

УДК622.236.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СКАЛЫВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ РЕЗАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

ВАСИЛЬЕВ Л. М.¹, *д. т. н, проф.*,
МАЛИЧ Н. Г.², *к.т.н., доц.*,
НАЗАРОВ А. Е.³, *инженер.*

¹ Отдел проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, 496006, г. Днепр, Украина, тел. +38(066)4423128, e-mail: office.igtm@nas.gov.ua

² Кафедра колесных и гусеничных транспортных средств, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38(050)3202287, e-mail: 021800@mail.ru

³ Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, 496006, г. Днепр, Украина, тел. +38(066)4423128, e-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Аннотация. Постановка проблемы. Одним из эффективных способов разрушения горных пород для снижения энергоемкости процесса является резание горных пород. Поиск рациональных параметров воздействия резца на массив, изучение влияния стружкообразования и исследование условий развития трещин и сегодня является актуальным. **Постановка задачи.** Разработка модели процесса скола элементов стружки при внедрении резца в массив с целью снижения общей силы резания и энергозатрат процесса. **Выводы.** Проведенное аналитическое моделирование процесса скола, стружкообразования и экспериментальные исследования показывают, что значения начального и конечного углов скола находятся в зависимости от угла воздействия резца. Линия скола является не прямолинейной, а имеет ярко выраженный участок перегиба, причем продольное сечение лунки скола имеет выпуклую в сторону открытой поверхности форму. Процесс отделения элемента стружки в начальный момент происходит за счет напряжений среза, а в последующий - за счет напряжений отрыва.

Ключевые слова: разрушение, горные породы, процесс резания, развитие трещины, моделирование, экспериментальные исследования, углецементный блок.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СКОЛЮВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ТРІЩИНИ ПРИ РІЗАННІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

ВАСИЛЬЄВ Л. М.¹, *д. т. н, проф.*,
МАЛІЧ М. Г.², *к.т.н., доц.*,
НАЗАРОВ О. Є.³, *інженер.*

¹ Відділ проблем руйнування гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, вул. Симферопольська, 2а, 496006, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 4423128, e-mail: office.igtm@nas.gov.ua

² Кафедра колісних і гусеничних і транспортних засобів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 3202287, e-mail: 021800@mail.ru

³ Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, вул. Симферопольська, 2а, 496006, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 4423128, e-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Анотація. Постановка проблеми. Одним із шляхів ефективного руйнування гірських порід зі зменшенням енергоємності процесу є різання гірських порід. Пошук раціональних параметрів впливу різця на масив, вивчення впливу стружки і дослідження умов розвитку тріщин і сьогодні є актуальним. **Постановка задачі.** Розробка моделі процесу відколу елементів стружки при впровадженні різця в масив з метою зниження загальної сили різання і енерговитрат процесу. **Висновки.** Проведене аналітичне моделювання процесу відколу, появи стружки і експериментальні дослідження показують, що значення початкового та кінцевого кутів відколу знаходяться в залежності від кута дії різця. Лінія відколу є не прямолінійною, а має яскраво виражену ділянку перегину, причому подовжній перетин лунки відколу має опуклу в бік відкритої поверхні форму. Процес відділення елемента стружки в початковий момент відбувається за рахунок напружень різі, а в наступний - за рахунок напружень відриву.

Ключові слова: руйнування, гірські породи, процес різання, розвиток тріщини, моделювання, експериментальні дослідження, углецементний блок.

MODELING OF THE PROCESS OF SCALING AND CRACKING DEVELOPMENT IN CUTTING ROCK ROCKS

VASILIEV L. M.¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
MALICH M. G.², *Ph.D., Assoc. Prof.*
NAZAROV A. E.³, *Engineer.*

¹ Division of rock, Institute of Geotechnical Mechanics. NS Polyakov Sciences of Ukraine, ul. Simferopol, 2a, 496,006 m Dnepr, Ukraine, tel. +38 (066) 4423128 e mail: office.igtm@nas.gov.ua

² Department tracked and wheeled and tracked vehicles, National Metallurgical Academy of Ukraine, pr. Gagarina, 4, 49600, Dnepr, Ukraine, tel. +38 (050)3202287, e-mail: 021800@mail.ru

³ Institute of Geotechnical Mechanics. NS Polyakov Sciences of Ukraine, ul. Simferopol, 2a, 496,006 m Dnepr, Ukraine, tel. +38 (066) 4423128 e mail: office.igtm@nas.gov.ua

Annotation. Formulation of the problem. One of the ways to effectively destroy rocks and reduce the energy intensity of the process is cutting of rocks. The search for rational parameters impact of the tool on the massif, the effect of chip formation and the study of the conditions for the development of cracks are still relevant today. **Formulation of the problem.** The development of a model for the chip formation process when the tool is inserted into the massif in order to reduce the total cutting force and the energy consumption of the process. **Conclusions.** The analytical modeling of the cleavage process, chip formation and experimental studies show that the values of the initial and final cleavage angles are in dependence of the angle of impact of the tool. The cleavage line is not rectilinear, but has a pronounced portion of inflection, the longitudinal section of the cleavage socket having a convex shape towards the open surface. The process of separating the chip element at the initial moment occurs due to the shear stress, and in the subsequent due to the tear voltage.

