

УДК 622.243.2

проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Технологии добычи сырьевых ресурсов и освоения подземного пространства основаны на механическом разрушении горных пород режуще-скалывающим инструментом. Однако определение параметров разрушения этим инструментом до сих пор производят с помощью эмпирических соотношений, поскольку нет замкнутой и полноценной теории резания и разрушения (ТРР) горных пород. В данной работе предложены основы такой теории, которая базируется на описании погружения клина в массив с учетом законов его взаимодействия с породой и соотношений аналитической теории прочности. В результате получены теоретически обоснованные базовые параметры разрушения пород клиновым инструментом: требуемое усилие, глубина погружения клина, углы и объем воронки скола в зависимости от прочностных свойств пород и геометрии клина. Дан анализ полученных теоретических формул, сформулированы задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: теория резания, горные породы, расчетная схема, математическая модель, геометрия клина, баланс сил, разрушение сколом, поверхность сдвига, критерий разрушения, воронка скола, глубина внедрения.

1 Актуальность и цель исследований

Основным процессом строительных геотехнологий и способов добычи полезных ископаемых является механическое разрушение горных пород. Для этого в течение длительного исторического развития были разработаны различные инструменты, основанные на режуще-скалывающем разрушении горных пород [1–6 и др.]. С их помощью осуществляют разные способы механического воздействия на породу: ее дробят, раздавливают, откалывают, режут, истирают и пр. (рис. 1).

Впервые теоретическую схему ударного разрушения предложил в конце XIX века Долежалек в Чехии, а в дальнейшем ее развил Н. С. Успенский в России (1900 г.). Он рассмотрел систему сил при внедрении инструмента клиновидной формы в породу. Но физика разрушения пород при этом не рассматривалась. В целом сейчас известно около 20 различных эмпирических формул по определению параметров резания [7, 8].

В этих расчетных формулах пытаются учесть тип режущего инструмента, действующие на него силы, физико-механические свойства горных пород и др.

факторы. Прочностные показатели пород оцениваются контактной прочностью, прочностью породы при бурении, сопротивлением резанию или коэффициентом крепости горных пород f_{Π} по шкале профессора М. М. Протоdjeяконова [8].

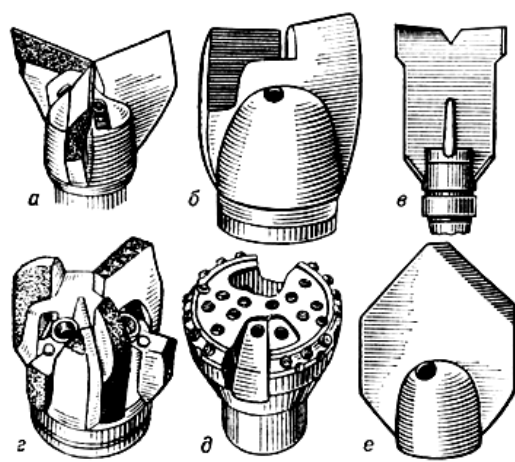


Рисунок 1 Различные типы буровых долот:
а — трехлопастное; б, в — двухлопастные;
г — истирающе-режущее; д — фрезерное;
е — пикообразное

Однако эмпирические расчеты дают существенно приближительные параметры резания, поскольку в них нет физически обосно-

ванных показателей прочности пород, отсутствует четко обозначенная расчетная схема взаимодействия резца с массивом, а исходные данные часто лишены физического смысла и определяются с недопустимо большим разбросом.

Таким образом, проблема создания теоретических основ расчета разрушения горных пород режуще-скалывающим инструментом далека от своего окончательного решения и остается до сих пор актуальной.

Целью данной работы является создание научных основ теории резания и разрушения естественных и искусственных хрупких материалов (горных пород) режуще-скалывающим инструментом для определения параметров процессов бурения и резания.

Идея работы состоит в использовании при построении исходной расчетной схемы, обосновании математической модели и разработке методики расчетов корректных методов механики сплошной среды и физически обоснованных показателей прочностных свойств горных пород на основе аналитической теории прочности [9].

В данной работе **объект** исследований — силовое взаимодействие режуще-скалывающего инструмента с горной породой, **предмет** исследований — закономерности разрушения горной породы под воздействием режущего инструмента.

К основным **задачам исследования**, исходя из логики рассмотрения поставленной проблемы, следует отнести:

1) установление и схематизацию качественной картины взаимодействия инструмента с породой;

2) формулирование и разработку физически обоснованной математической модели разрушения породы режущим инструментом;

3) обоснование принятых гипотез и идеализаций, получение теоретических зависимостей и формул для определения параметров резания породы инструментом;

4) анализ полученных закономерностей и результатов, постановку задач дальнейших исследований.

