

Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования схемы расчета разрушения горных пород шпуровым способом

Першин Г. Д.¹, Пшеничная Е. Г.^{1*}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

*e-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

Реферат

Введение. Шпуровой способ добычи и подготовки горных пород к выемке применялся человеком с древних времен, однако общепринятых и общепризнанных проектно-расчетных методов данного процесса до настоящего времени не существует, что было установлено в обзорной части данной работы.

Целью работы является разработка базовой расчетной модели разрушения квазихрупких материалов крепких горных пород шпуровым способом с помощью статических распорных средств.

Методология. Методическую основу разработанной квазистатической модели расчета энергосиловых показателей процесса разделения объемов (кусков) горной породы на отдельные части составляет детальное рассмотрение механизма разрушения через переходное состояние от сплошности материала породы к его разделению, что дает возможность обосновать и определить: необратимо затраченную удельную работу разрыва через энергетическую константу материала горной породы во взаимосвязи с энергетическим КПД процесса; критическую нагрузку, приводящую к локальному разрушению; величину зародышевых трещин разрыва и их количество, а также количество сквозных трещин.

Результат. Полученные показатели и параметры составили основное содержание уравнения энергетического баланса необратимо затраченной работы разрыва объемов горной породы. Разработанная методология постановки и решения задачи предельного состояния разрыва квазихрупких материалов в виде толстостенного цилиндра (задача Ляме), моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным шпуровым давлением распорных средств, является универсальной и может служить в качестве базовой для оценки комплекса вопросов, связанных с горным производством. Полученная взаимосвязь показателей позволила составить уравнение энергетического баланса разрыва объемов горной породы с решением которого впервые были получены: критическое значение шпурового давления, приводящего к локальному разрушению; величина зародышевых трещин и соответствующее им предельное разрывающее давление.

Теоретическая новизна. В рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе разработанной методологии впервые корректно поставлена и решена энергетическим способом задача о предельном состоянии горной породы в виде естественной отдельности, нагруженной распорным статическим средством через одиночный шпур. В результате проведенных исследований получена аналитическая зависимость энергоемкости статического разрушения горных пород, которая включает как объемную удельную энергию потенциальной деформации, так и удельную поверхностную энергию.

Ключевые слова: задача Ляме; разрушение горных пород; шпуровой способ; квазихрупкое разрушение; модель разрушения; трещина; шпуровое давление; предельное разрывающее давление; энергоемкость разрушения.

Введение. Теории прочности и разрушения материалов это фундаментальные научные направления, цели и задачи которых по изучению физико-механического состояния горных пород противоположны. В первом случае на практике работоспособность и устойчивость сплошного твердого тела оценивают через известные феноменологические гипотезы прочности, что дает возможность осуществлять техническую диагностику неразрушения материалов в конструкциях и сооружениях при экстремальных условиях эксплуатации [1]. Во втором случае рассматриваются технико-технологические условия (производительность, энергоемкость) эффективного разрушения материала твердого тела, т. е. его диспергирования [2].

Теории прочности и разрушения материалов твердого тела исследуют его различное состояние: сплошное (С) или разрушенное (Р). При этом переход материала из С-состояния в Р-состояние осуществляется, если характер напряженно деформированного состояния (НДС) достигает некоторого критического значения для данного материала [3]. Если характер НДС не достигает своих предельных значений, например предела прочности на разрыв, то разрушения не произойдет и твердое тело сохраняет целостность. В рамках такого классического подхода не раскрывается механизм процесса разрушения, для квазихрупкого разрушения при статическом нагружении материалов не представляется возможным корректно решать и объяснять многие физические противоречия между существующей теорией и экспериментом.

Концепции квазихрупкого разрушения упруго-хрупких материалов, обладающих и свойством пластичности, когда твердое тело по всему сечению не разрушается мгновенно, присуще промежуточное П-состояние перехода деформируемого материала из С-состояния в Р-состояние. Область деформируемого материала, где возникает П-состояние, получила название области предразрушения [4], в которой материал всегда деформируется за пределом упругости. В связи с этим в этой области наиболее интенсивно совершается локальное упруго-пластическое разрушение, т. е. С→П→Р переход.

Таким образом, корректное решение любой поставленной задачи горного производства в квазихрупкой постановке состоит в том, чтобы построить необходимую расчетную модель согласно С→П→Р переходам и найти ответы на все актуальные вопросы практики, связанные с рационализацией технико-технологических показателей процесса разрушения горных пород.