Key words: destruction, rocks, process of cutting, crack development, modeling, experimental studies, coal-cement block.

Постановка проблемы. Вопросы повышения производительности горнодобывающих машин тесно связаны с повышением эффективности и уменьшением энергоемкости процесса разрушения горных пород. Резание горных пород обладает рядом существенных достоинств по простоте, малой энергоемкости и экономичности разрушения. Вместе с тем, вопросы выбора рациональных параметров воздействия резца на массив, влияние стружкообразования и исследование условий развития трещин остаются актуальными.

Постановка задачи. Задачей работы является разработка модели процесса скола элементов стружки при внедрении резца в массив с целью снижения общей силы резания и энергозатрат процесса.

Основная часть. Моделирование большинства технологических процессов проводят на микро- и макроуровнях, различающихся степенью детализации рассмотрения процессов в объекте. Точно математически описать все процессы воздействия на сплошную среду сложно, поэтому рассмотрим возможность построения приближенной дискретной модели путем анализа явлений, протекающих при резании горных пород. Анализ проведем с учетом результатов экспериментальных исследований и с привлечением известных положений механики разрушения, позволяющих установить общие закономерности механизма стружкообразования и развития трещины между скалываемым слоем и цельным массивом хрупкой породы.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, обеспечивающем визуальное наблюдение процесса отделения элемента стружки и предохранение от повреждений поверхности лунки скола. Анализ поверхностей разреза между элементами стружки и массивом производился по слепкам, полученным путем заполнения пластилином (вместо элементов стружки) лунок скола заподлицо с открытой поверхностью. Пластилиновые слепки, в отличие от элементов стружки позволяли осуществить обмер поверхностей разрушения практически в любом сечении, так как они легко разрезаются без повреждения обмеряемых поверхностей. Силовые показатели процесса резания фиксировались на компьютере через трехкомпонентный тензометрический динамометр. Резанию подвергались углещементные блоки. Пределы их прочности на сжатие и растяжение определялись комплексным методом и составили $\sigma_{сж} = 12,8 \text{ МПа}$; $\sigma_{р} = 1 \text{ МПа}$ коэффициент внутреннего трения $\varphi = 26^\circ$. Коэффициент Пуассона определялся на приборе ДУК-20 и составил $\mu = 0,38$.

Качественно рассматривая процесс резания, видно как режущая кромка резца вступает в контакт со срезаемым слоем на небольшой площади. В этой области возникают большие местные напряжения сжатия, приводящие к разрушению породы на мелкие частицы на контакте с резцом. По мере дальнейшего движения резца в массиве возникает зона сжатия в виде конуса с основанием на передней грани резца, а

раздробленные частицы образуют так называемое пылевое ядро или ядро уплотнения [1].

В ходе экспериментов после скола единичного элемента стружки иногда удавалось сохранить ядро уплотнения, которое имело угловатые, резко очерченные контуры и при легком прикосновении рассыпалось на пылевидные частички.

При резании процесс образования ядра уплотнения длится, до тех пор, пока в предрезцовом пространстве не появится трещина, распространяющаяся в сторону обнажения под углом β_H относительно плоскости резания. После возникновения трещины наблюдалось спонтанное отделение элемента стружки от массива. Сколотые куски в местах разреза с массивом имели в продольном сечении, перпендикулярном плоскости резания, криволинейную форму. Поэтому в отличие от известных работ в области резания, где угол β_H принимается постоянным по всей линии скола, нами под β_H принимался угол скола в начальной области предрезцовой зоны, непосредственно примыкающей к режущей кромке резца. Угол скола под которым трещина выходила на открытую поверхность, обозначали через β_K .

Угол скола β_H определялся через угол действия, который равен $\omega = v - \gamma$, где v - угол трения элемента стружки по передней поверхности резца; γ - передний угол резца. Зависимость между углом действия ω и углом скола β_H выражается формулой К. А. Зворыкина

$$2\beta_H + \omega = C, \quad (1)$$

где C — постоянная величина.