2 Особенности взаимодействия режущего инструмента с породой

Наиболее простым и наименее энергозатратным является способ разрушения породы режущим инструментом дробящего действия, когда инструмент вдавливают в породу ударной нагрузкой, после чего его перемещают в новое положение. Так работают перфораторные и шарошечные долота, станки ударного бурения и др. Однако даже для этого способа нет теоретически обоснованного расчета параметров разрушения пород.

Обычно исследователи пытались положить в основу расчетов простейшую плоскую задачу о воздействии сосредоточенной силы (в нашем случае — острого клина) на полуплоскость, хорошо известную в теории упругости как задача Фламана, которую он решил в 1892 г. [10]. Им получены формулы о напряженно-деформированном состоянии полуплоскости в окрестности сосредоточенной силы. Это решение неоднократно и безуспешно пытались использовать для определения параметров разрушения породы под клиновым резцом. Препятствием для удовлетворительного решения этой проблемы оказалась невозможность использования упругого решения для случая начала разрушения, поскольку дробление породы сразу кардинальным образом меняет напряженное состояние среды. Вот почему такими малопродуктивными оказались попытки использования теории упругости для описания проблем внедрения инструмента в породу.

Отсюда следует, что главное внимание при решении поставленной проблемы надо уделить процессам запредельного деформирования и разрушения породы. Кратко рассмотрим этапы внедрения инструмента в горную породу при ударных нагрузках [11]:

1) **этап поверхностного смятия:** при контакте инструмента с породой сминаются выступы и шероховатости на поверхности;

2) **этап образования трещин разрыва:** под острием растут радиальные трещины, опережая глубину выкола и образуя зоны предразрушения;

3) **этап краевого объемного раздавливания,** когда под острием и вокруг него возникает объемное разрыхление и смятие породных кристаллов в виде слоя раздробленной породы вплоть до отдельных кристаллических фрагментов;

4) **этап скола (или выкола) породы,** когда сдвигающие усилия от внедрения инструмента превосходят сдвиговую прочность породы на поверхности выкола.

Далее в процессе разрушения все этапы повторяются в той же последовательности. Наиболее важным является этап выкола породы, при котором выполняется главная работа по разрушению породы и затрачивается максимальная энергия. Поэтому в данной статье мы сосредоточимся на изучении именно этого этапа.

3 Расчетная схема и математическая модель внедрения клина в породу

Для построения математической модели задачи о внедрении клина в породу на первой стадии рассмотрим самую простую расчетную схему — плоскую деформацию полупространства под действием протяженного, несимметричного в поперечном сечении клина (рис. 2).

Пусть на породу действует плоский несимметричный клин, причем линия действия внешней силы F проходит через вершину клина. Это направление назовем главной осью нагружения. Начало координат поместим в вершину клина, направим ось ординат y по главной оси нагружения. Грани клина наклонены в общем случае под разными углами α_1 и α_2 к линии действия внешней силы F .

Пусть первые три этапа взаимодействия клина с породой уже закончились, и клин под действием внешней силы F погрузил-

ся своей вершиной в опережающую его бегущую трещину разрыва на некоторую глубину h .

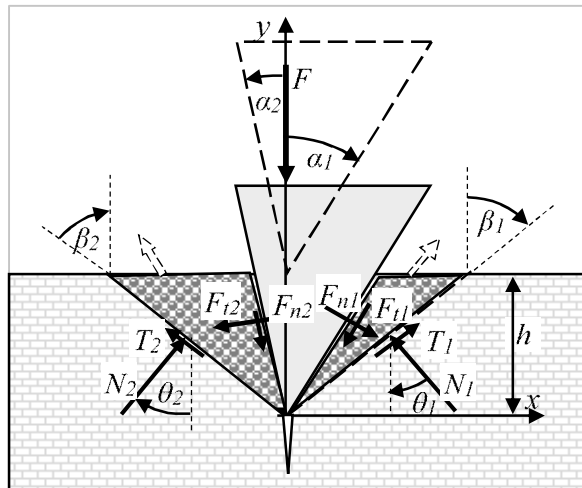


Рисунок 2 Расчетная схема математической модели внедрения несимметричного клина в породу

Глубина h начального проникновения клина в породу может варьироваться в значительных пределах от долей до десятка миллиметров и зависит от многочисленных факторов. Вычисление этой глубины составляет одну из главных задач исследований. На расчетной схеме, с целью достижения наглядности, упрощения обозначений и мелких деталей, эта глубина показана несколько преувеличенной.

На конечной стадии нагружения вблизи клина возникнут выколы породы, ограниченные с одной стороны гранями клина, а с другой — поверхностями сдвига. Исходя из рассмотрения особенностей образования поверхностей сдвига и кинематики движения выколов породы из-под граней клина при разрушении, поверхности сдвига будут принимать форму, близкую к плоской. Углы наклона этих плоскостей к главной оси обозначим β_1 и β_2 .