Цель работы заключается в получении основополагающего решения задачи в квазихрупкой постановке о предельном равновесии полого цилиндра (задача Ляме), моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным внутренним давлением распорных средств, что на практике соответствует разрушению куска горной породы с помощью одиночного шура.

Обзор существующих методик. Шпуровой способ добычи и разделки горных пород (природного камня) применялся человечеством с давних времен [5, 6], однако общепринятых и общепризнанных проектно-расчетных методов данного процесса до настоящего времени не существует. Первая попытка создать расчетную схему процесса разрушения горных пород в квазистатической форме по принципу перехода из С-состояния в Р-состояние опубликована в работе [7], в которой также проанализированы существующие на период публикации методы расчета энергосиловых показателей процесса во взаимосвязи с его технологическими показателями. Целесообразно рассмотреть эволюцию этих классических подходов в системе С→П→Р-состояний.

Очевидно, первой аналитической зависимостью, связывающей силовые условия разрыва с физико-механическими показателями породы и технологическими параметрами процесса, является уравнение [8]:

$$\frac{p}{\sigma_p} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{H}{h_{\text{ш}}} (n - 1), \quad (1)$$

где p и σ_p – внутреннее давление распорных средств и предел прочности горных пород на разрыв, Па; H и $h_{\text{ш}}$ – высота куска породы и шпура, м; $n = R/r_{\text{ш}}$ – размерный параметр в относительной форме, R – радиус окружности, описывающей поперечный размер куска, м, $r_{\text{ш}}$ – радиус шпура, м.

При заданных значениях σ_p , H и $h_{\text{ш}}$ имеем линейную связь между внутренним давлением p и относительным размером разрываемого куска n .

Зависимость (1) относится к С-состоянию и не имеет практической значимости, так как не отвечает на вопрос о степени диспергирования (т. е. на сколько отдельных частей разрывается исходный кусок), а также не имеет корректного физического обоснования.

Последний недостаток в какой-то мере устраняется в последующих работах, где на основе второй теории прочности с привлечением задачи Ляме была получена следующая технологическая взаимосвязь:

$$\frac{p}{\sigma_p} = \frac{n^2}{2(1 + \mu)}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Как видим, уравнение (2) относится также к С-состоянию, но имеет степенную зависимость внутреннего давления относительно поперечного размера разрываемого куска горной породы со всеми присущими недостатками в рассмотренном случае.

Бесперспективность классического подхода исследователей к оценке разрушения упруго-хрупких материалов, к которым относятся горные породы, заключается в том, что условия прочности для сплошных тел могут быть использованы в технологических расчетах лишь на первой стадии разрушения, а именно на стадии зарождения микротрещин в куске (образце) породы. Основная идея неклассических подходов современной механики разрушения квазихрупких материалов сводится к положению, согласно которому за процессом зарождения трещин разрыва следует стадия их роста до критических размеров, что и определяет промежуточное П-состояние, связывающее в общей расчетной модели С-состояния с Р-состоянием. Именно через зону предразрушения, т. е. через П-состояние раскрывается сам механизм разрушения.

Корректно решить поставленную задачу в системе С→П→Р-состояний представляется возможным только в рамках *энергетического подхода*. Целесообразно проанализировать результаты энергетической методики расчета технологических параметров, предложенной в работе [9], в которой в соответствии с энергетическим принципом Гриффитса полагается, что в результате образования и роста трещин на стенке шпура вся энергия распорного средства расходуется на образование свободной поверхности разрыва. Из составленного в работе [9] энергетического баланса получено:

$$p = \left[2(n-1) \frac{\gamma E_{\text{НРС}}}{r_{\text{ш}}} \right]^{0,5},$$

где γ – удельная поверхностная энергия разрушения материала породы, Дж/м²; $E_{\text{НРС}}$ – модуль упругости невзрывчатого разрушающего средства (НРС), Па.

При этом в расчетах давление p , при котором возникают и развиваются трещины разрыва, приравнивается пределу прочности на разрыв материала породы $P_{\text{пр}} = \sigma_p$, и таким образом определяется показатель n . Несмотря на энергетическую сущность рассмотренной методики, некорректность ее формулировки проявляется в том, что вся энергия НРС относится к этапу развития трещин, т. е. к Р-состоянию. В этом случае в расчетах игнорируются С-состояние и П-состояние.

