

УДК 539.375

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЖЕСТКОГО КЛИНА**

Е. Н. Шер, В. П. Ефимов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ensher@sibmail.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проведено экспериментальное и теоретическое моделирование развития трещины, возникающей при внедрении жесткого клина в хрупкую горную породу. Эксперименты осуществлялись на образцах из оргстекла, что позволяло фиксировать размеры и форму трещин. Нагружение клином выполнялось квазистатически в испытательной машине и динамически — падающим клином. Для теоретического описания процесса развития трещины разработана в рамках трехмерной теории упругости расчетная схема, учитывающая конечный размер режущей кромки клина и влияние свободной поверхности. Проведено сопоставление форм трещин, полученных теоретически и в эксперименте.

Трещина, удар, клин, твердое тело, горная порода, свободная поверхность, трехмерная постановка, теория упругости, эксперимент

Разрушение твердых тел при внедрении в них жесткого клина наблюдается во многих технологиях горного дела. Для совершенствования существующих и разработки новых способов разрушения горных пород механическим способом актуальным является разработка расчетных схем, позволяющих определить взаимодействие рабочего органа машины и горной породы. В настоящей работе проводится моделирование процесса развития разрушения при внедрении клиновидного инструмента в хрупкую горную породу. В плоской постановке задача о развитии трещины при нормальном к поверхности ударе клином рассмотрена в [1]. В [2] приведена также в плоской постановке задачи расчетная схема развития трещины в хрупкой горной породе при ударе клиновидным инструментом под уступ. Цель таких исследований — разработка методов расчета рациональных параметров машин ударного действия, таких как ударные молоты, предназначенных для разрушения негабарита, послыного скалывания горной породы в ковшах экскаваторов активного действия [3]. Расчеты в плоской постановке теории упругости имеют в этих случаях ограниченное применение, так как не учитывают сложную форму трещины, возникающей в породе, например при работе нескольких ударных молотов ковша экскаватора.

Применительно к указанной задаче процесс развития трещины при ударе клином заданной ширины можно рассматривать в трехмерной постановке. С целью визуализации процесса развития трещины экспериментальные исследования выполнялись на прозрачном материале —

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00156).

органическом стекле. Для испытаний изготавливались прозрачные прямоугольные образцы размером 170×115×33 мм. Для динамических экспериментов использовался гравитационный копер, рабочий инструмент которого имел вид клина с углом заострения 30°. Масса индентора 2.3 кг, ширина $2b_0$ клиновидной части 28 мм. На верхний торец индентора крепился акселерометр, сигнал с которого через АЦП Е-1440 записывался в компьютер. Серия испытаний, целью которых было определение характерных размеров трещин, образовавшихся от удара клина, проведена следующим образом. Клин сбрасывался сначала с высоты 5 см без образования трещины под клином, затем высота постепенно увеличивалась. Начиная с высоты 7 см под клином образовывались магистральные трещины. Их подкрашивали для контраста и измеряли характерные размеры: глубину проникания и ширину. Высоту увеличивали до выхода трещины на свободную поверхность, противоположную той, по которой наносился удар.

Полученные параметры трещин в зависимости от интенсивности удара приведены в таблице.

Развитие трещины под клином при динамическом воздействии

| H , см | $V_{уд}$, м/с | a_{max} , м/с ² | F_{max} , Н | $\Delta\tau$, мс | $\ell_{тр}$, мм | $2b_{тр}$, мм |
|----------|----------------|------------------------------|---------------|-------------------|------------------|----------------|
| 10 | 1.4 | 2.369 | 5 448 | 1.4 | 3.5 | 29 |
| 12 | 1.5 | 2.523 | 5 804 | 1.6 | 5.5 | 33 |
| 15 | 1.7 | 2.269 | 5 219 | 1.44 | 6.5 | 37 |
| 20 | 1.98 | 2.857 | 6 571 | 2.0 | 7.0 | 33 |
| 25 | 2.2 | 3.071 | 7 064 | 1.96 | 10.0 | 39 |
| 30 | 2.4 | 3.453 | 7 940 | 2.2 | 12.0 | 45 |

Примечание. H — высота падения клина; $V_{уд}$ — начальная скорость внедрения ударника; a_{max} — максимальное значение ускорения при торможении клина; F_{max} — максимальное усилие нагружения; $\Delta\tau$ — полное время нагружения; $\ell_{тр}$ — глубина проникания трещины вдоль осевой линии удара; $b_{тр}$ — полуширина трещины на свободной поверхности.

Пример образующейся при ударе клином трещины представлен на рис. 1.