Рассмотрим действующие на породу со стороны граней клина силы (рис. 2). В общем случае на каждой грани их будет по две: нормальные F_{n1} , F_{n2} и силы трения на гранях F_{t1} , F_{t2} . При этом, в соответ-

ствии с законом трения Амонтона-Кулона, на каждой грани клина будут соблюдаться равенства:

$$\left| \frac{F_{t1}}{F_{t2}} \right| = f_k \left| \frac{F_{n1}}{F_{n2}} \right|, \quad (1)$$

где f_k — коэффициенты трения грани клина по породе.

На поверхностях выкола со стороны массива породы также действуют нормальные и касательные силы с подобным (1) соотношением между собой:

$$\left| \frac{T_1}{T_2} \right| = f_r \left| \frac{N_1}{N_2} \right|, \quad (2)$$

где f_r — коэффициент трения на поверхности выкола, обычно равен коэффициенту угла внутреннего трения φ ($f = \operatorname{tg}(\varphi)$) для данной породы.

Приступим к определению усилий, действующих на клин и выкол. Исходя из условий равновесия плоской системы сил, действующих на клин со стороны выкола, и для краткости записи вводя обозначения для круговых функций любого угла α

$$\left| \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \right| = \left| \frac{S_\alpha}{C_\alpha} \right|, \quad (3)$$

получим для нормальных усилий между гранями клина и верхними границами выкола уравнения:

$$\left| \frac{F_{n1}}{F_{n2}} \right| = F \left| \frac{C_1 \cdot S_2 \cdot C_2^{-1} + S_1}{C_2 \cdot S_1 \cdot C_1^{-1} + S_2} \right|, \quad (4)$$

где введены обозначения:

$$\left| \frac{C_1}{C_2} \right| = \left| \frac{C_{\alpha 1} - f_1 S_{\alpha 1}}{C_{\alpha 2} - f_2 S_{\alpha 2}} \right|, \quad \left| \frac{S_1}{S_2} \right| = \left| \frac{S_{\alpha 1} - f_1 C_{\alpha 1}}{S_{\alpha 2} - f_2 C_{\alpha 2}} \right|. \quad (5)$$

Касательные усилия F_{t1} , F_{t2} на гранях клина определяются по соотношениям (1).

Из рассмотрения условий равновесия плоской системы сил, действующих на выколы породы возле каждой из граней клина

$i = 1, 2$, получим уравнения для определения нормальных N_i и касательных T_i сил на нижних плоскостях выколов $i = 1, 2$:

$$\left| \frac{N_i}{T_i} \right| = F_{ni} \left| \frac{C_{\gamma i} + f_i S_{\gamma i}}{S_{\gamma i} - f_i C_{\gamma i}} \right|, \quad (i = 1, 2), \quad (6)$$

где $\gamma_i = \beta_i - \alpha_i$ ($i = 1, 2$) — угол зоны выкола при вершине клина.

На рисунке 3 показаны графики нормальных F_n и касательных F_t усилий под гранями клинового индентора в зависимости от изменения угла его заострения α .

Из графиков видно, что чем острее клин, тем сильнее его воздействие на окружающий материал. Однако при этом следует учитывать прочность материала клина при его взаимодействии с породой, поэтому угол его заострения нельзя чрезмерно уменьшать.

Еще более поучительны графики нормальных N_1 и касательных T_1 сил, действующих на поверхности выкола при изменении угла наклона β ее поверхности (рис. 4). Эти графики построены для симметричного клина с углом заострения $\alpha = 25^\circ$.

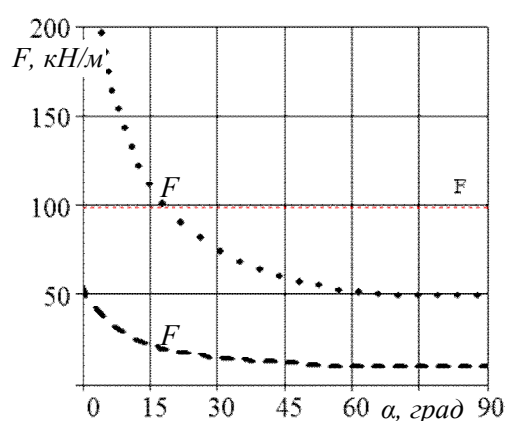


Рисунок 3 Зависимость нормальных F_n и касательных F_t усилий под симметричными гранями клина от угла его заострения α

Нормальные силы изменяются сравнительно мало с максимумом при угле $\beta = 30 \dots 40^\circ$. Зато сдвигающие силы T_1

меняют свое направление, о чем свидетельствует смена их знака: при $\beta = 37^\circ$ они отрицательны и выталкивают породу из зоны выкола, а при меньшем угле их действие противоположно. Следовательно, можно утверждать, что для принятых соотношений между нормальными и сдвиговыми усилиями (коэффициент трения $f = 30^\circ$) выкол возможен только с углом наклона поверхности сдвига более $\beta = 37^\circ$.

