

ГЕОТЕХНІЧНА І ГІРНИЧА МЕХАНІКА, МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 622.2:004.942:62-192

С.К. Мещанинов, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.

Государственное высшее учебное заведение „Националь-
ный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: sergey.meshaninov@gmail.com

О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

S.K. Meshchaninov, Dr. Sci. (Tech.),
Senior Research Fellow

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sergey.meshaninov@gmail.com

ABOUT THE MECHANISM OF ROCKS DESTRUCTION

Описан статистико-термодинамический подход к исследованию механизма разрушения горных пород. Рассмотрена стадийность процесса разрушения горных пород и сделан вывод о чувствительности направления эволюции их структуры к начальным условиям. В основу рассмотрения положено представление о горной породе как среде, состоящей из большого числа отдельных структурных элементов. Получено уравнение эволюции дефектов типа микротрещин, которое может быть использовано для описания различных стадий разрушения горных пород.

Ключевые слова: *горные породы, дилатансия, микротрещины, эволюция, разрушение*

Введение. На сегодняшний день построение физических моделей разрушения неоднородных и трещиноватых материалов типа горных пород осуществляется, в первую очередь, на основе статистических теорий, которые позволяют описывать механизм разрушения с единых позиций, как множественный процесс накопления рассеянных повреждений.

Разрушение твердых тел, в том числе и горных пород, можно представить как процесс образования, развития и слияния трещин. При этом трещины нарушают сплошность среды, что затрудняет строгое применение аппарата статистической термодинамики для изучения процессов их образования. Дилатансии горных пород при допредельных, не приводящих к макроразрушению, режимах нагружения уделяется значительное внимание, поскольку именно на этой стадии возникает необратимое изменение многих физико-механических свойств пород, определяющих их эксплуатационные свойства как составляющего материала подземных искусственных макросистем (горные выработки и иные искусственные и естественные подземные объекты).

Постановка задачи. Горную породу можно рассматривать как среду, состоящую из совокупности большого числа отдельных структурных элементов. В начальном состоянии эти элементы скреплены между собой цементирующими прослойками и, частично, межатомными связями (в дислокациях). Полученные в [1, 2] результаты показывают перспективность использования статистической модели, так называемого

пучка нитей (стержней), которая достаточно полно в качественном и количественном плане отражает механизм разрушения горных пород отрывом в процессе контролируемых деформаций. В работах [3, 4] предложен термодинамический метод оценки степени поврежденности горных пород и энтропийный критерий разрушения. Горные породы при любом виде эксплуатации подземного сооружения испытывают сложный комплекс изменяющихся по уровню, периодичности и длительности приложения статических и динамических нагрузок. Такая многофакторная ситуация требует комплексного анализа процессов с позиций термодинамики необратимых процессов и статистической физики [1–4]. Основным преимуществом термодинамического метода является возможность изучения процессов разрушения, не вникая в их механизм на микроуровне. Очевидно, что такой подход может быть реализован лишь с использованием термодинамического метода исследований.

В связи с этим, **целью настоящей работы** является изучение механизма разрушения горных пород с использованием термодинамического метода исследований.

Основная часть. Основной особенностью породного массива является то, что в нем весьма трудно выделить ограниченный объем, для которого известны или могут быть установлены начальные и граничные условия, как этого требует аппарат механики сплошных сред, при определении реакции на нагрузки во внешними силами.

Количественной характеристикой дефектности структуры горной породы, в общем случае, является

плотность дефектов, зависящая от времени и интенсивности внешних воздействий. Каждый тип дефекта, по результатам исследований В.Е. Панина, В.А. Лихачева, Ю.В. Гриняева, представляет собой элемент процесса разрушения. Очевидно, что в такой системе дефекты (кинетические элементы) обладают способностью к рождению, уничтожению, перераспределению и переносу в пространстве.

Используем статистико-термодинамический подход, который дает возможность получить феноменологические уравнения с некоторым числом экспериментально определяемых констант для описания процесса разрушения. Для этого представим часть свободной энергии, зависящей от дефектности структуры, в форме разложения Ландау по параметру плотности микротрещин β , который является тензорной величиной, как показано в работах С.Н. Гришаева и О.Б. Наймарка. Для одноосного действия внешних сил представим свободную энергию $F(\varepsilon, \beta)$ в виде следующего разложения по степеням параметра β

$$F(\varepsilon, \beta) = F_0(\varepsilon) + a \cdot \varepsilon \cdot \beta + \frac{1}{2} b \cdot \beta^2 + \frac{1}{3} c \cdot \beta^3 + \frac{1}{4} d \cdot \beta^4, \quad (1)$$

где $F_0(\varepsilon)$ – часть свободной энергии, описывающая поведение материала в отсутствие повреждений (упругая деформация); β – плотность микротрещин; a, b, c, d – феноменологические коэффициенты, зависящие от температуры; ε – величина деформации.

