

УДК 622.243.2

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

ПИНЧ-ЭФФЕКТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПОРОДЫ КЛИНОВЫМ ГОРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Освоение подземного пространства и добыча сырьевых ресурсов предполагают применение разнообразных производственных технологий, горных машин и инструментов. Повышение их эффективности сдерживает отсутствие теоретических основ геомеханики разрушения. Данная работа нацелена на создание теории разрушения пород клиновым горным инструментом. Основная идея работы состоит в разработке теории феномена пинч-эффекта для определения параметров трещин отрыва при сжатии горной породы. Рассмотрена задача теории упругости Фламана о сжатии плоского клина погонной нагрузкой, приложенной к его вершине. Изучены особенности напряжённо-деформированного состояния (НДС) в породном клине. Впервые теоретически обоснован феномен пинч-эффекта при разных типах НДС. Получены расчётные формулы проявлений пинч-эффекта (размеры зоны трещин и переизмельчения) под лезвием горного инструмента при плоском и угловом породном обнажении. Результаты исследований развивают теоретические основы геомеханики разрушения пород горным инструментом.

Ключевые слова: пинч-эффект, теория резания, горный инструмент, горные породы, задача Фламана, этапы разрушения, модель раскола, трещина раскола, глубина и наклон трещины.

1 Актуальность и цель исследований

Одним из основных процессов добычи сырьевых ресурсов в различных отраслях промышленности является бурение. Для его осуществления применяют самые разнообразные инструменты, число разновидностей которых в настоящее время превышает несколько десятков. Для обоснования параметров конструкции бурового инструмента и технологии бурения были проведены многочисленные и обширные теоретические, натурные и лабораторные исследования. Это позволило выявить основные механизмы разрушения пород при бурении, влияющие на процесс разрушения факторы, предложить методы расчёта и управления параметрами бурения для различных горно-геологических условий, что обеспечило высокие технико-экономические показатели процессов бурения [1–3 и др.].

Однако, несмотря на обилие выполненных исследований, ещё не создана достаточно корректная и непротиворечивая теория механического разрушения пород под воздействием бурового инструмента. Главное внимание исследователей было

сосредоточено на изучении конструкции и режимов работы буровых механизмов, тогда как взаимодействию режущего инструмента с породой не уделялось должного внимания. В этом направлении господствуют эмпирические подходы, а теория, за редким исключением [4, 5], зачастую подменялась многочисленными приближёнными эмпирическими зависимостями, полученными из опытных данных по бурению. При этом физика разрушения пород, как правило, почти не рассматривалась и теоретически не обосновывалась. В целом к настоящему времени существует около 20 различных эмпирических формул по определению параметров резания [6, 7].

Как известно [8, 9], сам процесс механического разрушения породы под силовым воздействием бурового инструмента состоит из нескольких последовательных этапов:

1) **поверхностное смятие:** инструментом сминаются выступы и шероховатости на поверхности объекта разрушения;

2) **образование трещин:** под остриём возникают и растут трещины, образуя зоны предразрушения;

3) **краевое объёмное раздавливание:** разрыхление и смятие породных кристаллов с образованием слоя дроблёной породы вплоть до отдельных кристаллических фрагментов;

4) **скол (или выкол) породы:** образование лунки выкола путём динамического выброса породы из неё в стороны с последующим внедрением лезвия инструмента.

Эти вербально выделенные этапы разрушения получили многочисленные экспериментальные подтверждения практикой бурения пород. Однако теоретического описания этих этапов с помощью простых и физически обоснованных математических моделей до сих пор не предложено. Очевидно, для каждого этапа разрушения необходима своя собственная (и, как правило, не одна) математическая модель процесса.

Математическая модель процессов сглаживания неровностей и шероховатостей путём смятия поверхности материала под режущей кромкой инструмента (первый этап разрушения) во многом является вероятно-стохастической. Формируемый начальный отпечаток лезвия на объекте разрушения достаточно вариабелен ввиду случайного распределения неровностей. Этот этап является сугубо вспомогательным и не представляет особого практического интереса из-за своей относительно малой энергоёмкости. В то же время остальные этапы разрушения нуждаются в подробном и детальном математическом описании.

Пример весьма перспективной исходной математической модели последнего этапа разрушения материала в виде теоретического описания образования лунки выкола под воздействием клинового инструмента предложен в работе [10], которая является базовой для геомеханики разрушения и может быть обобщена на более сложные случаи взаимодействия режущего инструмента с породой не при бурении.

Однако второй этап разрушения под клиновым инструментом, связанный с образованием трещин под его режущей

кромкой, несмотря на его важность, до сих пор оставался вне поля зрения исследователей. Сразу отметим, что, хотя переход от предразрушения к полному разрушению породы является промежуточным этапом, тем не менее он может существенным образом влиять на дальнейшее развитие процесса разрушения.

Таким образом, разработка теоретических основ расчёта разрушения горных пород режуще-скалывающим инструментом, несмотря на длинную историю своего развития, пока далека от своего завершения. Особенно актуальными для геомеханики разрушения горных пород становятся поиски и разработка математических моделей различных этапов разрушения и в первую очередь модели физического процесса образования трещин под лезвием клинового инструмента.

Целью исследования является разработка математической модели образования раскольных трещин под лезвием режуще-скалывающего инструмента.

Идея работы заключается в использовании закономерностей напряжённо-деформированного состояния (НДС) породного массива под клином и в изучении проявления феномена пинч-эффекта при образовании разрывных трещин.

Объектом исследований является физический процесс возникновения трещин разрыва под клином, **предмет** исследований — закономерности разрушения горной породы под клиновым лезвием режуще-скалывающего инструмента.

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

1) выбор и обоснование исходной расчётной схемы;

2) анализ НДС породного пространства в виде клина при действии на его вершину произвольно направленной погонной нагрузки;

3) обоснование и разработку математической модели пинч-эффекта при образовании трещин раскола;

4) получение теоретических зависимостей и формул для определения параметров трещинного разрушения под клиновым инструментом;

5) анализ полученных закономерностей и результатов, рассмотрение практически важных задач для горной науки.

2 Выбор и обоснование расчётной схемы

Наиболее очевидным подходом в решении задачи при силовом воздействии клина на полупространство было ставшее традиционным использование хорошо известной в теории упругости задачи Фламана, которую он решил в 1892 г. [11]. Однако это решение оказалось непригодным для определения параметров образования выколов породы под клиновым резцом и было отвергнуто.