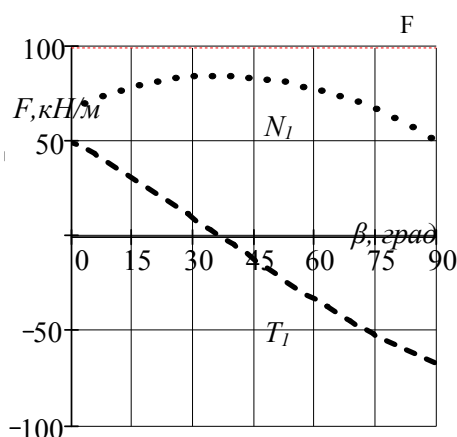


Рисунок 4 Влияние угла наклона β поверхности сдвига выкола на нормальные и касательные усилия (клин симметричен с углом заострения $\alpha = 25^\circ$)

Таким образом, основные силовые факторы, действующие на клин при его внедрении в породу, определены и можно приступить к формулированию условий образования выкола. Для этого следует вычислить действующие напряжения на любой возможной поверхности выкола при $\beta_i = \text{var}$ и сравнить их с прочностью породы. Именно этот этап в предыдущих попытках построения различных теорий механического резания и разрушения не был сформулирован и осуществлен. В немалой степени это можно объяснить старанием авторов использовать для определения напряжения разнообразные методы теории упругости, что приводило к большим сложностям и уводило решение в тупик. На самом деле в задачах такого рода упругие решения становятся совершенно не-

приемлемы, поскольку возникновение разрушения полностью искажает начальное, пусть и правильное, распределение напряжений в окрестности трещин разрыва и сдвигов.

Основная идея, которая положена в предлагаемом подходе, состоит в том, что на площадках сдвига, обрамляющих выкол породы, происходит либо самопроизвольное выравнивание касательных напряжений как в разрывных задачах теории пластичности либо, наоборот, для хрупких пород — максимальная концентрация напряжений на более прочных фрагментах площадки разрушения. Эти особенности в закономерностях позволяют существенно упростить формальную запись критерия разрушения и получить сравнительно простые и обозримые решения задач разрушения материалов режуще-скалывающим инструментом.

Опираясь на гипотезу постепенного выравнивания напряжений на поверхности сдвига вначале и в процессе ее образования, найдем усредненные напряжения на нижней плоскости выкола. Для этого следует выражения для нормальных N_i и касательных T_i сил на плоскости сдвига (6) разделить на соответствующие размеры площади A_i выколов:

$$A_i = h / C_{\beta i}, \quad (i = 1, 2). \quad (7)$$

Средние действующие нормальные σ_{ni} и касательные τ_{ni} напряжения на i -тых площадках выколов будут равны:

$$\left| \frac{\sigma_{ni}}{\tau_{ni}} \right| = \frac{1}{A_i} \left| \frac{N_i}{T_i} \right|, \quad (i = 1, 2). \quad (8)$$

Далее для получения решения необходимо, задаваясь прочностными показателями породы, в которые внедряется клин, определить предельные показатели сопротивления сдвигу на поверхности выкола. Рассмотрим эту сторону проблемы более подробно в следующем разделе.

4 Сопротивление разрушению и прочностные показатели горной породы

Для суждения о сопротивлении горных пород разрушению режуще-скалывающим инструментом обычно используют разнообразные показатели ее прочности. Одним из первых таких показателей, сыгравшим исключительно важную роль в горной технике, является крепость пород f_L , предложенная проф. М. М. Протодяконовым в начале XX века. В дальнейшем, по мере развития горной науки и техники, этот показатель был дополнен контактной прочностью, сопротивлением породы (угля) резанию и др. [11].

Отдавая должное необходимости и полезности появления этих специфических показателей прочности, следует отметить и их общие недостатки, которые особенно стали проявляться в последнее время ускоренного развития новых образцов горной техники. В частности, эти показатели имеют недостаточное физическое и теоретическое обоснование, применяются при эмпирических подходах, во многом привязаны к особым схемам разрушения пород, они слабо связаны друг с другом по смыслу. Кроме того, определение этих показателей прочности требует специфического лабораторного оборудования и плохо стандартизуется.

Поэтому в теоретических разработках следует использовать основные положения и мощные методы обобщенного описания поведения материалов с помощью механики сплошной среды, в частности теорий прочности. Тот факт, что этого не наблюдается в практических методах расчета разрушения горных пород, можно объяснить не в последнюю очередь недостатками существующих теорий прочности, плохо отражающих особенности поведения пород при разрушении (в частности, феномен нелинейности паспорта прочности на диаграмме О. Мора).