В равновесном состоянии свободная энергия минимальна, т.е. должно выполняться условие

$$\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0.$$

Предполагая, что в равновесном состоянии слагаемые из (1), ответственные за фазовый переход, не участвуют в формировании структуры, можно получить уравнение, связывающее коэффициенты b и c

$$b + \frac{2}{3} c \cdot \beta_e = 0,$$

где β_e – значение плотности микротрещин β в равновесном состоянии.

И выражение для свободной энергии

$$F = F_0 + \varepsilon \cdot \beta \cdot \beta_e + \frac{1}{4} \frac{d_0}{\varepsilon^2} \beta_e^4.$$

Здесь коэффициент d_0 связан с d следующим соотношением

$$d = \frac{d_0}{\varepsilon^2}.$$

Тогда условие $\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$ приводит к соотношению

$$a \cdot \varepsilon + \frac{d_0}{\varepsilon^2} \beta_e^3 = 0. \quad (2)$$

Из требования минимальности свободной энергии $\frac{\partial^2 F}{\partial \beta^2} > 0$ вытекает условие $d > 0$, а поскольку β_e , по определению, положительная величина, то из (2) следует, что $a < 0$, т.е., вводя обозначение $A = -a$, где $A > 0$, на основании (2), получим

$$\beta_e = (A / d_0)^{1/3} \varepsilon.$$

То есть деформация пропорциональна равновесной плотности трещин.

Рассмотрим теперь возможность перехода в новое, энергетически более выгодное состояние, которому соответствует явление резкого изменения плотности микротрещин. Уравнение равновесия $\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$ в точке перехода (при достижении величиной деформации критического значения $\varepsilon_{кр}$) имеет вид

$$A \cdot \varepsilon_{кр} + b \cdot \beta + c \cdot \beta^2 + (d_0 / \varepsilon_{кр}^2) \beta^3 = 0.$$

Предполагая, что переход осуществляется из состояния со значением плотности микротрещин $\beta = \beta_e$ в состояние со значением этой плотности $\beta = \beta_\phi$, получим, с учетом уравнения связи между феноменологическими коэффициентами

$$b + \frac{2}{3} c \left(\frac{A}{d_0} \right)^{1/3} \varepsilon = 0.$$

Получим следующее соотношение

$$\beta_\phi^2 + c_0 \beta_e + 2\beta_e^2 = 0, \quad (3)$$

где $c_0 = c \cdot \varepsilon_{кр}^2 / d_0$.

Величину $\varepsilon_{кр}$ можно определить, используя условие превышения величины накопленной потенциальной энергии деформирования над количеством тепла, которое выделяется при образовании микротрещин

$$g \cdot \varepsilon_{кр}^2 = Q \cdot \beta_\phi, \quad (4)$$

где g – известный коэффициент, зависящий от упругих характеристик материала (породы), по результатам исследований Л.Ф. Ландау, Е.М. Лифшица; Q – удельная теплота плавления.

Так как для определения β_ϕ и c необходимо еще одно уравнение, воспользуемся тем, что рассматриваемый переход осуществляется в направлении уменьшения энергии, т.е. в энергетически более выгодное состояние. Величина энергии перехода ΔE соответствует выражению

$$\Delta E = Q(\beta_\phi - \beta_e),$$

где $(\beta_\phi - \beta_e)$ – соответственно, разность плотностей микротрещин в конечном и начальном состоянии, а все остальные параметры соответствуют деформации $\varepsilon = \varepsilon_{кр}$. Используя условие $\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$, соотношение (4)

можно переписать в следующем виде

$$(c_0 + 3\beta_e)(3\beta_y^2 + \beta_\phi c_0) = 12\varepsilon_{кр}^2 Q / d_0.$$

Из последнего соотношения, используя (3) и уравнение связи между феноменологическими коэффициентами, можно получить выражение для плотности микротрещин в конечном состоянии

$$\beta_\phi = \left(\frac{Q}{g}\right)^{1/2} \frac{12Q(1 + \beta_0)^2 - \nu(9 + 15\beta_0 + 7\beta_0^2)}{\nu(9 + 24\beta_0 + 19\beta_0^2 + 5\beta_0^3)},$$

где $\beta_0 = c \cdot Q / d_0 g$, $\nu = (A^4 Q^3 / d_0^4 g^3)^{1/6}$.