Непреодолимым препятствием для использования упругого решения оказались попытки применить его сразу для конечного этапа разрушения — образования лунки выкола, поскольку уже на начальных этапах дробление породы кардинальным образом меняет напряжённое состояние среды и, тем самым, исключает возможность использования теории упругости. Вот почему такими малопродуктивными оказались исследования на основе использования теории упругости для описания проблем внедрения инструмента в породу.

Однако вполне оправдана попытка использования теории упругости до начальных этапов разрушения породы под клином.

Постановка задачи состоит в следующем. Рассмотрим плоскую задачу теории упругости о НДС породного клина под действием произвольно направленной погонной нагрузки. После первого этапа поверхностного смятия породы под клином, малоэнергос затратного и поэтому второстепенного, наступает этап предразрушения, когда клин упирается в поверхность по всей своей длине.

В этот момент со скоростью звука (2...8 тыс. м/с) формируется упругое поле напряжений под режущей кромкой инст-

румента. Наиболее общая постановка задачи такова: на породный клин с произвольным углом при вершине 2α действует погонная нагрузка q Н/м, наклонённая к оси симметрии клина под произвольным углом β (рис. 1).

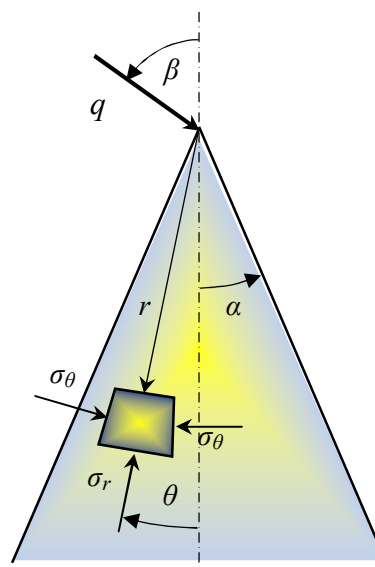


Рисунок 1 Расчётная схема нагружения клинового блока породы погонной нагрузкой q

Поскольку разрушений ещё не возникло и сохраняется упругое состояние породного клина, определим его НДС, для чего воспользуемся известным решением плоской осесимметричной задачи теории упругости [11].

Напряжённое состояние клина при таком нагружении в полярной системе координат r, θ известно:

$$\sigma_r = \frac{q}{r} \left[\frac{\cos\theta \cdot \cos(\beta)}{\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} - \frac{\sin\theta \cdot \sin(\beta)}{\alpha - 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} \right], \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0.$$

Формула (1) содержит в себе всю информацию о НДС в клиновом пространстве $0 < r < \infty$ с произвольными углами $0 \leq \alpha \leq \pi$ наклона его граней относитель-

но оси симметрии и углом β приложения внешней погонной нагрузки q . При этом накладываются определённые геометрические ограничения на изменение угла β приложения погонной нагрузки q в виде неравенств $0 \leq \beta \leq (\pi/2 - \alpha)$, запрещающих приложение нагрузки изнутри породного пространства как невозможное для приложений в горных задачах.

3 Анализ НДС породного клина

Как следует из уравнений (1), в клиновом пространстве возникает простое одноосное напряжённое состояние, а направления главных площадок всегда совпадают с полярными осями координат r, θ , причём тангенциальные и касательные напряжения всегда равны $\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$, что соответствует обобщённому одноосному сжатию при любом угле наклона β погонной нагрузки, приложенной к вершине клина. Здесь и далее принято правило знаков: сжатие — плюс, растяжение — минус.

В геометрически простейшем случае, когда $\alpha = \pi/2$ и клин вырождается в упругую полуплоскость, максимальные радиальные напряжения σ_r всегда направлены вдоль линии действия погонной нагрузки q и убывают обратно пропорционально расстоянию r от точки (линии) её приложения:

$$\sigma_r \Rightarrow \max \text{ при } \theta = \beta, \sigma_r = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q}{r}. \quad (2)$$

На рисунке 2 можно проследить за изменением НДС (радиальных напряжений σ_r) на расстоянии от вершины клина $r = 1$ м под действием погонной нагрузки $q = 100$ Н/м, приложенной под углом $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$. Максимумы радиальных напряжений σ_r при этом располагаются всегда под углом $\theta = \beta$. Следует обратить внимание, что радиальные напряжения σ_r меняют знак (т. е. становятся растягивающими) при изменении направления при-

ложения нагрузки $\beta \leq 0$ в точках, где $(\pi/2 + \beta) \leq \theta$.

С точки зрения практики этот случай нагружения является наиболее интересным, так как он воспроизводит реальное воздействие клинового инструмента на плоский породный массив. Именно так воздействует режущий орган горной машины при ударе или перекатывании режущей кромки по породе.

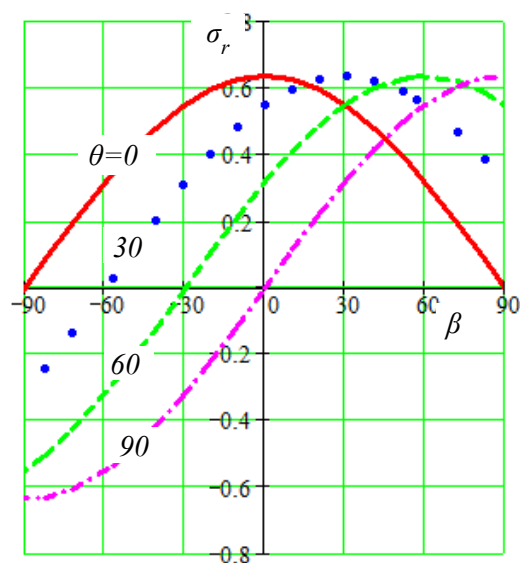


Рисунок 2 Изменение радиальных напряжений σ_r при $\alpha = \pi/2$ в точках с различными полярными углами $0 \leq \theta \leq \pi/2$ при изменении угла наклона β погонной нагрузки q

Отметим, что графики изменения радиальных напряжений σ_r в зависимости от полярного угла $0 \leq \theta \leq \pi/2$ полностью подобны графикам зависимости от угла β на рисунке 2. Это легко объяснить, если обратить внимание на то, что полярный угол θ и угол наклона погонной нагрузки β входят в формулу (1) совершенно равноправно (симметрично). Поэтому все зависимости и их графики должны быть зеркально подобны, и в этом можно убедиться по совпадению вида графиков при сравнении рисунков 2 и 3.