Разработка авторской модели квазистатического разрушения. После проведенного краткого обзора существующих методик расчета силовых факторов, необходимых для разрушения отдельных объемов (крупных кусков) горной породы одиночным шпуром, вернемся к работе [7] с целью оценки ее результатов и недостатков. Научной новизной является сформулированное положение: в условиях квазихрупкого разрушения при статическом разрыве объемов горной породы шпуровым способом работа разрывающей силы на перемещениях, обусловленных максимальной деформацией растяжения и деформацией раскрытия трещины нормального разрыва, равна потенциальной энергии вновь образованной поверхности. Вновь образованная поверхность определяется количеством радиальных трещин разрыва, характеризующих степень разделения исходного объема породы на отдельные не связанные между собой части. Количество трещин входит в качестве одного из аргументов в энергетический баланс, на основе которого решается поставленная задача. Поэтому результаты анализируемой работы дополнены исследованиями [10], согласно которым количество трещин определяется по формуле:

$$n_{\text{тр}} = \pi f^2 \frac{(n+1)}{(n-1)}, \quad (3)$$

где f – безразмерная функция, зависящая от физико-механических свойств материала породы.

Величина функции f оценивается на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях. Основным итогом исследований является вывод о зависимости количества сквозных трещин от соотношения размеров кольцевой зоны, ограниченной с внешней стороны поперечным размером куска породы, а с внутренней – диаметром шпура. Иными словами количество трещин $n_{\text{тр}}$ зависит от параметра n , функциональный предел которого с его увеличением приводит к единице, и тогда $n_{\text{тр}} = \pi f^2$. Для примера приведем экспериментальные данные [10], полученные на мраморном образце (среднезернистое строение) в виде керна диаметром 40 мм с просверленным по центру отверстием диаметром 8 мм на глубину 60 мм. Разрывающая нагрузка создавалась усилием от НРС, что привело к разделению образца на четыре части. По условиям эксперимента $n = 5$, было получено $f = \sqrt{8/3\pi}$, что определяет $n_{\text{тр}} = \pi f^2 \approx 3$.

Методическую основу расчетной модели квазистатического разрушения упруго-хрупких материалов составляет рассмотрение явления образования и развития трещины, чему способствует полный анализ системы С→П→Р-состояний

при нагружении твердого тела. При этом П-состояние как промежуточное определяет область материала, где деформирование всегда происходит за пределом упругости и поэтому в этой области наиболее интенсивно проявляется и совершается локальное упруго-пластическое разрушения материала. В работе [11] по системе С→П→Р-состояний корректно рассмотрена задача предельного равновесия растягиваемой пластины с внутренней трещиной l_0 (пластина Гриффитса). Детальный анализ П-состояния в данной задаче позволил обосновать энергосиловые показатели и характеристики зоны предразрушения, а именно:

– характерный размер области П-состояний в виде равенства длины внутренней трещины длине зародышевой трещины разрыва $\Delta l_{\text{тр.з}} = l_0$, что позволило замкнуть расчетную модель в виде энергетического баланса процесса разрушения;

– предельную (критическую) нагрузку p_k , Па, по достижении которой наступает локальный разрыв на стенке шпура:

$$p_k = \left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\gamma E}{r_{\text{ш}}} \right]^{0,5}; \quad (4)$$

– удельную энергию, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности разрыва критической величины:

$$\gamma_k = k_k^2 \frac{\sigma_p^2}{2E}; \quad (5)$$

– взаимосвязь энергетических показателей зон γ_k и γ_p развития критических (зародышевых) и сквозных трещин нормального разрыва:

$$\gamma_k / \gamma_p = e_\gamma, \quad (6)$$

где E – модуль упругости материала породы, Па; k_k – текстурно-структурная константа материала породы, $\text{м}^{0,5}$; e_γ – энергетический коэффициент полезного действия (КПД) процесса разрыва материала горной породы:

$$e_\gamma = \frac{2}{(n^2 - 2)}. \quad (7)$$

Энергетический КПД является неотъемлемым условием оценки величины критерия γ_p квазихрупких материалов в различных технологических процессах горного производства. Предельное значение КПД разрыва, равное единице ($e_\gamma = 1$) характерно только для области предразрушения при $n = 2$, т. е. для зоны развития зародышевой трещины до критической величины $\Delta l_{\text{тр.з}} = r_{\text{ш}}$.

