

КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Шашенко¹, А. Ковров^{2*}, Б. Ракишев³

¹Кафедра строительства, геотехники и геомеханики, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

²Кафедра экологии, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

³Кафедра открытых горных работ, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

*Ответственный автор: e-mail kovrov@rambler.ru, тел. +380672817589, факс: +380562470766

FAILURE CRITERIA FOR STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MATERIALS

O. Shashenko¹, O. Kovrov^{2*}, B. Rakishev³

¹Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

²Department of Ecology, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

³Department of Open Cast Mining, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: e-mail kovrov@rambler.ru, tel. +380672817589, fax: +380562470766

ABSTRACT

Purpose. To analyze the current research regarding rock failure criteria and justify the analytical failure criterion for structurally heterogeneous materials in three dimensional stress-strain state.

Methods. The study is based on an integrated approach with the use of analysis and synthesis of literature on the issues related to failure of the rock with heterogeneous structure, and application of analytical and empirical failure criteria to assess the strength of rocks.

Findings. The analytical failure criterion is compared with the results of testing rocks in three dimensional stress-strain state. It is proposed to assess the degree of danger of the rock media failure for any point of homogeneous rock mass in the vicinity of mine working through the safety factor n , by comparing the value of equivalent stress σ_e with tensile strength in uniaxial compression R_c . Application of structural attenuation coefficient k_c allows to pass from assessment of the rock sample strength to the evaluation of strength of the real structurally inhomogeneous rock mass.

Originality. Failure criterion for structurally heterogeneous bodies with defects in the form of joint system which allows to adequately assess stability of the rock mass is proposed.

Practical implications. Comparison of the analytical criterion with the results of laboratory testing of structurally heterogeneous materials in three dimensional stress state allows to predict rock failure in the massif with the accuracy of 94%.

Keywords: failure criteria, structurally heterogeneous material, safety factor, tensile strength in uniaxial compression, equivalent stress, coefficient of the rock mass structural attenuation

1. ВВЕДЕНИЕ

При монотонном нагружении критерий разрушения представляет собой точечное условие потери несущей способности нагруженного твердого тела. Выбор адекватного критерия разрушения горных пород является одной из ключевых проблем в геомеханике. В случае одноосного напряженного состояния критерий разрушения оценивается предельным (нормативным) значением напряжения, при котором теряется структурная целостность исследуемого тела. Это пределы прочности на одноосное сжатие, растяжение и сдвиг. В геомеханике объектом исследования, как правило, является объемное напряженно-

деформированное состояние неоднородного массива горных пород, поэтому от выбора и применения критерия разрушения зависит точность геотехнических расчетов. Приоритет дается тем критериям, которые достаточно хорошо описывают поведение как однородного, так и неоднородного породного массива находящегося в объемном напряженном состоянии.

Цель данной работы заключается в анализе существующих исследований критериев разрушения горных пород и обосновании аналитического критерия разрушения для структурно неоднородных материалов, находящихся в объемном напряженно деформированном состоянии.

2. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на некоторые несоответствия критериев разрушения данным компрессионных испытаний горных пород предпринимались попытки выведения аналитических уравнений для подгонки имеющихся лабораторных данных. Так, в статье (Sheorey, Biswas, & Choubey, 1989) показано, как пять параметров испытания на трехосное сжатие, в частности прочность на сжатие, разрыв и сдвиг, коэффициент трения и сцепление могут быть связаны между собой тремя уравнениями. Соблюдение критерия разрушения изучалось в условиях породного массива угольных пластов, горных выработок и целиков.

В статье (Jaiswal & Shrivastva, 2012) предложен новый обобщенный трехмерный критерий разрушения для горных пород, который учитывает эффект пластического расширения и позволяет описывать трехмерное состояние массива. Сравнительный анализ с критерием Хоека-Брауна показал, что наиболее значимыми параметрами для оценки разрушения неповрежденной породы являются σ_c и m_i .