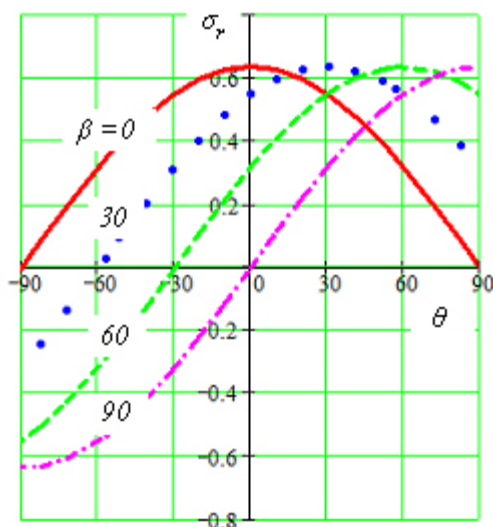


Рисунок 3 Зависимость напряжений σ_r при изменении полярного угла $0 \leq \theta \leq \pi/2$ для разных углов наклона β погонной нагрузки q , приложенной к полупространству при $\alpha = \pi/2$

Оказывается, что при изменении угла наклона нагрузки β вид графиков распределения радиальных напряжений не меняется, хотя их максимум смещается на угол, равный углу β наклона нагрузки.

Если построить такого же типа графики для радиальных напряжений, но для клиновых пространств с другим углом раскрытия α , то характер кривых значительно изменится. Для случая нагружения клинового пространства с иными углами раскрытия клина $\alpha \neq 90^\circ$ эти закономерности не соблюдаются.

Рассмотрим случай клинового пространства с тупым углом, например, когда $\alpha = 3\pi/2$ (рис. 4).

Здесь проявляются иные закономерности: по мере увеличения угла наклона погонной нагрузки β максимумы радиальных напряжений несколько уменьшаются на направлениях, углы которых меньше, хоть и незначительно, чем угол приложения нагрузки β .

Если угол раскрытия клинового пространства острый, например, когда $\alpha = \pi/4$, т. е. когда клин представляет со-

бой прямой угол, то распределение радиальных напряжений становится более сложным (рис. 5). Оказывается, что по мере увеличения угла β наклона нагрузки максимумы напряжений смещаются к границе клина и существенно (более чем в два раза) возрастают.

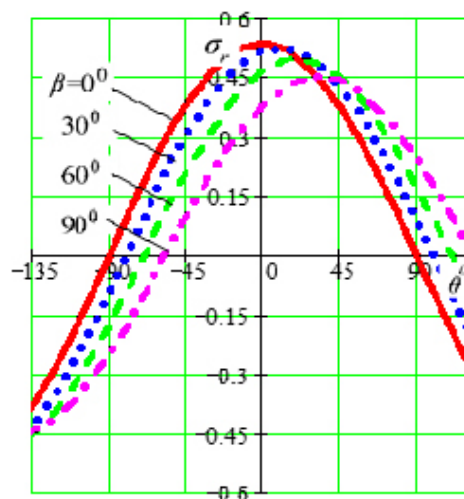


Рисунок 4 Зависимость напряжений σ_r при изменении полярного угла $0^\circ \leq \theta \leq \alpha = 135^\circ$ при разных углах $\beta^\circ \leq 45^\circ$ погонной нагрузки q

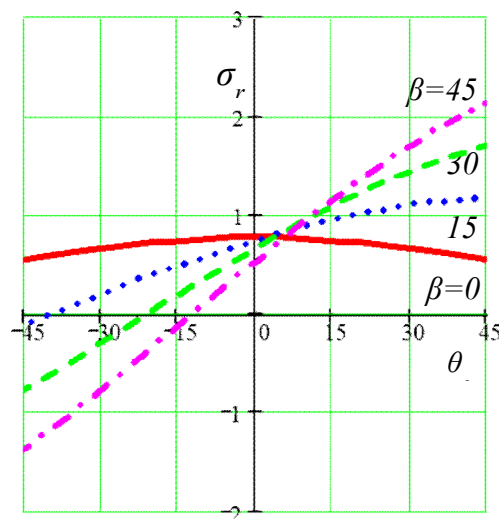


Рисунок 5 Распределение радиальных напряжений σ_r в зависимости от полярного угла $0^\circ \leq \theta \leq \alpha = 45^\circ$ для разных углов наклона $\beta^\circ \leq 45^\circ$ погонной нагрузки q

Данный вариант распределения радиальных напряжений как нельзя лучше характеризует условия нагружения острого клиновидного инструмента со стороны разрушаемого массива, который в расчётной схеме можно рассматривать как объект, создающий погонную нагрузку на клин. Такая трактовка полученных результатов позволяет судить также о степени концентрации напряжений на гранях клиновидного режущего инструмента. При этом чем больше его угол заострения и угол наклона к объекту разрушения, тем выше уровень напряжений на его гранях. Это позволяет определять прочные параметры горного инструмента.

Решим задачу нахождения максимума радиальных напряжений в зависимости от угла α раскрытия клиновидного пространства и угла β наклона приложенной нагрузки.

Для этого, используя зависимость (1), приравняем нулю частную производную радиальных напряжений σ_r по полярному углу θ и решим полученное уравнение относительно этого угла:

$$\sigma_r = \frac{q}{r} \left[\frac{\cos\theta \cdot \cos(\beta)}{\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} - \frac{\sin\theta \cdot \sin(\beta)}{\alpha - 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} \right], \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = 0, \quad \tau_{r\theta} = 0.$$

Опуская промежуточные преобразования, запишем окончательную формулу для определения угла, соответствующего максимальному радиальному напряжению σ_r :

$$\theta_m = \text{Arctg} \left[\frac{\alpha + 0,5 \sin(2\alpha)}{\alpha - 0,5 \sin(2\alpha)} \text{tg}(\beta) \right], \quad (4)$$

при этом физический смысл формулы сохраняется при соблюдении условия $\beta \leq \pi - \alpha$.

Как следует из (4), этот угол зависит не только от наклона погонной нагрузки β , но и от угла при вершине клина 2α , причём при $\alpha = \pi/2$ (т. е. когда клин вырождается в полупространство) всегда соблю-

дается условие $\theta_m = \beta$ и максимум радиального напряжения σ_r при вариации угла θ всегда расположен по линии действия погонной нагрузки.

Отметим ещё одну закономерность: если угол при вершине клина тупой ($\alpha > \pi/2$), то максимум σ_r отклоняется от линии действия нагрузки в сторону грани клина, в если клин острый ($\alpha < \pi/2$) — то к оси клина и тем больше, чем больше отличается клин от полупространства.

Результаты определения места нахождения максимума радиальных напряжений представлены на рисунке 6, из графиков которого ясно прослеживается упомянутая закономерность.