Энергетические критерии квазихрупких материалов, полученные в форме (4)–(7), являются основополагающими показателями так называемой *линейной механики хрупкого разрушения горных пород* и вскрывают причину много лет наблюдаемого расхождения теории и практики, когда необратимо затраченная энергия, приходящаяся на единицу площади свободной поверхности, определенная на основе экспериментов, оказывалась в разы, и даже на порядки больше теоретически вычисленных значений, соответствующих идеально хрупкому отрыву. Особенно существенно это отличие проявлялось для материалов, обладающих некоторой степенью пластичности [12]. В связи с отмеченным, исследователи

вводят понятие истинной γ_p и эффективной γ_k удельной поверхностной энергии твердого тела [13].

Такое состояние делало бессмысленным использование теоретической величины поверхностной энергии γ_k в практических расчетах и явилось одной из причин разработки новой концепции квазихрупкого разрушения твердых тел – *деформационного критерия раскрытия берегов трещины*. Деформационный критерий δ_k несложно определялся с помощью измерительной техники (датчиков) для образцов различных размеров и форм (как центральной, так и краевой трещин). В этом направлении прошлого столетия сформировалась научная школа на базе Физико-механического института Академии наук Украинской ССР под руководством академиков АН УССР Г. Н. Савина и В. В. Панасюка [14].

Предложенная в работе [11] методология и входящие в нее энергосиловые критерии (4)–(7) позволяют с учетом результатов исследований [7] составить уравнение энергетического баланса для расчета всех интересующих практику параметров и показателей статического разрушения объемов (крупноблочных кусков) горной породы одиночным шпуром с применением различных распорных средств:

$$\chi \frac{(1+\mu)}{E} (p_p^2 - p_k^2) = \frac{n_{тр} l_{тр}}{\pi r_{ш}^2} \gamma_p, \quad (8)$$

где $\chi = \frac{(3n^2 + 1)}{3(n^2 - 1)}$ – показатель энергонасыщенности потенциальной энергией

упругих деформаций материала; p_p – внутреннее давление, разрывающее кусок породы, Па; $l_{тр} = r_{ш} (n - 1)$ – количество и длина радиальной сквозной трещины, м.

Определение по уравнению (8) разрывающего кусок породы внутреннего давления p_p в зависимости от параметра n возможно если известно количество трещин, возникающих и получивших дальнейшее развитие до предельной длины, когда кусок породы распадается на отдельные части. Результат (3), рассмотренный в обзорной части работы, является первым приближением ответа на поставленный вопрос. Аналитического общепринятого решения данной задачи до сих пор не существует. Расчет построим на основе уравнения (8) по двухступенчатой схеме, когда вначале находим количество зародышевых трещин $n_{тр.з}$, а затем обосновываем количество сквозных трещин $n_{тр.с}$.

Для определения количества зародышевых трещин принимаем условия П-состояния, т. е. состояния предразрушения, которому отвечают следующие параметры:

$$n = 2; \quad e_\gamma = 1; \quad p_p^2 / p_k^2 = 2; \quad \chi = \sqrt{2}; \quad l_{тр.з} = r_{ш}. \quad (9)$$

С учетом (9) энергетический баланс примет следующий вид:

$$\sqrt{2} \frac{(1+\mu)}{E} p_k^2 = n_{тр.з} \frac{\gamma_k}{\pi r_{ш}}.$$

Откуда с учетом (4) и (6) получим:

$$n_{тр.з} = 2\sqrt{2}(1+\mu). \quad (10)$$

Как показывают экспериментальные исследования, число сквозных трещин $n_{тр.с}$ отличается от зародышевых $n_{тр.з}$, их количество зависит от линейных размеров испытуемого образца, а именно от параметра n . Отмеченная особенность подтверждается и аналитическими исследованиями, из которых следует:

$$n_{тр.с} = n_{тр.з} \frac{\chi}{\sqrt{2}} = 2\chi(1 + \mu). \tag{11}$$

Коэффициент Пуассона для горных пород находится в пределах $\mu = 0,05–0,5$ [15, 16], при этом с повышением крепости данный коэффициент понижается. Как следует из зависимости (10), если $\mu > 0,25$, то прогнозируемое количество зародышевых трещин разрыва стремится к $n_{тр.з} \rightarrow 4$, а если $\mu < 0,25$, то количество зародышевых трещин $n_{тр.з} \rightarrow 3$. Количество сквозных трещин, являясь функцией показателя χ , который с увеличением значения n стремится к единице, снижается по сравнению с $n_{тр.з}$ и составляет величину $n_{тр.с} = n_{тр.з} / \sqrt{2} = 2(1 + \mu)$.