Экспериментальными данными установлено, что прочность геоматериалов, таких как грунты и горные породы, в значительной степени зависит от присущей анизотропии и других факторов, таких, как слоистость, и влияние промежуточного главного напряжения, которые не всегда достаточно описываются изотропным критерием разрушения. В работе (Gao, Zhao, & Yao, 2010) представлен обобщенный критерий разрушения для геоматериалов с поперечной анизотропией для прогноза прочности глин, песков и некоторых горных пород со сложными прочностными характеристиками, обусловленными анизотропией.

Несмотря на большое количество критериев разрушения, используемых для геомеханического анализа горных пород, вопрос о наиболее оптимальном и адекватном критерии остается открытым. Так, в статье (Rahimi & Nygaard, 2015) согласно результатам прогноза разрушения пород при скважинном бурении с использованием тринадцати критериев установлено, что наиболее адекватными критериями разрушения являются модифицированный Ладе, модифицированные Виболса-Кука и Моги-Кулона. По сравнению с вышеописанными, критерии Треска, фон Мизеса и Друкера-Прагера дают завышенные значения прочности пород и, как следствие, необходимость использования больших объемов бурового раствора.

В работе (Elyasi & Goshtasbi, 2015) представлен сравнительный анализ критериев разрушения для оценки устойчивости буровых скважин на двух нефтяных месторождениях в Иране. Максимально и минимально допустимые значения давления бурового раствора для двух скважин рассчитывались в модуле Fish инженерной программы FLAC с использованием критериев Мора-Кулона, Моги-Кулона, Хоека-Брауна. Согласно полученным результатам расчетов критерий Моги-Кулона рекомендуется применять для оценки устойчивости скважин, поскольку он наиболее адекватно описывает геомеханические процессы при бурении, что хорошо согласуется с данными полевых исследований.

На параметры критерия Хоека-Брауна (σ_{ci} , m_i , s) оказывает существенное влияние прочность анизо-

тропного неповрежденного массива пород. В исследовании (Saroglou & Tsiambaos, 2008) критерий был изменен путем включения нового параметра ($K\beta$) для учета влияния прочности анизотропной породы под нагрузкой при различных положениях анизотропии в плоскости. Диапазон параметра ($K\beta$) для пород испытываемых аналитически исследовано путем проведения испытаний на трехосное сжатие с разными ориентациями слоев для метаморфических пород (гнейсы, сланцы, мрамор).

Многие типы пород имеют естественные, присущие анизотропные плоскости, такие как напластование, сланцеватость и т.д. Такие особенности строения обуславливают анизотропию прочности и деформационных свойств горных пород. Критерий разрушения Хоека-Брауна учитывает анизотропию посредством специального параметра $K\beta$. В работе (Ismael, Imam, & El-Shayeb, 2014) предложен упрощенный способ учета влияния анизотропии пород непосредственно из испытаний на одноосное сжатие вместо трехосных испытаний с целью определения параметра анизотропии K_{min} и уменьшения объемов экспериментальной работы.

В настоящее время существует ряд исследований посвященных влиянию промежуточного напряжения σ_2 на напряженно-деформированное состояние исследуемого тела, которые концептуально можно условно разделить на два направления. Работы первого направления основаны на том, что влияние на прочность материала промежуточного по величине напряжения σ_2 несущественно. Однако в работе (Aleksseev & Nedodayev, 2014) показано, что влияние σ_2 на деформационные характеристики материала существенно превышает 5 – 8%. В работе (Colmenares & Zoback, 2002) рассмотрено семь различных критериев разрушения, в сравнении их с опубликованными данными испытаний пяти различных типов горных пород в условиях объемного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) при различных стрессовых состояниях. Установлено, что модифицированные критерии Виболса и Лоде показали хорошее соответствие для большинства тестовых данных с высокой зависимостью от напряжения σ_2 (доломит, известняк). Это утверждение требует серьезного анализа, поскольку не соответствует хорошо подтвержденной гипотезе О.К. Мора. Полученные результаты порождают закономерные вопросы относительно конструкции машины (прибора) для измерения напряженно-деформированного состояния испытываемого образца и процедуры выполнения эксперимента.