В данном исследовании будет использована новая теория прочности — аналитическая, которая позволяет с высокой до-

стоверностью описывать начало и последующие стадии разрушения породы при ее произвольном напряженно-деформированном состоянии [9].

Основными показателями материала в аналитической теории прочности являются когезия отрыва σ_0 , когезия сдвига τ_0 и параметр хрупкости α_0 (рис. 5).

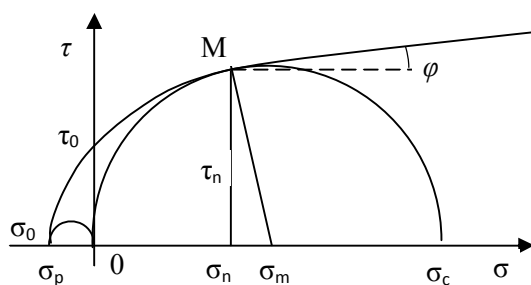


Рисунок 5 Диаграмма О. Мора в трактовке аналитической теории прочности [9]

Найдем соотношения, по которым можно вычислить эти показатели прочности, если известны определяемые обычными лабораторными методами общеизвестные и повсеместно применяемые показатели:

- угол внутреннего трения породы при одноосном сжатии φ ;
- прочность породы на одноосное сжатие σ_c ;
- прочность породы на одноосное растяжение σ_p .

Для этого используем основное уравнение аналитической теории прочности [9] для огибающей наибольших кругов напряжений диаграммы О. Мора

$$[\tau_n] = \tau_0 \cdot (\sigma_n / \sigma_0 + 1)^{\alpha_0}, \quad (9)$$

в котором допускаемое сдвиговое напряжение $[\tau_n]$ выражено через показатели прочности τ_0 , σ_0 , α_0 и действующее нормальное напряжение на площадке сдвига σ_n .

Используем известное значение коэффициента угла внутреннего трения породы при одноосном сжатии $f_c = \tan \varphi$ и прирав-

няем его к такому же коэффициенту, вычисленному путем дифференцирования значения $[\tau_n]$ из (9) по σ_n :

$$f_c = \frac{d[\tau_n]}{d\sigma_n} = \alpha_0 \frac{[\tau_n]}{\sigma_n + \sigma_0}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения для $[\tau_n]$, σ_n из геометрических соотношений на рисунке 3, найдем вспомогательные соотношения:

$$[\tau_n] = 0,5\sigma_c C_\phi, \quad \sigma_n = 0,5\sigma_c(1 - C_\phi). \quad (11)$$

Считая с достаточно высокой степенью достоверности, что адгезия разрыва, согласно рисунку 3, равна прочности на одноосное растяжение $\sigma_0 = \sigma_p$, получим формулы для определения остальных искомых параметров:

– параметра хрупкости:

$$\alpha_0 = f_c C_\phi^{-1} (1 - S_\phi + 2\sigma_0 / \sigma_c); \quad (12)$$

– когезии сдвига:

$$\tau_0 = 0,5\sigma_c C_\phi [0,5(1 - S_\phi)\sigma_c / \sigma_0 + 1]^{-\alpha_0}. \quad (13)$$

Формулы (11)–(13) позволяют при известных из лабораторных испытаний обычных прочностных показателях горных пород найти прочностные параметры аналитической теории прочности. Именно эти параметры (11)–(13) и следует использовать для дальнейших расчетов.

4 Локальный нормированный критерий разрушения ЛНКР

Для оценки возможности сдвигового разрушения на поверхности, ограничивающей выкол, следует выбрать главный критерий разрушения породы, от которого будут зависеть все последующие результаты и их достоверность.

В качестве локального (для каждой точки) нормированного критерия разрушения (ЛНКР) ω_i породы примем выражение, согласно которому условием сохранения прочности или разрушения по механизму сдвига будут неравенства:

$$\omega_i = \frac{\tau_{ni}}{[\tau_{ni}]} \begin{cases} < 1 - \text{прочность;} \\ \geq 1 - \text{разрушение;} \end{cases} \quad (i = 1, 2). \quad (14)$$

Очевидно, что этот критерий ЛНКР ω_i зависит от величины и распределения нормальных и касательных напряжений σ_{ni} , τ_{ni} ($i = 1, 2$) на площадках сдвига по каждую сторону от граней клина.

Однако распределение этих напряжений (8), а также сдвиговой прочности породы (9) по умолчанию принято считать равномерным, что весьма маловероятно.

На самом деле действующие сдвиговые напряжения τ_n будут весьма значимо изменяться вдоль поверхности сдвига, что будет сопровождаться их концентрацией и деконцентрацией. Такая особенность вызывается самим характером приложения усилий от клинового инструмента и, кроме того, наличием различного рода неоднородностей в породе, в первую очередь, за счет изменчивости ее упругих свойств и структурного строения.