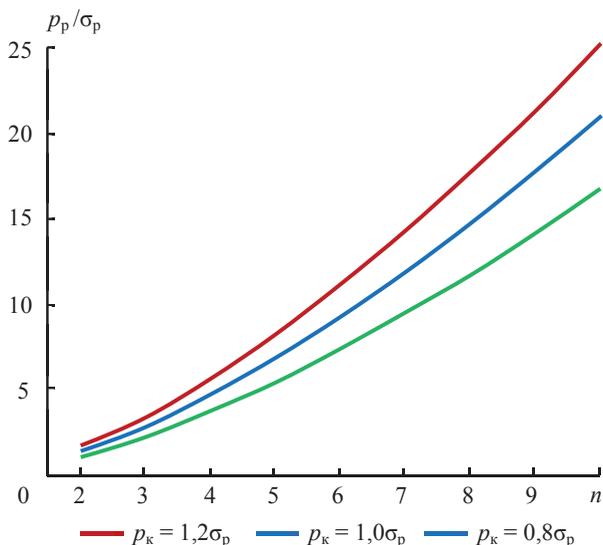


Рисунок 1. График зависимости предельного шпурового давления p_p / σ_p в относительной форме от параметра n для различных значений критической нагрузки p_k

Figure 1. The dependency graph of the limiting blast-hole pressure p_p / σ_p in the relative form on the parameter n for different values of critical load p_k

Таким образом, окончательная расчетная модель Р-состояния задачи Ляме в квазихрупкой постановке (8) будет иметь следующий вид:

$$(p_p^2 - p_k^2) = \frac{(n-1)(n^2-2)}{2\pi} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2,$$

или

$$p_p^2 / p_k^2 = \left[\frac{(n-1)(n^2-2)}{2} \right] + 1, \quad \text{где } p_k^2 = \frac{1}{\pi} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2. \tag{12}$$

Зависимость (12) в графическом виде представлена на рис. 1.

Результаты и обсуждение. Из полученных силовых зависимостей (12) следует, что предельное разрывающее воздействие создается внутренним статическим давлением p_p на стенки шпура, величина которого пропорциональна критическому давлению p_k , вызывающему локальный разрыв внутренней поверхности шпура и появление трех или четырех зародышевых трещин в зависимости от величины коэффициента Пуассона μ материала горной породы. На разрывающее кусок породы давление p_p также влияет параметр n , характеризующий поперечный к оси шпура размер куска по отношению к радиусу шпура $r_{ш}$.

В рамках поставленной цели и решаемых задач целесообразно сравнить величины критических давлений p_k , полученных по С-состоянию в начальных работах и П-состоянию (12). В первом случае давление p_k предложено оценивать по зависимости $p_k^C = (2/\pi)\chi\sigma_p$ для предельных значений показателя $\chi = (\sqrt{2} - 1, 0)$, соответствующего значениям $n = 2$ и $n > 5$, что в итоге определило $p_k^C = (0,44 - 0,64)\sigma_p$, как условие сохранения сплошности внутренней поверхности шпура, на которой возникают напряжения разрыва σ_p . Второй вариант расчета p_k предусматривает локальный разрыв стенки шпура до величины трещины, равной $\Delta l_{тр.з} = r_{ш}$. В этом случае критическое давление $p_k^П$ при заданной величине σ_p будет зависеть от соотношения $k_k / (\pi r_{ш})^{0,5}$, при этом если принять $k_k = 0,2 - 0,3(\sqrt{m})$, а $r_{ш} = 0,2$ м, то получим $p_k^П = (0,8 - 1,2)\sigma_p$, при $k_k = 0,09 - 0,15(\sqrt{m})$ будем иметь $p_k^П = (0,36 - 0,6)\sigma_p$. Приведенный численный пример показывает, что квазистатический подход в нахождении величины $p_k^П$ отражает чувствительность зарождения трещин разрыва от свойств материала горной породы k_k и технологического параметра $r_{ш}$, а не размера n в относительной форме разрушаемого куска породы.