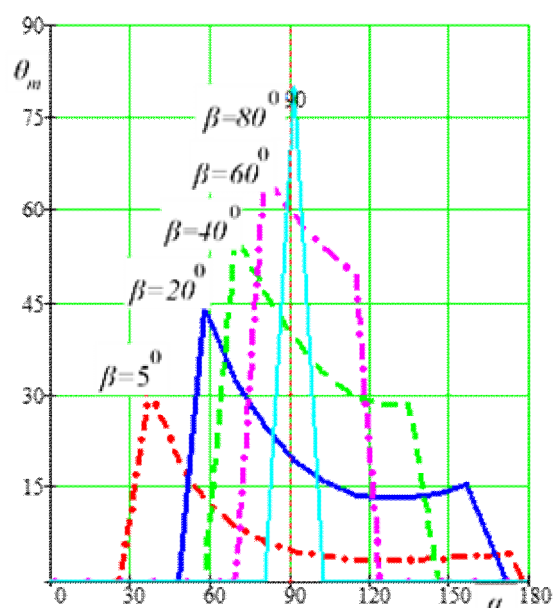


Рисунок 6 Графики зависимости угла θ_m максимума радиальных напряжений σ_r при изменении угла α для разных углов наклона β° погонной нагрузки q

Наиболее практически интересным случаем следует считать разрушение клиновидным раскалывающим инструментом породного полупространства ($\alpha = \pi/2$). Максимальное напряжение под клином всегда будет при его перпендикулярности поверхности породы, т. е. при $\beta = 0^\circ$.

Максимальное радиальное сжимающее напряжение при единичной погонной нагрузке $q = 1$ на глубине единичного радиуса $r = 1$ всегда равно $\sigma_r = 2 / \pi = 0,637$.

На этом можно завершить анализ НДС породного клина под действием погонной нагрузки. На следующем этапе исследований следует изучить особенности предразрушения породы расколом под клиновым режущим инструментом.

4 Феномен пинч-эффекта и раскол породы при сжатии

Рассмотрим поведение породы при одноосном сжатии, что соответствует изученному НДС под клином. Здесь мы сталкиваемся с необычным типом разрушения, когда при отсутствии растягивающих напряжений возникает раскол породы.

Этот феномен впервые обнаружил лауреат Нобелевской премии Р. У. Бриджмен. Он описал [12] ряд явлений, характерных для разрушения твёрдых тел при больших давлениях. Одно из этих явлений, названное им пинч-эффектом, состоит в следующем. Сплошной цилиндр подвергали давлению, действующему только на наружную цилиндрическую поверхность; торцы же оставляли без давления. Когда оно достигало определенной величины, цилиндр обычно раскалывался перпендикулярно образующей на диски.

Особенно показательное проявление пинч-эффекта при испытании на одноосное сжатие каменных материалов, в частности бетонных образцов и конструкций. Огромный накопленный экспериментальный материал при таких испытаниях в различных лабораториях убедительно свидетельствует о разрушении бетона при одноосном сжатии за счёт образования продольных трещин растяжения (рис. 7). Хотя теории прочности этого объяснить не могут и предсказывают разрушение только от трещин сдвига.

Тем самым было показано, что существующие теории прочности нуждаются в дополнении, когда необходимо делать

проверку на прочность материала при его разрушении по двум конкурирующим механизмам: либо от предельных деформаций сдвигов, вызывающих сдвиговые разрушения, либо от деформаций растяжения, ответственных за возникновение разрывов.



Рисунок 7 Разрушение от пинч-эффекта сжатой бетонной колонны в виде продольных трещин раскола

Отсюда следует заключить, что в условиях появления разрывов будет верна гипотеза наибольших линейных деформаций (вторая теория прочности). Гипотеза [12] впервые была предложена Э. Мариоттом (1682 г.), применялась Ж. Понселе и развита Б. Сен-Венаном в XIX в. Попытки экспериментальной проверки теории для всех видов разрушения были малоуспешны, и она перестала применяться в расчётной практике после начала прошлого века.

Гипотеза наибольших деформаций утверждает, что потеря несущей способности материала наступает, когда наибольшая деформация достигает предельного значения. Так, в частности, условие разрушения при сжатии хрупких материалов, таких как камень или чугун, определяется поперечным расширением [13].

В настоящее время становится понятным, что вторую теорию прочности отвергли из-за попыток распространить её условие на сдвиговые механизмы разрушения материалов, где она неприменима.

Используем вторую теорию прочности для расчёта пинч-эффекта при произвольном объёмном НДС материала. В отличие от обычной теории учтём, что порода, как правило, имеет разные упругие константы под действием напряжений разных знаков: модули линейной упругости ($E_p; E_c$) и коэффициенты Пуассона ($\nu_p; \nu_c$) различаются для растяжения и сжатия (индекс p и c соответственно). Это существенно усложняет задачу, поскольку необходимо учитывать разные упругие постоянные в зависимости от знака действующих в каждой точке материала напряжений.

Пусть в породе действует произвольное НДС с главными напряжениями $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Согласно обобщённому закону Гука запишем действующие в породе деформации в новой форме:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_\sigma} [\sigma_i - \nu_\sigma (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (5)$$

где ($i, j, k = 1, 2, 3$) — круговая перестановка индексов;

$$E_\sigma = \begin{cases} E_p \\ E_c \end{cases}; \quad \nu_\sigma = \begin{cases} \nu_p \\ \nu_c \end{cases} \quad \text{— упругие постоянные, соответствующие напряжениям сжатия и растяжения в данной точке.}$$

Определим возможность появления растягивающих деформаций. Из (5), согласно неравенствам $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, сразу следует, что это возможно лишь для $0 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$, откуда

$$\begin{aligned} \nu_c (\sigma_2 + \sigma_1) &\geq \sigma_3; \\ \nu_c (\sigma_3 + \sigma_1) &\geq \sigma_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Более вероятными являются растягивающие деформации из первого неравенства (6), которое следует рассматривать в

первую очередь для суждения о появлении возможных разрывов в плоскости, нормальной к этим деформациям. Учтём к тому же возможность такого НДС, когда для большинства практически значимых состояний соблюдаются условия $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$, что позволяет записать:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_p} - \frac{\nu_c}{E_c} (\sigma_2 + \sigma_1). \quad (7)$$

В случае, когда $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, а материал обладает различием упругих постоянных при растяжении и сжатии, получим более сложную формулу для деформаций растяжения по направлению σ_3 :

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_p} - \frac{\nu_c}{E_c} \sigma_1 - \frac{\nu_p}{E_p} \sigma_2. \quad (8)$$

Для нахождения критического главного напряжения, при котором возникает пинч-эффект, воспользуемся принципом эквивалентности. Согласно ему, следует найти такое эквивалентное растягивающее напряжение σ_p , которое создаёт такую же деформацию растяжения по заданному направлению, как и фактически действующая НДС.