Тем не менее, как указывается в работе (Colmenares & Zoback, 2002) для некоторых горных пород (песчаник, сланец) промежуточное напряжение практически не влияет на разрушение и критерий Мора-Кулона и Хоека-Брауна лучше отражают данные тестов объемного сжатия, чем другие критерии.

Характерным примером материалов с неоднородной структурой являются горные породы и бетоны. Оценка их прочности в объемном напряженном состоянии является одной из сложных проблем механики. Известно большое количество исследований в

этой области, однако все они касаются тел с относительно небольшими размерами. Переход к объектам с существенно большими размерами связан с масштабным эффектом, что само по себе представляет отдельную проблему.

3. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Подход О.К. Мора при оценке возможности разрушения структурно неоднородных материалов (горных пород и бетонов), является одной из самых надежных. Предпосылка о малом влиянии промежуточного по величине напряжения на разрушение горных пород является единственной в этой теории, которая в остальном не требует проверки, поскольку полностью основывается на экспериментальных данных. Соответствие лабораторным тестам является единственным способом проверки адекватности любым теоретическим расчетам. Однако, аналитический критерий разрушения получается путем подбора соответствующего эмпирического выражения и его применение ограничивается по существу той областью напряженных состояний, в которой выполнены эксперименты. Таким образом, экспериментальный характер получения критерия разрушения в теории Мора обеспечивает достаточно точное описание предельного состояния материала, эмпирический же подбор аналитического выражения не дает возможности в полной мере воспользоваться этим преимуществом.

Критерий разрушения, независимо от способа его получения, должен основываться на классических представлениях о физических закономерностях разрушения в локальной области твердого тела, которые могут быть представлены следующим образом. Касательные напряжения τ , величина которых характеризуется интенсивностью напряжений σ_i , разрыхляют материал путем сдвига, а под действием нормальных напряжений σ , уровень которых определяется шаровым тензором I , происходит раскрытие трещин. Совместное действие двух видов разрушения (сдвиг и отрыв) приводит к потере прочности материала. Подобная схема разрушения находится в хорошем соответствии с дислокационной и дилатонной теориями возникновения хрупкой трещины. Кроме того, она, по сути, сводится к тому же анализу огибающей предельных кругов О.К. Мора, уравнение которой в общем случае имеет вид $\tau = f(\sigma)$.

Ряд критериев разрушения был получен на основе отмеченной модели разрушения твердых тел из обобщенной функциональной зависимости (Kartashov, Matveyev, Makeyev, & Fadeyev, 1979), объединяющей в одно соотношение интенсивность напряжений и компоненты шарового тензора I :

$$\sigma_i^2 + aI^2 + bI = c, \quad (1)$$

где:

a, b, c – некоторые параметры, определяемые из испытаний при простейших напряженных состояниях (сжатие, растяжение, сдвиг):

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (2)$$

$$I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \quad (3)$$

Следуя гипотезе Мора, предположим, что прочность материала практически зависит только от тех членов выражений (2) и (3), которые определяют разность и сумму наибольшего и наименьшего компонентов напряжений. Тогда из (1) при $a = 0$ получим следующее выражение:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + b(\sigma_1 + \sigma_3) = c. \quad (4)$$

Параметры b и c определим из (4) в результате испытаний при простейших напряженных состояниях. При одноосном сжатии в предельном состоянии получим:

$$\frac{1}{2}R_c^2 + bR_c = c; \quad (5)$$

– при одноосном растяжении:

$$\frac{1}{2}R_p^2 - bR_p = c. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6), находим, что:

$$b = \frac{1}{2}R_c(\psi - 1); \quad c = \frac{1}{2}R_c^2\psi,$$

где:

$$\psi = \frac{R_p}{R_c}, \quad (7)$$

где:

R_c и R_p – пределы прочности горных пород на одноосное сжатие и растяжение соответственно;

ψ – показатель хрупкости (при $\psi = 1$ – идеально пластичный материал, при $\psi = 0$ – идеально хрупкий).