Удельную работу статического разрывающего воздействия на горную породу от одиночного шпура с помощью распорных средств типа НРС определим как сумму работы, затраченной на зарождение трещин на стенке шпура до критической величины; работы, необходимой на развитие сквозных трещин, разделяющих кусок породы на части. В этом случае удельная работа выражает суммарную работу A , отнесенную к объему $V_{ш}$ шпура: $\alpha_{НРС} = A/V_{ш}$. С учетом зависимости (12) критического давления p_k и величины удельной поверхностной энергии γ_p материала породы [8], удельная работа НРС запишется следующим образом:

$$\alpha_{НРС} = \chi \frac{(1 + \mu)}{E} p_k^2 + \frac{n_{тр} l_{тр}}{\pi r_{ш}^2} \gamma_p. \quad (13)$$

Подстановка в (13) значений p_k^2 и γ_p , а также $n_{тр}$ согласно (11) дает:

$$\alpha_{НРС} = \frac{1}{\pi} \chi \frac{(1 + \mu)}{E} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2 \left[1 + \frac{(n - 1)(n^2 - 2)}{2} \right] = \frac{\chi(1 + \mu)}{E} p_p^2. \quad (14)$$

Так как выражение $\alpha_{\sigma} = \left[\frac{\chi(1 + \mu)}{E} \right] \sigma_p^2$ представляет потенциальную энергию деформации чистого сдвига и в работе [7] принято в качестве энергетической характеристики процесса трещинообразования материала породы, то научный и практический интерес представляет отношение суммарной энергии разру-

нения (14) к ее составляющей, определяющей статическую трещиностойкость хрупких тел:

$$\frac{\alpha_{\text{НРС}}}{\alpha_{\sigma}} = \frac{P_p^2}{\sigma_p^2}. \quad (15)$$

Анализируя энергетическую взаимосвязь в (15), отметим, что удельная энергия α_p характеризует предельное С-состояние деформируемого материала горной породы, а $\alpha_{\text{НРС}}$ – удельную работу разрушения ее отдельного объема, т. е. П-состояние с переходом в Р-состояние.

Полученные результаты в виде зависимостей (12) и (14) имеют значимое прикладное применение, так как являются неотъемлемой частью общих аналитических исследований расчета разрыва в квазихрупкой постановке кусков горной породы одиночным шпуром и отделения монолитов от горного массива посредством строчки шпуров.

Выводы. Рассмотрена проблема использования в проектных технико-технологических расчетах известной энергетической константы материала горной породы γ как удельной поверхностной энергии, затраченной на образование единицы новой поверхности разрыва, согласно чему данная удельная энергия определяет только этап зарождения трещин разрыва в квазихрупких материалах, а этап развития сквозных трещин нормального разрыва отдельных объемов горной породы характеризует удельная энергия γ_p , связанная с γ_k энергетическим коэффициентом полезного действия (КПД) процесса разрыва уравнением $\gamma_p = \gamma_k / e_{\gamma}$, при этом величина энергетического КПД изменяется от единицы для этапа предразрушения до значений гораздо меньших единицы согласно обратно пропорциональной зависимости от длины трещины.

В рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе сформулированной методологии энергетическим способом впервые корректно поставлена и решена задача о предельном состоянии отдельного объема горной породы, нагруженного распорным средством через одиночный шпур. Особенностью разработанной модели расчета энергосиловых показателей процесса и степени диспергирования куска породы является детальное рассмотрение механизма разрушения через переходное П-состояние (область предразрушения) от сплошности (С-состояние) материала породы к его разделению на отдельные части (Р-состояние). При таком подходе раскрывается сам процесс разрушения с возможностью определения: критической нагрузки, приводящей к локальному разрушению; величин зародышевых трещин и их количества, а также количества сквозных трещин. Замкнутость и самодостаточность (условие автомодельности) расчетной модели обеспечиваются путем последовательного рассмотрения перехода С→П→Р-состояний.

Разработанная методология постановки и решения задачи предельного состояния разрыва квазихрупких материалов в виде модели толстостенного цилиндра (задача Ляме) является универсальной и может служить в качестве базовой для оценки комплекса вопросов, связанных с горным производством [17–23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики разрушения горных пород М.: Недра, 1984. 359 с.
3. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 660 с.
4. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1991. 410 с.