Кроме того, поскольку предельно допускаемое сдвиговое напряжение $[\tau_n]$ (9) само зависит не только от концентрации и неравномерности распределения действующих напряжений, но и непосредственно от вариабельности и неоднородности пород на участке сдвига (трещины, ослабления, контакты между зернами, слоевые дефекты и пр.), то будет крайне ошибочным считать критерий разрушения ω_i ЛНКР (14) постоянным. Понятно, что его изменчивость на площадке возможного разрушения будет много выше вариабельности прочности и действующих напряжений.

Попытка непосредственно аналитически учесть изменчивость критерия разрушения ω_i наталкивается почти на непреодолимые математические и методические трудности. Поэтому, чтобы использовать в полной мере предложенную теорию разрушения пород режуще-скалывающим инструментом, следует на этом этапе исследования прибегнуть к эвристическому ме-

тоту решения возникшей проблемы вариативности ω_i .

Если проанализировать влияние прочностной изменчивости на поверхности обрывающегося выкола, то окажется, что разрушение сдвигом начинается в первую очередь на самых слабых по прочности участках и они переходят в запредельное состояние. Это значит, что на этих участках воспринимается только ограниченная минимальной прочностью часть приложенной сдвиговой нагрузки. Остальная ее часть, превышающая минимальную прочность, становится как бы избыточной и перераспределяется с высокой концентрацией на соседние неразрушенные участки поверхности выкола.

Таким образом, прочностные ослабления на поверхности выкола являются своеобразным спусковым механизмом, запускаящим лавинообразный процесс разрушения.

За счет накопленной в породе при нагружении упругой энергии начальный сдвиг даже на незначительном участке с минимальной прочностью придает процессу разрушения динамичный характер последовательного преодоления сопротивления сдвигу на участках со все более высокими прочностными отклонениями от среднего уровня. Последними будут разрушены самые прочные зерна на поверхности выкола, причем для хрупкой породы конечная стадия будет взрывоподобной с выбросом обломков выкола из-под клина.

Такого же рода выводы можно сделать относительно учета влияния неравномерности распределения внешней сдвиговой нагрузки τ_n . Она так же приведет к постепенному выключению из работы самых нагруженных участков, перераспределению и концентрации напряжений на остальную площадь, а затем — к лавинообразному (скачком) завершению процесса разрушения. Отличие заключается в том, что если для прочности $[\tau_n]$ (9) следует брать минимально возможную границу ее изменчи-

вости, то для нагрузки τ_n (8) — максимальное ее значение из всего диапазона распределения.

Исходя из вышеприведенного анализа влияния вариативности ЛНКР ω_i , можно заключить, что описанные особенности разрушения целесообразно учесть с помощью коэффициента вариативности K_V в виде симплекса, состоящего из двух сомножителей:

$$K_V = K_{V\tau} \cdot K_{V\sigma}, \quad (15)$$

где $K_{V\tau}$ — коэффициент изменчивости нагрузки, учитывающий вариативность распределения касательной нагрузки на поверхности разрушения в виде отношения ее максимума к среднему значению, $K_{V\tau} > 1$;

$K_{V\sigma}$ — коэффициент изменчивости прочности, учитывающий ее вариативность на поверхности разрушения в виде отношения ее среднего значения к минимальному, $K_{V\sigma} > 1$.

Окончательно получим обобщенную формулу для определения ЛНКР:

$$\Omega = K_V \cdot \omega = K_V \cdot \frac{\tau_n}{[\tau_n]}, \quad (16)$$

которая пригодна для каждой i -той грани $i = 1, 2$) клинового скалывающего инструмента.

Численное значение коэффициента вариативности может изменяться в пределах $K_V = 2 \dots 5$, и его следует определять экспериментально методом сравнения теоретических расчетов с опытными данными по глубине выкола.

5 Определение размеров выкола при действии клинового инструмента на породе

Исходя из полученных соотношений (8) для нормальных и касательных напряжений σ_{ni} , τ_{ni} ($i = 1, 2$), действующих на поверхности сдвига вдоль нижней границы выкола, можно приступить к использова-

нию ЛНКР Ω (16) для оценки возможности разрушения породы по этой поверхности и определения ее размеров: угла ее наклона β и глубины выкола h .

Основные закономерности изменения ЛНКР Ω в зависимости от угла заострения граней клина вдоль поверхностей сдвига, ограничивающих зону выкола снизу, с разным углом наклона показаны на рисунке 6. Численные расчеты проводились для крепкого песчаника, у которого прочность на одноосное сжатие $\sigma_c = 100 \text{ МПа}$, на одноосное растяжение $\sigma_p = 10 \text{ МПа}$, а угол внутреннего трения равен $\varphi = 25^\circ$, при внедрении клина в породу на одинаковую глубину, равную 1 мм.