Подставив значения параметров (7) в соотношение (4), получим следующее условие предельного состояния испытуемого материала:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - R_c^2\psi - (1 - \psi)R_c(\sigma_1 + \sigma_3) = 0; \quad (8)$$

или в общем случае напряженного состояния:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 - R_c^2\psi - (1 - \psi)R_c(\sigma_x + \sigma_y) = 0. \quad (9)$$

Обозначим соответственно максимальное касательное напряжение и величину, характеризующую вид напряженного состояния, как $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ и

$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$. Тогда выражение (8) с учетом принятых обозначений примет вид:

$$4\tau^2 - 2\sigma(1 - \psi)R_c - \psi R_c^2 = 0. \quad (10)$$

Зависимость (10) в системе координат “ $\tau - \sigma$ ” представляет уравнение параболы, которая является выпуклой и непрерывной кривой (Рис. 1).

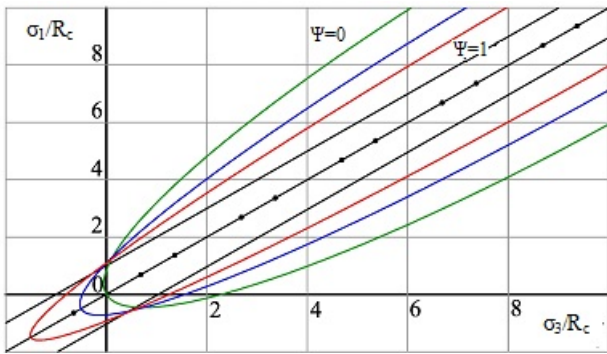


Рисунок 1. Поверхность предельных состояний по формуле (10)

В системе же координат “ $\sigma_1 - \sigma_3$ ” уравнение (8) имеет вид параболы, равнонаклоненной к осям и открытой со стороны сжимающих напряжений, что соответствует требованию симметричности условия возникновения предельного напряженного состояния.

С увеличением величины ψ от 0 до 1 парабола вытягивается в сторону всестороннего растяжения, что подтверждается опытами Г.В. Ужика (Uzhik, 1935). При $\psi = 1$ парабола вырождается в две параллельные прямые, соответствующие теории “энергии формоизменения”.

Таким образом, полученное условие прочности отвечает требованиям постулата Друккера (Drucker, 1957) и соответствует современным представлениям о природе разрушения твердых тел (Kartashov, Matveyev, Makeyev, & Fadeyev, 1979; Pisarenko & Lebedev, 1969).

Разрушение хрупких материалов достаточно хорошо описывается микродефектной теорией прочности Гриффитса. Муррель показал (Volkov, 1960), что в системе координат “ $\tau - \sigma$ ” основное уравнение теории Гриффитса может быть представлено следующим образом:

$$4\tau^2 - 2R_C\sigma - 0.25R_C^2 = 0. \quad (11)$$

Если в зависимости (10) положить, согласно Гриффитсу, $\psi = \frac{1}{8}$ и сравнить ее с зависимостью (11), то окажется, что аналитические выражения двух теорий прочности, полученных на основе разных физических представлений о природе разрушения, являются практически идентичными.

Условие прочности (8) при $\psi = 1$ было проверено Баушингером, который показал, что оно хорошо описывает процесс разрушения пластичных материалов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На Рисунке 2 и 3 показана теоретическая кривая зависимости (8) в системе безразмерных координат $\left(X = \frac{\sigma_1}{R_C}; Y = \frac{\sigma_3}{R_C} \right)$ и результаты испытаний горных

пород, полученные независимо А.Н. Ставрогиным (Volkov, 1960) и Х. Куком (Shashenko, Sdvyzhkova, & Gapeyev, 2008).