5. Алимов О. Д., Мамасаидов М. Т. Технические средства отделения блоков камня от массива. Фрунзе: Илим, 1987. 216 с.
6. Карасев Ю. Г. Технология горных работ на карьерах облицовочного камня. М.: Недра, 1995. 198 с.
7. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Основы расчета технологических параметров добычи природного камня с применением НРС // Добыча обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. 2001. Вып. 1. С. 77–94.
8. Карасев Ю. Г., Бакка Н. Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня. СПб: Петербургский горный институт, 1997. 428 с.
9. Христоробов В. Д., Скоробогатова Л. М. Невзрывчатые способы разрушения горных пород. М: МГГУ, 1991. 105 с.
10. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г., Северин Е. В. Обобщение задачи Гриффитса на объемное разрушение упругохрупкого тела // Добыча обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. 2004. Вып. 4. С. 61–70.
11. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Концепция квазихрупкого разрушения горных пород применительно к процессам их добычи и первичной переработки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 4. С. 64–75.
12. Каркашадзе Г. Г. Механические разрушение горных пород. М.: МГГУ, 2004. 220 с.
13. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука; 1974. 640 с.
14. Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов / ред. Панасюк В. В. Киев: Наукова думка, 1981. 314 с.
15. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Мельников Н. В. [и др.]. М.: Недра, 1975. 277 с.
16. Гудман Р. Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
17. Lin P., Wong Robina H. C., Tang C. A. Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes // International journal of rock mechanics and mining sciences. 2015. Vol. 77. P. 14–28.
18. Healu D., Jones R. R., Holdsworth R. E. New insights into the development of brittle shear fractures from a 3D numerical model of microcrack interaction // Earth and Planetary Science Letters. 2006. Vol. 249. Issue 1-2. P. 14–28.
19. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. No. 163. P. 311–319. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.067
20. Jiajun W., Deyong Z., Renqing H. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock // Procedia Engineering. 2014. No. 73. P. 258–263.
21. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe-Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: Scientific conference on «Bien Dong 2000». Nhatrang; 2000.
22. Sharma R. (ed). Deep Sea Mining. Springer; 2017. 535 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
23. Нго Чан Тхиен Кюи, Кириченко Ю. В. Минеральный потенциал подводных месторождений в Южно-Китайском море Вьетнама // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 140–143. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>

Поступила в редакцию 9 декабря 2022 года

Сведения об авторах:

Першин Геннадий Дальтонович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: pshenivla@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3163-018X>
Пшеничная Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54

Solving the Lamé problem in the quasi-brittle setting to substantiate the solution scheme for rock breaking by the blast-hole method

Gennadii D. Pershin¹, Elena G. Pshenichnaia¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Introduction. The blast-hole method of mining and preparing rocks for excavation has been used by mankind since ancient times. However, there are no generally accepted and generally recognized design and calculation methods for this process, which was established in the review part of this work.

Research objective is to develop a basic analytical model for hard rock quasi-brittle materials breaking by a blast-hole method using static thrusts.

Methods of research. A detailed analysis of the breaking mechanism through the transition state from the rock material continuity to its separation is the methodological basis of the developed quasi-static model for calculating the energy-power indicators of the process of separating volumes (pieces) of rock into separate parts. It makes it possible to justify and determine: the irreversible energy of rupture through the energy constant rock material in relation to the process energy efficiency, critical load resulting in local breaking, the size and number of the primordial tension cracks, as well as the number of through cracks.

Result. The obtained indicators and parameters formed the body of the energy balance equation of the irreversible energy of rupture of rock pieces. The developed methodology for setting and solving the problem of the limiting state of quasi-brittle materials rupture in the form of a thick-walled cylinder (the Lamé problem) that simulates a certain solid volume deformed by a uniformly distributed blast-hole pressure of thrusts, is universal and can serve as a base for assessing a set of issues related to mining. The resulting interrelation of indicators made it possible to derive an equation for the energy balance of the rock volumes rupture. Due to the solution for this equation, the critical value of the blast-hole pressure that results in local breaking, the size of primordial cracks, and the corresponding limiting burst pressure were obtained for the first time.