Определим предельную растягивающую деформацию, при которой происходит такая раздвижка молекулярной решётки материала, которая вызывает её разрыв. Для этого воспользуемся экспериментальными данными испытаний материала на прямое одноосное растяжение:

$$[\varepsilon_p] = [\sigma_p] / E_p, \quad (9)$$

где $[\sigma_p]$ — показатель прочности породы на одноосное растяжение, Па;

$[\varepsilon_p]$ — предельная деформация растяжения, приводящая к разрыву по направлению ε_3 .

Из (8) и (9) получаем искомое соотношение для определения предельного значения наибольшего напряжения сжатия σ_1 , приводящего к деформации разрыва по направлению ε_3 при условии $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$:

$$\varepsilon_3 \leq -[\varepsilon_p] \quad (10)$$

$$[\sigma_3 - \nu_c(\sigma_2 + \sigma_1)]/E_c \leq -[\sigma_p]/E_p.$$

После простых преобразований получим окончательную формулу для определения максимального напряжения сжатия σ_1 , вызывающего разрывы материала вдоль линии своего действия по направлению минимального главного напряжения σ_3 :

$$\sigma_1 \geq \left\{ \sigma_3 + \frac{E_c}{E_p} [\sigma_p] \right\} \frac{1}{\nu_c} - \sigma_2. \quad (11)$$

Если среднее главное напряжение является растягивающим $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, необходимо использовать формулу (8), что несколько изменяет окончательную формулу (11), которая принимает вид:

$$\sigma_1 \geq \left[\frac{\sigma_3}{E_c} + \frac{[\sigma_p]}{E_p} - \nu_p \frac{\sigma_2}{E_p} \right] \frac{E_c}{\nu_c}. \quad (12)$$

Таким образом, полученные формулы (11) и (12) позволяют при любом НДС в точке нагруженного материала найти условия, для которых возможны проявления пинч-эффекта. Из формул следует, что чем большими будут напряжения сжатия $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$, тем более вероятно появление феномена пинч-эффекта в виде трещин раскола, нормальных к направлению минимального главного напряжения. Заметим, что разрывы могут возникать даже тогда, когда все напряжения будут сжимающими.

После внимательного анализа многих физико-механических процессов, связанных с разрушением пород при ведении горных работ [15], можно заключить, что пинч-эффект имеет значительное, а иногда и определяющее влияние на их протекание во времени и пространстве.

Кратко перечислим основные явления и процессы в горном деле, где следует учитывать существенное влияние пинч-эффекта:

- механическое разрушение пород рабочими органами горных машин, вооружённых горным инструментом режуще-

скальывающего, дробящего, раскальывающего или раздавливающего действия;

- динамическое спонтанное трещинообразование и выбросы пород и газа при ведении проходческих и выемочных работ;

- образование трещин отрыва вдоль породных обнажений в боках и кровле горных выработок при проявлениях горного давления;

- процесс раскола кернов на диски при керновом бурении в массиве горных пород как предвестник горных ударов и выбросов;

- образование продольных трещин отрыва параллельно породным обнажениям бортов карьеров, что снижает их устойчивость;

- определение показателя прочности горных пород бразильским методом путём раздавливания керна;

- явление отжима и раздавливания краевой части угольного пласта в очистных забоях и подготовительных выработках;

- отколы породы от груди проходческих забоев при буровзрывном и комбайновом способе проведения горных выработок;

- разрушение трещинами раскола центрально и внецентренно сжатых бетонных, железобетонных и каменных конструкций;

- работы по откалыванию камня в промышленных и иных целях (каменоломни, работа скульптора и каменотёса, а в доисторическую эпоху — изготовление каменных ножей и стрел из кремния и обсидиана) и др.

Каждый из перечисленных физических горных процессов нуждается в самостоятельном исследовании с учётом влияния пинч-эффекта, что способно существенно раздвинуть границы нашего их понимания, объяснения, прогнозирования и возможности использования для повышения эффективности добычи сырьевых ресурсов и подземного строительства.

5 Разрушение при сжатии с учётом пинч-эффекта

Применительно к описанию предразрушения породы под воздействием клинового инструмента рассмотрим несколько показательных примеров.

Самым простым и в то же время распространённым на практике примером являются испытания искусственных и естественных каменных материалов на одноосное сжатие. В таких испытаниях создают однородное НДС во всём образце при условии устранения трения на его торцах, контактирующих с плитами пресса. Испытания проводят при НДС по схеме Кармана: $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$, положив $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, т. е. когда параметр Лоде-Надаи оказывается равным

$$\mu_0 = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = -1. \quad (13)$$

Подставляя в (11) исходные данные для НДС при одноосном сжатии, находим условия образования в образце продольных трещин разрыва:

$$\sigma_1 \geq \frac{1}{\nu_c} \frac{E_c}{E_p} [\sigma_p] \quad (14)$$

Если принять во внимание, что, согласно экспериментальным данным, соотношение модулей деформаций при сжатии и растяжении для каменных материалов и горных пород находится в пределах $E_c/E_p \approx 1,1 \dots 2,5$, а коэффициент Пуассона $\nu_c \approx 0,2 \dots 0,4$, то условие проявления пинч-эффекта выразится неравенством $\sigma_1 \geq (3 \dots 10)[\sigma_p]$.

Поскольку для горных пород соотношение прочностей на одноосное сжатие $[\sigma_c]$ и растяжение $[\sigma_p]$ почти всегда удовлетворяет этому неравенству $[\sigma_c] > 10[\sigma_p]$, можно сделать вывод о почти повсеместном разрушении породы при одноосном и даже объёмном сжатии от продольных трещин разрыва. Тем самым получают объяснение и количественное подтверждение особенности разрушения пород при сжатии трещинами раскола (феномен пинч-эффекта), что позволяет считать поставленную проблему решённой.

Представляет определённый интерес оценка особенностей разрушения пород

при НДС, соответствующем обобщённому сжатию $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$, когда порода нагружена по схеме Бекера, а параметр Лоде-Надани, согласно (13), равен $\mu_0 = 1$.