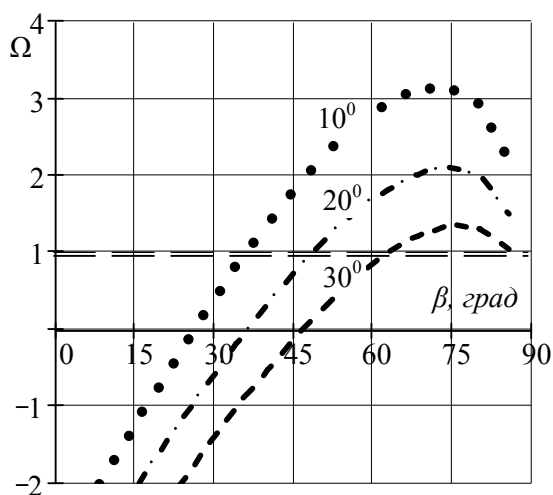


Рисунок 6 Зависимость критерия разрушения ЛНКР (16) от наклона поверхности сдвига (β) для клиньев с разными углами заострения $\alpha = 10, 20, 30^\circ$

На графиках мы можем видеть явно выраженные максимумы кривых изменения ЛНКР $\Omega > 1$, которые выделяют область наиболее вероятного направления поверхностей сдвига. В данном случае угол наклона поверхностей выкола оказывается почти одинаковым для всех форм клина и равным около 73° .

Чем больше угол заострения граней клина, тем меньше критерий ЛНКР Ω , что

вполне объяснимо из условий формирования области выкола.

Оказывается, что критерий ЛНКР Ω позволяет определить по исходным данным о погонной силе F , приложенной к клиновому инструменту, и показателям физико-механических свойств пород глубину h проникновения клина в породу. Как ясно из формулы для вычисления ЛНКР Ω (16), он прямо пропорционально зависит от приложенной к клину погонной силы F . Следовательно, полученные расчетные формулы позволяют не только определить глубину лунки выкола, но и управлять процессом разрушения.

Однако силовое воздействие на породу во многом зависит также и от скорости приложения силы. Для этого целесообразно ввести так называемый коэффициент динамичности $K_D > 1$, показывающий отношение напряжения (деформации), вызванного динамическим действием нагрузки F , к напряжению (деформации), вызванному статическим действием той же нагрузки. Как известно, при динамичном приложении силы F со скоростью, сравнимой с ударным воздействием, коэффициент динамичности, учитывающий ударную нагрузку всего рабочего органа на породу, составляет $K_D = 2 \dots 3$ и более. Поэтому силу F воздействия на породу следует увеличивать на значение коэффициента динамичности K_D .

Для нахождения глубины погружения клина h в породу необходимо, чтобы максимальное значение критерия ЛНКР было равно $\Omega = 1$. Тогда из всего диапазона возможных углов наклона поверхности сдвига останется лишь один угол, соответствующий максимальному значению глубины h . Для песчаника с вышеуказанными прочностными свойствами были построены графики изменения ЛНКР для разных углов заострения клина. При этом были взяты такие глубины его внедрения, чтобы выполнялось для всех случаев условие $\Omega = 1$ (рис. 7).

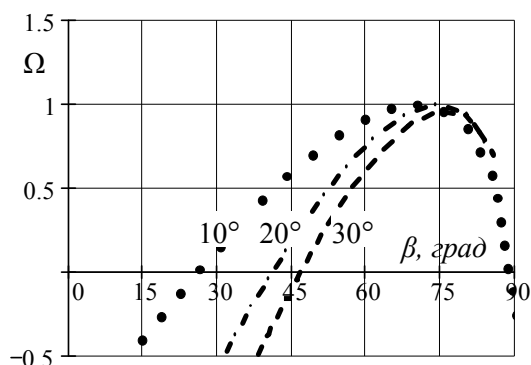


Рисунок 7 Предельные графики критерия разрушения ЛНКР Ω для определения наклона поверхности сдвига (β) и глубины внедрения клиньев h с разными углами заострения $\alpha = 10, 20, 30^\circ$

Исследования и численные расчеты показали, что по мере увеличения угла заострения клина угол наклона площадки сдвига β несколько увеличивается, а глубина h внедрения клина в породу существенно уменьшается. Так, для углов заострения $\alpha = 10, 20, 30, 40, 50^\circ$ соответствуют глубины внедрения $h = 9,8; 4,2; 1,8; 0,7; 0,2$ мм. Следовательно, при углах заострения более 40° клин почти не погружается в породу и происходит лишь усталостное повреждение ее поверхности.