Общее решение данного уравнения довольно громоздко, однако, в предельном случае, при условии $Q \ll (d_0 A \cdot g^{3/2})$, что вполне справедливо для случая разрушения материала типа горной породы, для параметров c и β_ϕ можно записать следующие выражения

$$c = d_0 g / Q; \beta_\phi = 2Q(3g)^{1/2}; \varepsilon_{кр}^2 = 2\sqrt{3}Q^2 / g^{3/2}.$$

Таким образом, комбинации введенных феноменологических констант, входящих в разложение свободной энергии (1), определяются через физические параметры материала, а величину β_e можно измерить.

Изменение концентрации микротрещин во времени можно ввести в соответствие с изменением величины свободной энергии относительно изменения количества микротрещин, записав уравнение эволюции микротрещин

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \alpha \frac{\partial F}{\partial \beta}, \quad (5)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

В соответствии с последним выражением, для значений деформаций, когда величина $\frac{\partial F}{\partial \beta} < 0$, имеет место уменьшение концентрации микротрещин со временем, т.к. производная по времени от этой величины становится отрицательной.

Так как феноменологические постоянные в выражении для свободной энергии определены, то для зависимости деформации от времени $\varepsilon = \varepsilon(t)$ (5) можно проинтегрировать и найти изменение во времени концентрации микротрещин $\beta = \beta(t)$.

Выводы.

1. Полученное на примере дефектов типа микротрещин уравнение их эволюции может быть использовано для описания смены (чередования) различных стадий процесса разрушения горных пород.

2. Направление эволюции дефектной структуры горных пород чувствительно к начальным условиям, т.е. определяется как условиями деформирования и нагружения, так и начальным состоянием дефектности горной породы как твердого тела.

Список литературы / References

1. Канторова Т.А. Об одном из приложений статистической теории масштабного фактора (Задача о прочности каната) / Канторова Т.А. // Журнал технической физики. – 1993. – Р6. – С. 296–308.

Kantorova T.A. About an application of statistical theory of large-scale factor (The problem about rope durability) / Kantorova T.A. // Zhurnal tehnichekoj fiziki. – 1993. – No.6. – P. 296–308.

2. Кирничанский Г.Т. Применение статистической модели для оценки степени накопления повреждений в горных породах / Г.Т. Кирничанский, Г.Т. Рубец // Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников. – М.: МГИ, 1990. – С. 139–140.

Kirnichanskiy G.T. Application of statistical model for estimation of damage accumulation degree in rocks / G.T. Kirnichanskiy, G.T. Rubets // Teoriya i praktika proektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii visokoproizvoditelnyh podzemnyh rudnikov. – M.: MGI, 1990. – P. 139–140.

3. Шашенко О.М. Дослідження процесу обвалення покрівлі очисної виробки з використанням методу скінченних елементів і ентропійно-інтегрального критерію / О.М. Шашенко, С.К. Мещанинов, Н.В. Хозяйкина // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: 2008. – №8. – С. 28–31.

Shashenko O.M. The process of breakage heading roof collapse study by means of finite-element method and entropic and integral criterion / O.M. Shashenko, S.K. Meshaninov, N.V. Hozyaykina // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: 2008. – No.8. – P. 28–31.

4. Шашенко А.Н. Энтропийный метод контроля, управления и прогнозирования надежности функционирования очистного забоя / А.Н. Шашенко, С.К. Мещанинов // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: 2008. – №5. – С. 17–21.

Shashenko A.N. Entropic method of control and prediction of breakage heading operation safety / A.N. Shashenko, S.K. Meshaninov // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: 2008. – No.5. – P. 17–21.

Описано статистико-термодинамічний підхід до дослідження механізму руйнування гірських порід. Розглянуто стадійність процесу руйнування гірських порід і зроблено висновок про чутливість на пряму еволюції їх структури до початкових умов. В основу розгляду покладено уявлення про гірську породу як середовище, що складається з великої кількості окремих структурних елементів. Отримано рівняння еволюції дефектів типу микротріщин, яке може бути використане для опису різних стадій руйнування гірських порід.

Ключові слова: гірські породи, ділатансія, микротріщини, еволюція, руйнування

Application of statistical and thermodynamical approach for study of rocks destruction mechanism is described. The staging of process of destruction of rocks is considered and conclusion about the sensitiveness of direction of evolution of their structure to the initial conditions is drawn. The idea that rocks is an environment consisting of large number of separate structural elements was the basis of consideration. An equation of

evolution of microcrack type defects was worked out. It can be used for description of the different stages of rock destruction.