Подставляя его в (11), получим второе граничное неравенство для оценки возможности разрушения от продольных трещин разрыва:

$$\sigma_1 \geq \frac{1}{2\nu_c} \frac{E_c}{E_p} [\sigma_p]. \quad (15)$$

Таким образом, при объёмном НДС по схеме Бекера (обобщённое сжатие $\mu_0 = 1$) вероятность разрушения породы от продольных трещин (пинч-эффект) увеличивается ровно в два раза. Все остальные НДС, в которых может оказаться порода, находятся между этими крайними случаями Кармана и Бекера, т. е. обобщённого растяжения или сжатия.

Следовательно, можно сделать вывод, что чем большее значение приобретает промежуточное напряжение σ_2 , тем условия для возникновения продольных трещин разрыва улучшаются.

Остальные промежуточные варианты НДС $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ рассматриваются аналогично и трудностей не представляют.

6 Предразрушение пород под клиновым инструментом с учётом пинч-эффекта

Завершив изучение закономерностей появления трещин раскола при сжатии горных пород и хрупких каменных материалов, у которых $\sigma_1 \geq (3 \dots 10)[\sigma_p]$, можно перейти к решению частной, но практически важной задачи о появлении под клиновым инструментом разрывных трещин предразрушения.

Для определения глубины h_c трещины под клином в самом общем случае воспользуемся формулой (1) с учётом результатов, полученных в (14), если полагать, что напряжения под клином удовлетворяют равенствам $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$:

$$h_c = v \frac{E_p}{E_c} \frac{q}{[\sigma_p]} \left[\frac{\cos\theta \cdot \cos(\beta)}{\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} - \frac{\sin\theta \cdot \sin\beta}{\alpha - 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} \right]. \quad (16)$$

Полученная зависимость позволяет определить глубину h_c трещины раскола под клином с учётом возможного изменения формы клинового породного пространства, задаваемого углом $0 \leq \alpha \leq \pi$, при произвольном угле $0 \leq \beta \leq \pi$ наклона погонной нагрузки q . Причём если погонная нагрузка приложена под углом $\pi/2 \leq \beta \leq \pi$, то клиновой массив оказывается под действием растяжения, что хотя и расширяет область применения формулы (16), но пока не имеет видимого практического значения. Как следует из (16), глубина h_c раскола прямо пропорциональна величине погонной нагрузки q и обратно пропорциональна показателю прочности материала на одноосное растяжение $[\sigma_p]$.

Предыдущий анализ показал, что наиболее эффективным клиновым разрушающим инструментом является симметричный клин с углом заострения при вершине, равным $15...20^\circ$, который воздействует на плоский породный забой по нормали к его поверхности (рис. 8).

Для такого варианта воздействия клинового инструмента на породу в формуле (16) следует принять угол породного клинового пространства $\alpha = \pi/2$, угол отклонения оси клинового инструмента от нормали к породному массиву $\beta = 0$. Тогда формула значительно упростится и примет окончательный вид:

$$h_c = \frac{2}{\pi} v \frac{E_p}{E_c} \frac{q}{[\sigma_p]} \cos\theta. \quad (17)$$

Из (17) следует, что наибольшая трещина формируется вдоль погонной нагрузки по нормали к породной поверхности, т. е. когда $\cos\theta = 1$, $\theta = \beta = 0$.

Рассмотрим численный пример. Пусть к породному забою посредством клинового инструмента приложена погонная нагрузка $q = 100$ кГ/см. Породный забой сложен из слоёв алевролита со следующими физико-механическими показателями [14]:

- прочность на одноосное растяжение $[\sigma_p] = 1,2$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$;
- модули Юнга $E_p = 0,8E_c = 10^4$ МПа.

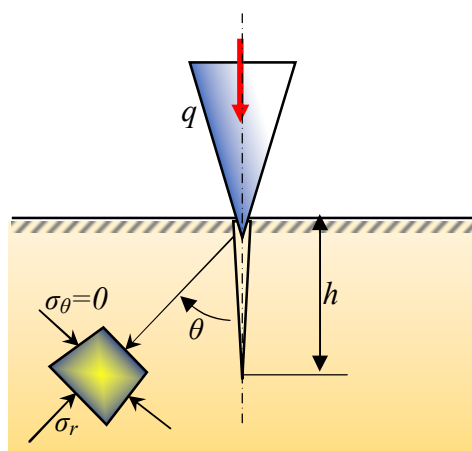


Рисунок 8 Предразрушение породного массива трещинами разрыва под действием клинового инструмента

После подстановки этих исходных данных в результирующую формулу (17), получим:

$$h_c = \frac{2}{\pi} \cdot 0,25 \cdot 0,8 \frac{100}{12} \cos 0 = 1,06 \text{ см.} \quad (18)$$

Если погонная нагрузка q будет приложена не статически, что редко бывает на практике, а динамически посредством удара клинового инструмента по породному забою, то, с учётом минимального значения коэффициента динамичности $K_d = 2$, глубина проникновения трещины разрыва вглубь массива удвоится и составит

$$h_d = 2h_c = 2 \cdot 1,06 \text{ см} = 2,12 \text{ см} = 21,2 \text{ мм.}$$

Это достаточно ощутимое ослабление породного массива в забое, которое за счёт

проникновения разрывных трещин способствует значительному увеличению эффективности механического разрушения пород клиновым режущим инструментом путём сдвигового выкола на последующем этапе.

Представляет интерес рассмотрение особенностей разрушения пород клином в угловой области породного забоя (рис. 9). Вновь воспользуемся формулой (1), в которую следует подставить соответствующие исходные данные: угол породного пространства $\alpha = 135 = 3\pi/4$ и угол наклона погонной нагрузки к центральной оси породного клина $\beta = 45 = \pi/4$.

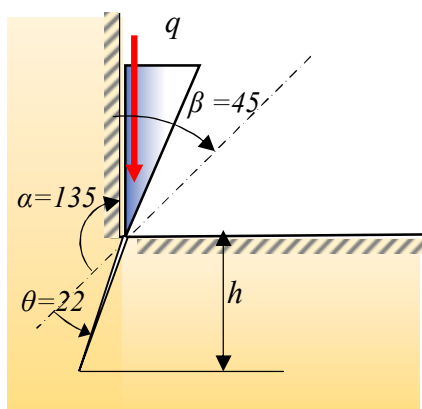


Рисунок 9 Предразрушение пород клином в угловой области забоя

Для принятых исходных угловых данных глубину трещины разрыва, возникающей под клиновым инструментом, в общем случае для произвольного полярного угла θ можно определить (опуская промежуточные преобразования) по формуле:

$$h(\theta)_c = 0,562 \cdot v \frac{E_p}{E_c} \frac{q}{[\sigma_p]} \cos(\theta + 22). \quad (19)$$

Наибольшая глубина трещины, как следует из (19), реализуется при полярном угле $\theta_m = -22^\circ$ и равна при статической погонной нагрузке

$$h_c = 0,562 \cdot 0,25 \cdot 0,8 \frac{100}{12} = 0,375 \text{ см.}$$

При ударном воздействии на породу глубина трещины увеличится с учётом коэффициента динамичности $K_d=2$ по крайней мере вдвое:

$$h_d = 2h_c = 2 \cdot 0,375 \text{ см} = 7,5 \text{ мм.}$$

Как видим, эта глубина примерно втрое меньше глубины трещины разрыва при воздействии клинового инструмента на плоскую поверхность породного забоя: $7,5 \text{ мм} < 21,2 \text{ мм}$.