Необходимое для расчета значение угла трения находим по зависимости [2]

$$v = \gamma - \arctg\left(\frac{Y}{Z}\right), \quad (2)$$

где Y и Z — соответственно усилие подачи и сила резания в момент скола.

По полученным в процессе эксперимента данным были построены зависимости углов скола β_H и β_K , угла трения v , длины скола $l_{ск}$ элемента стружки и силы резания Z от γ - переднего угла резца. По экспериментально полученным усредненным данным (рис. 1) находим, $C = 76 - 78^\circ$. Интересно отметить, что для стали и чугуна эта величина также близка к значению $75 - 80^\circ$ [2].

Используя формулу Зворыкина и экспериментальные данные, по резанию углещемента блока записываем уравнение (1) в следующем виде $2\beta_H + \omega = 78^\circ$. Эта формула устанавливает однозначную взаимосвязь между β_H и ω .

С увеличением угла действия наблюдается уменьшение угла скола, сопровождающееся возрастанием степени деформации срезаемого слоя, увеличением площади скалывания, а соответственно и силы резания (рис. 2). Путем проецирования сил, действующих на единичный элемент стружки, на оси координат (ось абсцисс направлена вдоль начальной линии скола, ось ординат — вглубь массива) получим формулу для

определения силы трения

$$Z_{тр} = [tg \varphi tg (\beta_H + v - \gamma)]Z. \quad (3)$$

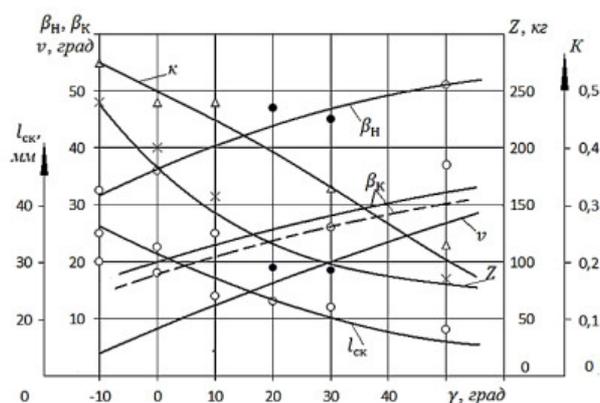


Рис. 1. Зависимость β_H и β_K угла (v), ($l_{ск}$) элемента стружки и силы резания от переднего угла резца, мм

Обозначив произведение тангенсов через κ , построим его значение по полученным экспериментальным данным (см. рис.1). Из графика видно, что доля трения в общей силе резания доходит до значения 50% и более, при этом с увеличением переднего угла составляющая трения уменьшается. Важно отметить, что путем изменения величин, входящих в формулу (3), можно добиться резкого снижения общей силы резания.

Для выяснения, в какой степени трение породы по передней грани резца влияет на величину уплотненного ядра, проводились эксперименты по резанию блока резцами с передней гранью, смазанной минеральным маслом и без смазки. Оценка размеров ядер уплотнения производилась по углам β_H . Было установлено, что при смазке передней грани резца существенно уменьшается пылевое ядро. Также на 30 - 40% уменьшается сила резания, при этом угол β_H увеличивается на 30 - 35%.

Расчетные данные силы трения по формуле (3) показали, что в процентном отношении затраты на трение от силы Z , сохранились на прежнем уровне.

Факт снижения общей силы резания Z при смазке объясняется уменьшением площади среза, которая в свою очередь является функцией угла скола. Угол скола также в процессе формирования единичного элемента стружки увеличился, так как за счет снижения коэффициента трения γ уменьшился угол действия ω .

Теперь рассмотрим траекторию движения вершины трещины в скальваемом слое. После образования трещины среза вследствие возникновения концентратора напряжений в ее вершине происходит резкое изменение вида напряженного состояния в предрезцовом пространстве.

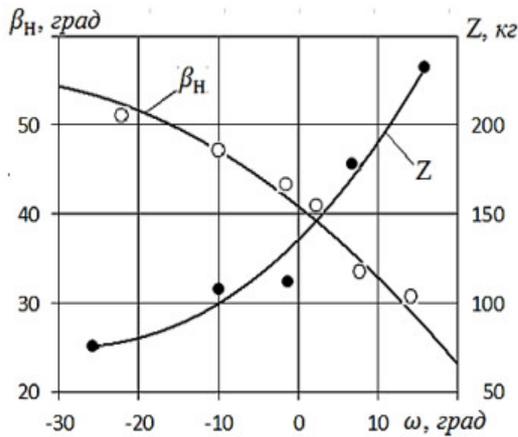


Рис. 2. Влияние угла действия на начальные углы скола (β_Н) и силу резания (Z)

Процесс отделения элемента стружки от массива в этом случае можно объяснить законами распространения трещин и некоторыми положениями теории упругости.