Keywords: *rocks, dilatancy, microcrack, evolution, destruction*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
О.М. Шаєнком. Дата надходження рукопису 25.04.11*

УДК 629.353:622.684

**Ю.Г. Горбачов, канд. техн. наук, доц.,
О.Д. Почужевський**

Криворізький технічний університет, м. Кривий Ріг,
Україна, e-mail: aax-forever@ya.ru

ДОПОВНЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ОЗНАК КАР'ЄРНИХ АВТОСАМОСКИДІВ ЯК ОДНОГО З ТИПІВ ГІРНИЧИХ МАШИН

**Yu.H. Horbachov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
O.D. Pochuzhevskiy**

Kryvyi Rih Technical University, Kryvyi Rih, Ukraine
e-mail: aax-forever@ya.ru

UPDATED CLASSIFICATION FEATURES OF OPEN CAST DUMP TRUCKS AS A TYPE OF MINING MACHINES

Проведено аналіз гірничотехнічних та дорожньо-транспортних умов експлуатації кар'єрних автосамоскидів на відкритих розробках країн СНД, габаритних параметрів, а також чинних нормативних та законодавчих документів щодо умов їх експлуатації, призначення та сфер застосування. На основі результатів проведених досліджень, доведено приналежність кар'єрних автосамоскидів до четвертого класу гірничих машин, а саме – транспортні машини.

Ключові слова: *кар'єрні автосамоскиди, гірничі машини, класифікація, нормативні документи*

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На сьогоднішній день, незважаючи на існуючу класифікацію, а також проведені чисельні дослідження, є суперечки щодо віднесення кар'єрних автосамоскидів до одного з типів гірничих машин. Це, у свою чергу, призводить до плутанини під час формування документації наукових статей, захисту дисертацій, розробки та затвердження законодавчих документів по обсягу сплати податків та ін.

Аналіз досліджень та публікацій. Проведений аналіз нормативних та законодавчих документів: паспорт спеціальності 05.05.06 – гірничі машини, Закон України від 05.04.2001 р. № 2344-III „Про автомобільний транспорт“, Закон України від 11.12.1991 р. №1963-ХІІ „Про податок з власників транспортних засобів та інших самохідних машин і механізмів“, ГОСТ 30537-97 „Самоскиди кар'єрні. Загальні технічні умови“, ОСТ 37.001.490-90 „Самоскиди кар'єрні. Загальні технічні умови“, Постанови КМ N 76 (76-2009-п) від 11.02.2009 „Про правила дорожнього руху“ – виявив неоднозначність у формулюванні приналежності даних транспортних засобів до того чи іншого типу вантажних чи позашляхових автомобілів, гірничих машин і т.д.

Таким чином, вирішення даного питання є достатньо актуальним для науковців, промисловців, підприємців та законодавців, діяльність яких пов'язана з кар'єрними автосамоскидами.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення та обґрунтування приналежності кар'єрних автосамоскидів до однієї з груп транспортних засобів.

Викладення матеріалу та результати. У гірничодобувній промисловості в цілому й, зокрема, на підприємствах, що здійснюють видобуток корисних копалин відкритим способом, зосереджена велика кількість різноманітної техніки, за допомогою якої ведуться видобуток і переміщення значних обсягів гірничої маси. Згідно з запропонованою В.О. Бритаревим та В.Ф. Замишляєвим (Московський державний гірничий університет) класифікацією обладнання для відкритих гірничих робіт за технологічною ознакою, можна виділити наступні сім класів: машини для підготовки гірничих порід до вилучення; виймально-навантажувальні машини; виймально-транспортні машини; транспортні машини; отвалоутворюючі машини; сортувально-збагачувальне устаткування; машини для допоміжних робіт.

Машини кожного класу діляться на групи, у кожній з яких розрізняють типи машин, що відрізняються не за характером виконуваної роботи, а тільки за загальною конструкцією вузлів чи машини в цілому. При цьому кожний тип може мати кілька типорозмірів, в яких машини співпадають за конструкцією але, у той же час, відрізняються за експлуатаційними властивостями.

На території України кар'єрні автосамоскиди експлуатуються на двох сотнях промислових підприємств, де працює близько 2,8 тисяч даних машин, переважна більшість з яких виробництва ВАТ “БелАЗ”.