Несмотря на некоторый разброс экспериментальных точек (до 10.5%), неизбежный при испытаниях столь структурно неоднородных материалов, какими являются горные породы и бетоны, из рисунков следует, что условие прочности (8) достаточно хорошо описывает процесс их разрушения при объемном сжатии и растяжении с точностью 94%.

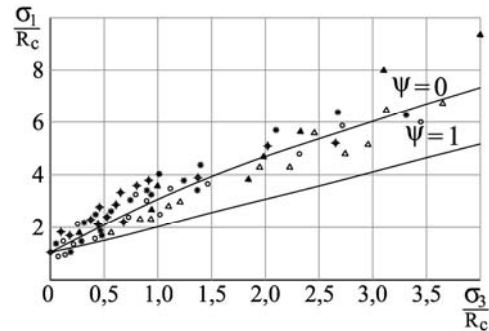


Рисунок 2. Сравнение аналитического критерия (8) с результатами испытаний горных пород и бетона: \circ – известняк; Δ – аргиллит; \blacktriangle – талькохлорит; \circ – мрамор 1; $+$ – диабаз; $*$ – диорит; \square – алевролит Д-19; песчаник Д-12; \bullet – бетон (Волков, 1960)

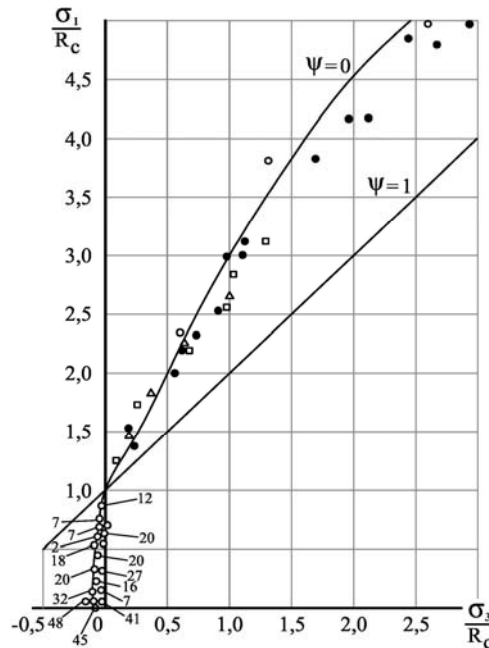


Рисунок 3. Сравнение аналитического критерия (8) с результатами испытаний горных пород (Shashenko, Sdvyzhkova, & Gapeyev, 2008)

Из выражения (8) может быть получена формула для приведения сложного напряженного состояния к простому одноосному. Она имеет следующий вид:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1 - \psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_C k_c, \quad (12)$$

где:

σ_e – так называемое напряжение, эквивалентное одноосному напряженному состоянию.

Используя формулу (12), можно посредством коэффициента запаса прочности n оценить степень опасности разрушения породной среды для любой точки однородного породного массива в окрестности выработки, сравнивая величину σ_e с пределом прочности на одноосное сжатие R_c :

$$n = \frac{R_c k_c}{\sigma_e} \quad (13)$$

В формуле (13) k_c – коэффициент структурного ослабления породного массива, позволяющий перейти от оценки прочности породного образца к оценке прочности реального структурно неоднородного породного массива, величину которого рекомендуется определять используя следующую зависимость (Shashenko, Sdvyzhkova, & Kovrov, 2015):

$$k_c = 1 - \sqrt{0.5\eta} \exp(-0.25\eta), \quad (14)$$

где:

η – коэффициент вариации прочности породного массива, определяемый по формуле:

$$\eta = \sqrt{\frac{l_t + l_0}{l_t} (\eta_0^2 + 1)} - 1, \quad (15)$$

где:

l_t – среднее расстояние между трещинами;

l_0 – характерный размер стандартного породного образца;

η_0 – коэффициент вариации результатов испытаний горных пород на одноосное сжатие.