Так как вид напряженного состояния в вершине трещины не зависит от абсолютной величины сил, действующих со стороны резца [3], то о характере процесса отделения элемента стружки можно судить по качественной оценке напряженного состояния в вершине трещины. Плоскость, ослабленную трещиной, рассматриваем как клин с углом в вершине $2\delta = 2\pi$ [4]. Для расчета напряжений составим систему уравнений, описывающих общее напряженное состояние в вершине трещины

$$\sigma_{2i} = \frac{R}{\pi r} \left[\frac{l}{r} \sin(\beta_{i-1} + \omega) \sin 2\theta - \cos(\beta_{i-1} + \omega - \theta) \right]; \quad (4)$$

$$\pi_{\theta i} = 0; \quad (5)$$

$$\tau_{r\theta i} = \frac{Rl}{2\pi r^2} \sin(\beta_{i-1} + \omega) \cos(2\theta - 1) \quad (6)$$

где σ_{ri} и $\tau_{r\theta i}$ – радиальные и касательные напряжения в вершине трещины для i -го участка предрезцового пространства; 0 и r полярные координаты; β_{i-1} угол наклона трещины у ее вершины относительно линии резания для $\beta - 1$ участка; l – длина трещины; R – результирующая сила, действующая на скальваемый элемент со стороны передней грани резца. Так как при решении задачи нас интересует относительное значение силы R , то принимаем ее равной 1.

Расчет главных напряжений перед фронтом трещины производим по известной формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \left[\sigma_r \pm \sqrt{\sigma_r^2 + 4\tau_{r\theta}^2} \right]. \quad (7)$$

Пользуясь условиями открытия и закрытия трещины [5]

$$\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha \geq 0; \quad (8)$$

$$\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_2 \cos^2 \alpha < 0, \quad (9)$$

где α – угол, образованный направлением растягивающих напряжений с плоскостью трещины, находим диапазон углов, в пределах которых открытие трещины наиболее вероятно, а

затем в этом диапазоне находим точку с максимальными растягивающими напряжениями. Посредством круга Мора определяем угол наклона главных площадок относительно трещины и направление ее дальнейшего распространения (рис.3) с учетом гипотезы начального распространения трещины в плоскости, для которой нормальные растягивающие напряжения имеют максимальное значение коэффициента интенсивности [5].

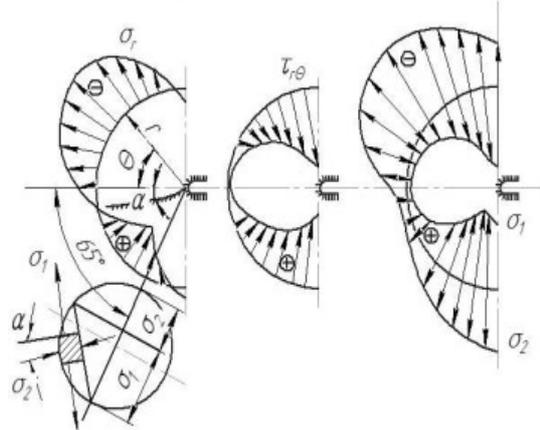


Рис. 3. Эпюры напряжений в вершине трещины при резании с $\gamma = 10^\circ$

Для расчета напряжений по выражениям (4) – (6) за исходные β_{i-1} принимаем начальное значение углов скола β_H , полученные экспериментально, а затем определяем значения σ_2 и $\tau_{r\theta}$. Полученное после этого значение β_i (угла направления распространения трещины относительно плоскости резания) является исходным для определения значения β_{i+1} уже в следующем этапе расчета. Рассчитывая таким методом мгновенные углы распространения трещины, строим теоретические продольные линии скола.

В качестве примера на рис. 3 приведены эпюры σ_r и $\tau_{r\theta}$ для резца с углом $\gamma = 10^\circ$. Условия открытия трещины (8) для этого угла удовлетворяются в диапазоне $\theta = +10^\circ - +80^\circ$ (участок дуги показан тонкой линией), на остальной части дуги выполняются условия закрытия трещины (участок дуги показан утолщенной линией). Угол θ между осью трещины и линией, проходящей (в зоне открытия трещины) через точку с максимальным растягивающим напряжением и вершину трещины, составляет $+65^\circ$. По данным расчета, на этой линии был построен круг Мора, из которого найдено направление главного растягивающего напряжения, перпендикулярно которому развивается трещина (направление показано линией σ_2 на квадрате главных площадок). После того как будет получено новое направление трещины, оно принимается за исходное для повторного этапа расчета, который продолжается пока след трещины не выйдет на поверхность.