Библиографический список

1. Крапивин, М. Г. Горные инструменты [Текст] / М. Г. Крапивин, И. Я. Раков, Н. И. Сысоев. — М. : Недар, 1990. — 256 с.
2. Абатуров, В. Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент [Текст] / В. Г. Абатуров. — Тюмень : Нефтегазовый университет, 2007. — 269 с.
3. Волков, А. С. Буровой инструмент [Текст] / А. С. Волков. — М. : Недра, 1980. — 285 с.
4. Wojnar, K. Wiertnistwo [Text] / K. Wojnar, W. Wladislawlew. — Warszawa, 1976. — 350 s.
5. Lundberg. Efficiency of percussive drilling with extension rods [Text] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Issue 4, August 1987. — Volume 24. — Pages 213–222.
6. Hartman, H. L. The effectiveness of indexing in percussion and rotary drilling [Text] / H. L. Hartman // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Issue 4, November 1966. — Volume 3. — Pages 265–278.
7. Крюков, Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании Т.1. [Текст] / Г. М. Крюков. — М. : Горная книга, 2006. — 330 с.
8. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин [Текст] / В. В. Нескоромных. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа, 2014. — 335 с.

Выводы

В результате выполненных исследований предложен начальный вариант аналитически обоснованной теории резания и разрушения горных пород, которая дает основу для последующих уточнений и развития.

Рассмотрена и обоснована наиболее простая расчетная схема погружения клинового разрушающего инструмента в породу. Впервые разработан теоретический подход для определения угла наклона поверхности сдвига и глубины внедрения клинового инструмента. По этим параметрам легко определяются единичный объем разрушения и удельные затраты энергии.

Полученный алгоритм расчета, впервые основанный на использовании ЛНКР и аналитической теории прочности, дает принципиально новую модель теоретически обоснованного определения параметров резания и разрушения хрупких естественных и искусственных материалов с учетом наиболее характерных особенностей геометрии рабочего инструмента и реальных прочностных свойств горных пород. Сравнение теоретических зависимостей с реальными данными показало их непротиворечивость и достаточную достоверность.

9. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
10. Тимошенко, С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М. : Наука, 1975. — 576 с.
11. Латышев, О. Г. Разрушение горных пород [Текст] / О. Г. Латышев. — М. : Теплотехник, 2007. — 672 с.
12. Литвинский, Г. Г. Основы горной геомеханики Т.1. [Текст] / Г. Г. Литвинский // Механические свойства горных пород и массивов. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — 312 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМО ДонГТУ Корнеевым С. В.,
д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонГТУ Борщевским С. В.**

Статья поступила в редакцию 01.12.17.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОСНОВИ ТЕОРІЇ РІЗАННЯ І РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Технології видобутку сировинних ресурсів і освоєння підземного простору базуються на механічному руйнуванні гірських порід ріжучо-сколюючим інструментом. Однак визначення параметрів руйнування досі виробляють за допомогою емпіричних співвідношень, оскільки немає замкненої і повноцінної теорії різання і руйнування (ТРР) гірських порід. В даній роботі запропоновано основи такої теорії, яка базується на описі заглиблення клину в масив з урахуванням законів його взаємодії з породою і співвідношень аналітичної теорії міцності. В результаті отримано теоретично обґрунтовані базові параметри руйнування порід клиновим інструментом: необхідне зусилля, глибина заглиблення клину, кути і об'єм воронки відколу в залежності від міцнісних властивостей порід і геометрії клину. Надано аналіз отриманих теоретичних формул, сформульовано задачі подальших досліджень.

Ключові слова: теорія різання, гірські породи, розрахункова схема, математична модель, геометрія клину, баланс сил, руйнування відколом, поверхня зсуву, критерій руйнування, воронка відколу, глибина заглиблення.

Prof. Litvinsky G. G. (DSTU, Alchevsk, LPR)

THE THEORY FUNDAMENTALS OF ROCK CUTTING

Production of raw materials and the development of underground space are based on the mechanical destruction of rocks with the cutting and shearing tool. However, the definition of destruction parameters is still produced using empirical relationships as there is not a closed and comprehensive theory of cutting and breaking (TCB) of the rocks. In this work, the proposed framework of such a theory, which is based on the description of the wedge immersion into the rock massive according to the laws of its interaction with the rocks and ratios of the analytical strength theory. As a result of theoretical investigations, basic parameters are grounded for failure rocks by wedge tool: the required force and the immersion depth of the wedge, angles and volume of the chip crater depending on the strength properties of rocks and the geometry of the wedge. The analysis of the theoretical formulas is given, the problems for further research are stated.

Key words: theory of cutting, rocks, design scheme, mathematical model, geometry of the wedge, balance of forces, chip destruction, surface of shear, failure criterion, funnel of chipped, depth of penetration.