Theoretical novelty. Within the framework of the general approach of the quasi-brittle materials breaking linear theory, based on the developed methodology, the problem of the limiting state of the rock in the form of natural joint loaded with a static thrust through a single blast-hole, was correctly stated and solved by the energy method for the first time. As a result of the research, an analytical dependence of the rock static breaking energy intensity was obtained, which includes both the volumetric specific energy of potential deformation and the specific surface energy.

Keywords: Lamé problem; rock breaking; blast-hole method; quasi-brittle breaking; crack model; crack; blast-hole pressure; limiting burst pressure; energy-intensity of breaking.

REFERENCES

1. Kartashov Iu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Rock strength and deformability*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
2. Rzhetskii V. V., Novik G. Ia. *The fundamentals of rock breaking physics*. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)
3. Latyshev O. G. *Rock breaking*. Moscow: Teplotekhnika Publishing; 2007. (In Russ.)
4. Panasiuk V. V. *The mechanics of quasi-brittle breaking of materials*. Kyiv: Naukova dumka; 1991. (In Russ.)
5. Alimov O. D., Mamasaidov M. T. *Technical means of separating stone blocks from the rock mass*. Frunze: Ilim Publishing; 1987. (In Russ.)
6. Karasev Iu. G. *The technology of mining at facing stone quarries*. Moscow: Nedra Publishing; 1995. (In Russ.)
7. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. The fundamentals of calculating the process flow parameters of natural stone mining with the use of nonexplosive breaking. In: Pershin G. D. (ed.) *Quarrying, dressing, and using the natural stone: proceedings*. 2001; 1: 77–94. (In Russ.)
8. Karasev Iu. G., Bakka N. T. *Natural stone. Block and wall stone quarrying*. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University Publishing; 1997. (In Russ.)
9. Khristoliubov V. D., Skorobogatova L. M. *Nonexplosive rock breaking*. Moscow: MSMU Publishing; 1991. (In Russ.)
10. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G., Severin E. V. The Griffith problem generalization for the volume fracture of the elastobrittle body. In: Pershin G. D. (ed.) *Quarrying, dressing, and using the natural stone: proceedings*. 2001; 4: 61–70. (In Russ.)
11. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. The concept of quasi-brittle rock fracture as applied to extraction and processing operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 4: 64–75. (In Russ.)
12. Karkashadze G. G. *Mechanical breaking of rock*. Moscow: MSMU Publishing; 2004. (In Russ.)
13. Cherepanov G. P. *Mechanics of brittle breaking*. Moscow: Nauka Publishing; 1974. (In Russ.)
14. Panasiuk V. V. (ed.) *Methods and means of assessing crack resistance of construction materials*. Kyiv: Naukova dumka; 1981. (In Russ.)
15. Melnikov N. V. et al. *Guide (cadaster) of rock physical properties*. Moscow: Nedra Publishing; 1975. (In Russ.)
16. Gudman R. *Rock mechanics*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 1987. (In Russ.)

17. Lin P., Wong Robina H. C., Tang C. A. Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2015; 77: 14–28.

18. Healu D., Jones R. R., Holdsworth R. E. New insights into the development of brittle shear fractures from a 3D numerical model of microcrack interaction. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006; 249 (1-2): 14–28.

19. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018; 163: 311–319. Available from: doi: 10.1016/j.petrol.2017.12.067

20. Jiajun W., Deyong Z., Renqing H. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock. *Procedia Engineering*. 2014; 73: 258–263.

21. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe-Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: *Scientific conference on "Bien Dong 2000"*. Nhatrang; 2000.

22. Sharma R. (ed). *Deep Sea Mining*. Springer; 2017. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>

23. Ngo Chan Thien Quy, Kirichenko Iu. V. Mineral potential of subsea deposits in Vietnamese part of South China sea. *Gornaya promyshlennost = Mining Industry Journal*. 2020; 1: 140–143. (In Russ.) Available from: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>

Received 9 December 2022

Information about the authors:

Gennadii D. Pershin – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Transport-Technological Complexes, Novosibirsk State Technical University. E-mail: pshenivla@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3163-018X>

Elena G. Pshenichnaia – PhD (Engineering), senior lecturer, Department of Mechanics, Novosibirsk State Technical University. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

Для цитирования: Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования схемы расчета разрушения горных пород шпуровым способом // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 43–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54

For citation: Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. Solving the Lamé problem in the quasi-brittle setting to substantiate the solution scheme for rock breaking by the blast-hole method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 43–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54