Разрушение породной среды наступает при $n < 1$. Распределение изолиний величины n вокруг выработок является более информативным, чем распределение изолиний компонентов напряжений. По нему можно судить о степени возможного разрушения породного массива.

5. ВЫВОДЫ

1. Предложен критерий разрушения для структурно неоднородных тел с дефектами в виде систем трещин.

2. Сравнение аналитического критерия с результатами лабораторного тестирования структурно неоднородных материалов (горные породы, бетоны) в объемном напряженном состоянии показал, что они совпадают с точностью 94% и отклонение не превышает 10.5%.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках программы научно-исследовательских работ Национального горного университета, связанных с международным проектом “Устойчивость геотехнических систем: риски, процессы, явления”.

REFERENCES

- Alekseev, A.D., & Nedodayev, N.V. (1982). *Limit Conditions of Mine Rocks*. Kyiv: Naukova dumka.
- Colmenares, L.B., & Zoback, M.D. (2002). A Statistical Evaluation of Intact Rock Failure Criteria Constrained by Polyaxial Test Data for Five Different Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 695-729. [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00048-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00048-5)
- Drucker, D. (1957). About Uniqueness Solutions in the Theory of Plasticity. *Mechanics. Periodical Bulletin of International Papers Translations*, (4), 12-80.
- Elyasi, A., & Goshtasbi, K. (2015). Using Different Rock Failure Criteria in Wellbore Stability Analysis. *Geomechanics for Energy and the Environment*, (2), 15-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gete.2015.04.001>
- Gao, Z., Zhao, J., & Yao, Y. (2010). A Generalized Anisotropic Failure Criterion for Geomaterials. *International Journal of Solids and Structures*, 47(22-23), 3166-3185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.07.016>
- Ismael, M.A., Imam, H.F., & El-Shayeb, Y. (2014). A Simplified Approach to Directly Consider Intact Rock Anisotropy in Hoek-Brown Failure Criterion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 486-492. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.06.003>
- Jaiswal, A., & Shrivastva, B.K. (2012). A Generalized Three-Dimensional Failure Criterion for Rock Masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(4), 333-343. <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00333>
- Kartashov, Yu.M., Matveyev, B.V., Makeyev, G.V., & Fadeyev, A.B. (1979). *Strength and deformability of mine rocks*. Moskva: Nedra.
- Pisarenko, G.S., & Lebedev, A.L. (1969). *Resistivity of materials to deformation and failure by complex stressed conditions*. Kyiv: Naukova dumka.
- Rahimi, R., & Nygaard, R. (2015). Comparison of Rock Failure Criteria in Predicting Borehole Shear Failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (79), 29-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.08.006>
- Saroglou, H., & Tsiambaos, G. (2008). A Modified Hoek-Brown Failure Criterion for Anisotropic Intact Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2), 223-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.05.004>
- Shashenko, A.N., Sdvyzhkova, Ye.A., & Gapeyev, S.N. (2008). *Deformability and strength of rock mass*. Dnipropetrovsk: National Mining University.
- Shashenko, A.N., Sdvyzhkova, Ye.A., & Kovrov, A.S. (2015). Scale Effect in Mine Rocks. *Scientific Bulletin of the Kremenchug National University named after M. Ostrogradskyi*, 3(92), 111-116.
- Sheorey, P.R., Biswas, A.K., & Choubey, V.D. (1989). An Empirical Failure Criterion for Rocks and Jointed Rock Masses. *Engineering Geology*, 26(2), 141-159. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(89\)90003-3](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(89)90003-3)
- Uzhik, G.V. (1935). *Resistivity to Tearing And Strength of Materials*. Moskva: Publishing house of the Academy of Sciences of USSR.
- Volkov, S.D. (1960). *Statistical Theory of Strength*. Swerdlowsk: Mashgiz.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Анализ существующих исследований по критериям разрушения горных пород и обоснование аналитического критерия разрушения для структурно неоднородных материалов в объемном напряженно деформированном состоянии.