Следует обратить внимание, что трещина из угловой части забоя направлена в породный массив. Значит, размер породного забоя в проходке будет всегда больше внешнего периметра кольцевого клинового инструмента, и его торможение и «заклинивание» боковыми породами будет исключено. Это открывает перспективную возможность пересмотреть вид и форму вооружения рабочих органов горных машин.

Использование предложенной методики определения размеров разрушения породы можно без труда распространить и на другие геометрические и силовые параметры разрушения пород.

Если после возникновения первой трещины продолжить рассмотрение механизма разрушения возникших угловых участков породного клина, отделённых друг от друга первичной трещиной раскола, то, используя ту же методику расчёта, можно проследить за прорастанием и ветвлением трещин второго, третьего и более высоких порядков.

На рисунке 10 показана расчётная схема математической модели образования трещин последующих иерархий.

Первая трещина разделяет породный массив на две области в форме прямоугольных породных клиньев. На каждую угловую вершину этих областей воздействует своей боковой гранью клиновой инструмент, а приложенная к нему погонная нагрузка q распределяется по его граням и раскладывается на две составляющие $q_s > q$.

Угол наклона φ этих погонных нагрузок q_s определяется с учётом угла заострения

клинового инструмента γ и угла трения φ_m между его гранью и породой по формуле:

$$\varphi = 45^\circ - \varphi_m - \gamma.$$

Если, например, $\varphi_m = 30^\circ$, а $\gamma = 15^\circ$, то мы получим угол распространения вторичной трещины примерно посередине прямоугольного породного клина, т. е. $\varphi = 0$ (рис. 10). Для этого случая графики распределения радиальных напряжений в прямоугольном породном выступе представлены на рисунке 5. При этом радиальные напряжения будут значительно выше (на 40–70 %), чем в случае раскола плоской породной поверхности, что облегчит образование такой трещины.

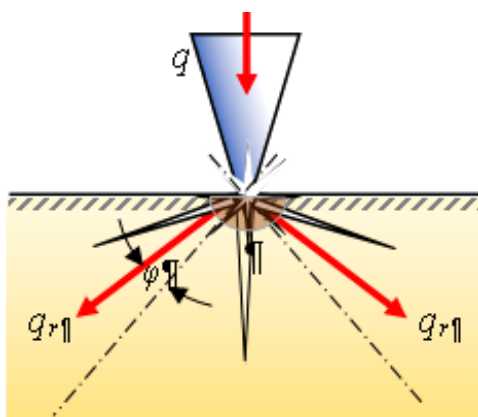


Рисунок 10 Образование трещин раскола более высокого порядка под клиновым инструментом

Образование трещин раскола второго, третьего и т. д. порядков можно определять по этой же методике, при этом условия образования трещин раскола (иными словами, «расщепление массива») становятся всё более легкими.

Однако на практике такое «расщепление» породы под клиновым инструментом вряд ли будет наблюдаться. На самом деле процесс «расщепления» вершин породных клиньев трещинами отрыва будет замещён новым процессом — раздавливанием уголков породных клиньев гранями горного инструмента.

Действительно, после предразрушения трещинами раскола области возле вершин породных клиньев окажутся под действием сжимающих радиальных напряжений высокой концентрации. Концентрация будет тем больше, чем острее вершины породных клиньев.

Таким образом, на этапе предразрушения конкурируют два процесса измельчения породы:

1) разрушение от одноосного растяжения трещинами раскола, вызванное пинч-эффектом;

2) разрушение от одноосного сжатия предвершинной области возникающих породных клиньев, приводящее к смятию и переизмельчению породы возле вершин породных клиньев и создающее зону мелкодроблённых пород.

Размер зоны переизмельчения можно определить, поскольку из предложенной математической модели пинч-эффекта после раскола породы легко найти углы при вершинах образованных породных клиньев и сжимающие радиальные напряжения в области этих вершин.

С некоторым вполне допустимым приближением ($\pm 10\%$) определяем радиус зоны переизмельчения под инструментом по формуле:

$$r_c = \frac{q}{\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)} \cdot \frac{q}{[\sigma_c]}, \quad (20)$$

где 2α — угол при вершине расщеплённых пинч-эффектом породных клиньев.

Как следует из (20), чем меньше угол α , тем больше радиус зоны переизмельчения r_c , что прекращает появление новых трещин раскола, и наступает последний этап разрушения в виде выкола породы путём сдвигающих усилий от граней клинового горного инструмента [10].

Важно ещё раз отметить, что образование трещин разрыва в породах происходит не всегда, поскольку строго ограничено возможностью появления пинч-эффекта, т. е. только в тех породах, у которых соот-

ношение показателей прочности на одноосно сжатие и растяжение удовлетворяет базовому равенству

$$[\sigma_c] \geq (3 \dots 10)[\sigma_p],$$

где числовые коэффициенты зависят от упругих постоянных и НДС породного массива.

Отсюда следует, что пинч-эффект не будет наблюдаться в пластичных однородных материалах (глина, мергель, сталь и др.), если их не подвергнуть искусственному «охрупчиванию», например, для пластичных пород — глубокому охлаждению жидким азотом при специальных способах сооружения горных выработок.

Полученные результаты могут быть использованы для конструирования и расчёта параметров существующих и новых конструкций бурового оборудования: буровых коронок, лопастных долот, разнообразных шарошек зубчатого и дискового типа и др.

Выводы

На основании проведённых исследований проявлений феномена пинч-эффекта в горных породах и хрупких материалах получены следующие результаты:

1. Поставлена, обоснована и сформулирована математическая модель о плосконапряженном состоянии породного клина в полярной системе координат, изучены закономерности НДС.

2. Выполнен анализ закономерностей НДС породного клина при действии произвольно ориентированной погонной нагрузки.

