуральных испытаний горных пород и массивов, для чего следует заменить их расчетами композитов из ингредиентов с известными механическими свойствами (в том числе с учетом трещин и ослабленных контактов);

Направлениями дальнейших исследований являются: а) теоретически выполнить описание прочности массивов с учетом различно направленных плоскостей ослабления и анизотропию прочности; б) на базе реономной микромеханики деформирования и разрушения материалов дать с помощью кинетических дифференциальных уравнений развитие процесса разрушения во времени; в) показать влияние температурных и других физических полей на критерий разрушения материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев: Наукова думка, 1976. - 515 с.
2. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. - СПб.: Политехника, 1993.- 392 с.
3. Литвинский Г.Г. Обобщенный паспорт прочности горных пород / Науковий вісник НГАУ.- Дніпропетровськ: Національна гірнична академія України НГАУ, 1995. – С. 85-89.
4. Bieniawski Z.T. Estimating the Strength of Rock Materials. - J. S. Afr. Min. Metall., Vol. 74., 1974. - P. 312-320.

5. Hoek E., Wood D., Shah S.A. Modified Hoek-Brown Criterion for jointed Rock Masses.- Proceeding ISRM Symposium: Eurock 92 Rock Characterization, J.A. Hudson (ed) , British Geotechnical Society. London. 1992. - P. 209-214.

6. Литвинский Г.Г. Структура и напряженное состояние микродефектного материала (горной породы) / В сб. : Ground Control in Mining /-Донецк : ДонГТУ, 2000.- С. 28-48 .

УДК 622.023.7:510.67

А.Н. Шашенко, В.И. Янко, А.В. Солодянкин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

У статті розглянутий принциповий підхід до вирішення чисельної пружно-пластичної задачі оцінки напружень і деформацій навколо горизонтальної виробки, що знаходиться у структурно неоднорідному породному масиві. Наведена аналогія між “жорстким” деформуванням породного зразку і деформуванням приконтурного масиву навколо виробки. Надані принципові співвідношення.

NUMERIC MODELLING OF INTENSELY DEFORMED STATE OF GRADUALLY WEAKENED MASSIF IN THE VICINITY OF THE UNDERGROUND DEVELOPMENTS

The principal approach to the solution of numeric resilient-elastic task of determining the intentions of the deformation around single horizontal mine working placed in a structurally heterogeneous rock massif is considered in the article. The analogy between hard deformation of the rock sample and the deformation of close-to contour massif in the mine working vicinity is stated. The principal correlations are given.

Рассмотрим геомеханическую систему «породный массив-подземная выработка», находящуюся в некотором напряженно-деформированном состоянии под действием массовых сил. Породный массив обладает неоднородной структурой, выработка имеет заданные размеры. Исследуемая система находится в состоянии механического равновесия. Требуется определить компоненты тензоров напряжений и деформаций, а также вектора перемещений в окрестности выработки с учетом возникающих в этой области породного массива структурных изменений. Математическая модель, описывающая равновесное состояние рассматриваемой механической системы, должна отображать основные явления, возникающие вследствие образования зон концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств окружающей среды.

При достижении определенного уровня нагрузок (напряжений) в окрестности выработки структурные связи в породном массиве начинают разрушаться. При этом происходит разрыхление породной среды, сопровождающееся увеличением объема [1]. Это явление связано с интенсивным микрорастрескиванием, приводящем к неуправляемому росту и слиянию трещин [2]. Края трещин расходятся, часть материала разгружается, что способствует снижению уровня