Методика. Исследования базируются на комплексном подходе с использованием анализа и обобщения литературных источников по тематике разрушения горных пород с неоднородной структурой, применении аналитических и эмпирических критериев разрушения для оценки прочности горных пород.

Результаты. Выполнено сравнение аналитического критерия разрушения с результатами испытаний горных пород в объемном напряженном состоянии. Предложено оценивать степень опасности разрушения породной среды для любой точки однородного породного массива в окрестности выработки посредством коэффициента запаса прочности n , сравнивая величину эквивалентного напряжения σ_e с пределом прочности на одноосное сжатие R_c . Применение коэффициента структурного ослабления k_c позволяет перейти от оценки прочности породного образца к оценке прочности реального структурно неоднородного породного массива.

Научная новизна. Предложен критерий разрушения для структурно неоднородных тел с дефектами в виде систем трещин, позволяющий адекватно оценивать устойчивость массива горных пород.

Практическая значимость. Сравнение аналитического критерия с результатами лабораторного тестирования структурно неоднородных материалов в объемном напряженном состоянии позволяет с точностью 94% прогнозировать разрушение горных пород в массиве.

Ключевые слова: критерии разрушения, структурно неоднородный материал, коэффициент запаса прочности, предел прочности на одноосное сжатие, эквивалентное напряжение, коэффициент структурного ослабления породного массива

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Аналіз існуючих досліджень щодо критеріїв руйнування гірських порід та обґрунтування аналітичного критерію руйнування для структурно неоднорідних матеріалів в об'ємному напружено деформованому стані.

Методика. Дослідження базуються на комплексному підході з використанням аналізу та узагальнення літературних джерел з тематики руйнування гірських порід з неоднорідною структурою, застосуванні аналітичних і емпіричних критеріїв руйнування для оцінки міцності гірських порід.

Результати. Виконано порівняння аналітичного критерію руйнування з результатами випробувань гірських порід в об'ємному напруженому стані. Запропоновано оцінювати ступінь небезпеки руйнування породного середовища для будь-якої точки однорідного породного масиву навколо виробки за допомогою коефіцієнта запаса міцності n , порівнюючи величину еквівалентного напруження σ_e з межею міцності на одновісне стискання R_c . Застосування коефіцієнта структурного ослаблення k_c дозволяє перейти від оцінки міцності породного зразка до оцінки міцності реального структурно неоднорідного породного масиву.

Наукова новизна. Запропоновано критерій руйнування для структурно неоднорідних тіл з дефектами у вигляді систем тріщин, що дозволяє адекватно оцінювати стійкість масиву гірських порід.

Практична значимість. Порівняння аналітичного критерію з результатами лабораторного тестування структурно неоднорідних матеріалів в об'ємному напруженому стані дозволяє з точністю 94% прогнозувати руйнування гірських порід в масиві.

Ключові слова: критерії руйнування, структурно неоднорідний матеріал, коефіцієнт запаса міцності, межа міцності на одновісне стискання, еквівалентне напруження, коефіцієнт структурного ослаблення породного масиву

ARTICLE INFO

Received: 18 July 2016

Accepted: 5 September 2016

Available online: 30 September

ABOUT AUTHORS

Oleksandr Shashenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/79, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine.

E-mail: shashenkoa@nmu.org.ua

Oleksandr Kovrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 10/701, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: kovrov@rambler.ru

Bajan Rakishev, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Open Cast Mining, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, 22 Satpayeva St, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan.

E-mail: b.rakishev@mail.ru