Аналогичный анализ напряженного состояния перед фронтом трещины произведен и для других углов γ от $+50^\circ$ до -20° . На основании расчета построены теоретические конечные углы скола β_H (см. рис. 1, пунктирная линия). Важно отметить, что их численные значения ниже, чем начальных углов. Это обуславливает выпуклость в сторону открытой поверхности контура продольного сечения лунки. Сравнение полученных теоретическим путем значений конечных углов скола с экспериментальными показывает, что их расчетные значения с доверительной вероятностью, равной 0,9, находятся в доверительных границах экспериментальных углов скола. Это свидетельствует о хорошей сходимости расчетных данных с экспериментальными.

Исходя из изложенного, можно однозначно утверждать о существовании стадии отрыва как завершающего этапа процесса скалывания при резании хрупких горных пород. Контур продольного сечения, перпендикулярного плоскости резания, лунки скола имеет выпуклую в сторону открытой поверхности форму с ярко выраженными двумя зонами: более крутую начальную и пологую конечную, что подтверждает правильность выдвинутых теоретических положений и выведенные аналитические зависимости. Различие поверхностей разрушения по зонам скола также свидетельствует о разных видах разрушающих напряжений, на поверхности первой зоны (у резца) лунки скола видны следы потертости, поверхность сглажена, что характерно для разрушения от среза. Поверхность пологой

части лунки характерна для разрушения отрывом (рельефная, без следов потертости, с острыми кромками неровностей).

Наряду с этим следует указать еще на одно важное обстоятельство. С увеличением переднего угла резца наблюдается уменьшение длины $l_{СК}$ отделяемого элемента стружки (см. рис. 1), являющейся производной угла скола. Уменьшение длины $l_{СК}$ приводит к увеличению числа элементарных сколов на единицу пути резания. В работе [6] показано, что скорость деформации элемента стружки находится в квадратичной зависимости от числа сколов. Общеизвестно, что с увеличением скорости деформации возрастает сопротивляемость горных пород разрушению. Учитывая изложенное, можно утверждать, что геометрия режущего инструмента при высоких скоростях резания оказывает влияние на сопротивляемость горных пород резанию.

Выводы. Проведенное аналитическое моделирование процесса скола, стружкообразования и экспериментальные исследования показывают, что значения начального и конечного углов скола находятся в зависимости от угла воздействия резца. Линия скола является не прямолинейной, а имеет ярко выраженный участок перегиба, причем продольное сечение лунки скола имеет выпуклую в сторону открытой поверхности форму. Процесс отделения элемента стружки в начальный момент происходит за счет напряжений среза, а в последующий - за счет напряжений отрыва.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Блохин В. С., Большаков В. И., Малич Н. Г.. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Учебное пособие ч.1 – Днепропетровск; ИМА - пресс.- 2006. - 404с.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975.
3. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. М., Изд-во АП СССР 1960.
4. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. пособие для студентов вузов.- 2-е изд., перераб. — М.: Высш. школа, 1982. — 264 с. ил. В пер.: 75 к.
5. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев «Наук. думка», 1968.
6. Васильев Л. М., Млодецкий В. Р. Влияние скорости деформации на процесс разрушения горных пород при резании. В кн.: Механика и разрушение горных пород». Киев, «Наук. думка», 1975.

REFERENCES

1. Blokhin V. S., Bolshakov V.I., Malich N.G. The main parameters of technological machines. Machines for the disintegration of solid materials:Textbook part 1 - Dnepropetrovsk; IMA - press. - 2006. - 404 p.
2. Bobrov V. F. Fundamentals of the theory of metal cutting. M., "Mechanical Engineering", 1975.
3. Uzhik G. V. Breakaway resistance and strength of metals. M., USSR Publishing House of 1960.
4. Samul V. I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity: Proc. A manual for university students.-2 nd ed., Rewritten. - M.: Higher education. School, 1982. - 264 p. Yl. In translation: 75 k.
5. Panasyuk V. V. Limit equilibrium of brittle bodies with cracks. Kiev «Science. Dumka", 1968.
6. Vasiliev L. M., Mlodetsky V. R.. Effect of the strain rate on the process of rock destruction during cutting. In: Mechanics and the destruction of rocks. Kiev,"Science. Dumka", 1975.