3. Впервые исследована локализация максимума радиальных напряжений в зависимости от угла раскрытия клинового пространства и наклона погонной нагрузки, установлен факт и условия отклонения максимума напряжений от направления погонной нагрузки.

4. Впервые установлено, что максимальное воздействие на плоскую породную поверхность оказывает клиновой инструмент, направленный по нормали к ней.

5. Рассмотрен феномен пинч-эффекта, приводящего к расколу материала, при разных вариантах его объёмного НДС: от обобщённого растяжения (схема нагружения Кармана, когда параметр Лоде $\mu = -1$) и обобщённого сжатия (схема нагружения Бекера, когда параметр Лоде $\mu = +1$).

6. Впервые предложена математическая модель пинч-эффекта, основанная на рассмотрении предельных деформаций растяжения по главным площадкам НДС в точке, получены аналитические зависимости для их расчёта. Установлены условия появления феномена пинч-эффекта в зависимости от упругих постоянных и прочности породы при одноосных растяжении и сжатии.

7. На основании анализа совокупности известных горных технологий впервые дан их перечень, где возможно существенное влияние на физический процесс феномена пинч-эффекта, что открывает новые перспективные направления исследований физических процессов горного производства.

8. Рассмотрена ранее теоретически необъяснимая особенность продольного раскола породных образцов при их сжатии и доказана определяющая роль в этом феномена пинч-эффекта. Установлены критерии его проявлений.

9. Изучены закономерности проявлений феномена пинч-эффекта и впервые определены условия образования трещин раскола, наклон и глубины их проникновения в породу при действии клинового горного инструмента на плоское и угловое по форме породное обнажение в забое.

Результаты исследований направлены на развитие теории и методов проектирования эффективных параметров разрушения пород горными инструментами. Базовые положения могут быть использованы как теоретические основы геомеханики разрушения пород, в том числе в учебном процессе при подготовке инженеров и аспирантов горных специальностей.

Библиографический список

1. Крапивин, М. Г. Горные инструменты [Текст] / М. Г. Крапивин, И. Я. Раков, Н. И. Сысоев. — 3-е изд. — М. : Недра, 1990. — 256 с.
2. Буткин, В. Д. Буровые машины и инструменты [Текст] : учеб. пособие / В. Д. Буткин, И. И. Демченко. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. — 120 с.
3. Hua Guo. Rock cutting studies using fracture mechanics principles [Text] / Hua Guo // Doctor of Philosophy thesis. — Wollongong, Australia : University of Wollongong, 1990. — 223 p.
4. Абатуров, В. Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент [Текст] / В. Г. Абатуров. — Тюмень : Нефтегазовый университет, 2007. — 269 с.
5. Lundberg. Efficiency of percussive drilling with extension rods [Text] / Lundberg // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. — August 1987. — Issue 4, Volume 24. — P. 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. — November 1966. — Issue 4, Volume 3. — P. 265–278.
7. Крюков, Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании [Текст]. Т. 1. / Г. М. Крюков. — М. : Горная книга, 2006. — 330 с.
8. Латышев, О. Г. Разрушение горных пород [Текст] / О. Г. Латышев. — М. : Теплотехник, 2007. — 672 с.
9. Нескоромных, В. В. Разрушение горных пород при бурении скважин [Текст] / В. В. Нескоромных. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа, 2014. — 335 с.
10. Литвинский, Г. Г. Основы теории резания и разрушения горных пород [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 8 (51). — С. 5–15.
11. Лурье, А. И. Теория упругости [Текст] / А. И. Лурье. — М. : Наука, 1970. — 940 с.
12. Бриджмен, П. У. Физика высоких давлений [Текст] / П. У. Бриджмен. — М., Л. : ОНТИ, 1935. — 402 с.
13. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
14. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород [Текст]: справочное пособие / М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер, Е. И. Ильницкая и др. — М. : Недра, 1981. — 192 с.
15. Литвинский, Г. Г. Основы горной геомеханики. Т. 1. Механические свойства горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — 312 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГМ ДонНТУ Борщевским С. В.,
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.**

Статья поступила в редакцию 14.03.18.

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

ПІНЧ-ЕФЕКТ ПРИ РУЙНУВАННІ ПОРІД КЛИНОВИМ ГІРСЬКИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Освоєння підземного простору і видобуток сировинних ресурсів вимагають застосування різноманітних технологій, гірських машин і інструментів для руйнування порід. Це стримується відсутністю теоретичних основ геомеханіки руйнування. Дана робота націлена на створення теорії руйнування порід клиновим гірським інструментом. Основна ідея роботи полягає у використанні феномена пінч-ефекту для визначення параметрів тріщин розколу при стисненні гірської породи. Розглянуто задачу теорії пружності Фламана про стиснення плоского клина погонним навантаженням, що прикладається до його вершини. Вивчено особливості напружено-

деформованого стану (НДС) в породному клині. Вперше теоретично обґрунтовано феномен пінч-ефекту при різних типах НДС. Отримано розрахункові формули проявів пінч-ефекту (глибина і нахил тріщин відриву) під лезом клинового інструмента при плоскому та кутовому породному оголенні. Результати досліджень розвивають теоретичні основи геомеханіки руйнування порід гірським інструментом.

Ключові слова: пінч-ефект, теорія різання, гірський інструмент, задача Фламана, напружений стан, етапи руйнування, модель розколу, тріщина розколу, глибина і нахил тріщини.

Prof. Litvinskiy G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

PINCH-EFFECT IN THE ROCK BREAKING BY THE WEDGE CUTTING TOOL

Development of underground space and extraction of mineral resource involve using a variety of technologies, mining machines and tools for rock breaking and cutting. This is constrained by absence theoretical foundations for breaking geomechanics. This work is aimed at the creation of the theory of rock breaking by wedge cutting tool. The main idea of the work is based on using the phenomenon of pinch-effect for compressing rocks to determine the parameters of cracks split. The Flamant's problem of the elasticity theory on compressing the rock wedge by load applied to its vertex is considered.

The features of the stress-strain state in the rock wedge have been studied. For the first time it has been theoretically justified the phenomenon of pinch-effect for different types of stress state. The calculated formulas for pinch-effect manifestations (the depth and slope of the cracks in the detachment) under the blade of the wedge tool for flat and angular rock outcrops are obtained. The results of the research develop the theoretical foundations of geomechanics of rock breaking by cutting tools.

Key words: pinch-effect, theory of cutting, cutting tool, Flamant's problem, stress-strain state, stages of rock destruction, model of the rock split, split crack, fissure depth and slope.