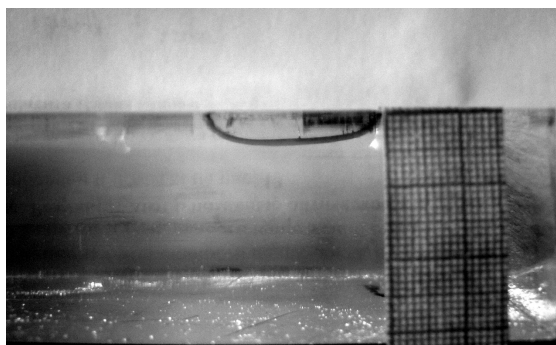


Рис. 1. Фотография трещины, образовавшейся от удара клином, сброшенным с высоты 12 см на горизонтально расположенный образец

Статические эксперименты проводились на испытательном стенде УМЭ-10ТМ. Нагружение осуществлялось клином с углом заострения 30° и шириной лезвия 13.5 мм. Скорость внедрения 0.5 мм/мин, нагружение выполнялось до первого проскока магистральной трещины (рис. 2). Усреднением по четырем экспериментам получено: сила внедрения клина перед проскоком трещины — 6310 Н, глубина внедрения клина — 2.1 мм, $\ell_{тр} = 11.5$ мм, $2b_{тр} = 26.5$ мм.

Полученные в экспериментах данные позволяют оценить форму и размеры трещин, возникающих при ударе и статическом внедрении клина. Как следует из таблицы и рис. 1, 2, форма трещины представляется половиной овала, описанного вокруг полоски, образованной внедренной частью клина.

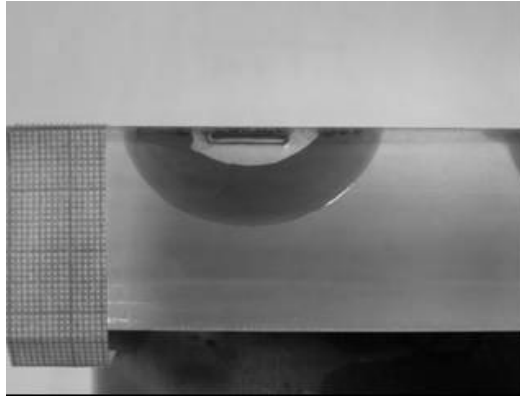


Рис. 2. Фотография трещины, образовавшейся при статическом внедрении клина

При теоретическом описании развития трещины при внедрении клина будем считать, что в упругом полупространстве имеется начальная плоская трещина, выходящая ортогонально на свободную поверхность и имеющая в плане форму узкого прямоугольника. Такая трещина моделирует внедренный пластически жесткий клин и с нее начинается развитие магистральной трещины. Последующее внедрение клина моделируется увеличением нормального напряжения, действующего на берега начальной трещины.

Для расчетов трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с плоской трещиной, выходящей на свободную поверхность и нагруженной по ее берегам внутренним давлением, использовался метод разрывных смещений [4, 5]. Согласно этому методу, поверхность трещин разбивается на элементы, в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Таким образом, трещины представляются набором дислокационных элементов, описываемых векторами Бюргера, компоненты которых заранее могут быть неизвестны. Определяются они из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов в результате решения соответствующей системы линейных уравнений, коэффициенты которой являются коэффициентами взаимного влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния использовались формулы Пича–Келлера [6], представляющие компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным разрывом через контурные интегралы вдоль его границы. Подобный метод использовался для расчета формы радиальных трещин, возникающих при камуфлетном взрыве удлиненного заряда в породном массиве [7].

В разработанной программе разбиение области трещины и неразрушенной среды в ее плоскости проводилось с использованием квадратной сетки с шагом a . Расчетная схема задачи представлена на рис. 3. Принято, что свободная поверхность расположена в плоскости (x, z) при $y = 0$, трещина, развивающаяся от внедрения клина вдоль оси y , — в плоскости (x, y) и начальное ее положение отмечено затемненными квадратными элементами. При расчетах коэффициентов влияния дислокационных элементов трещины использовались свойства симметрии задачи относительно плоскостей (y, z) и (x, y) . Так, для определения влияния j -го квадрата на i -

й правого крыла трещины нормальные напряжения находились в центре i -го квадрата в результате суммирования напряжений от j -го элемента правого крыла трещины и соответствующего ему по симметрии элемента левого крыла (рис. 3).

Для выполнения граничных условий на свободной поверхности вдоль нее вводилась свободная от нагрузок дополнительная трещина большого размера, значительно превосходившая длину режущей кромки клина.

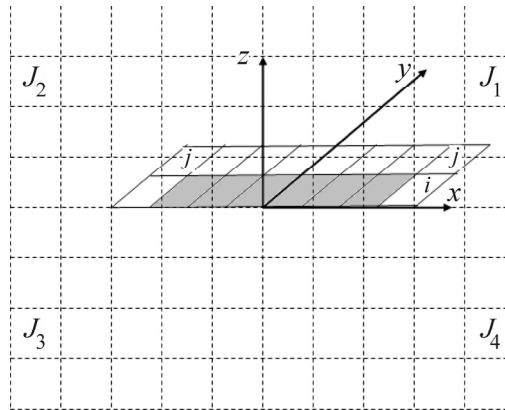


Рис.3. Схема разбиения трещины на дислокационные элементы

Для сохранения свойств симметрии задачи разбиение дополнительной трещины в плоскости (y, z) также проводилось с учетом симметрии. Пример такого разбиения трещины, моделирующей свободную поверхность, приведен на рис. 3. Элементы $J_1 - J_4$ дополнительной трещины, расположенные симметрично относительно осей x и z , имеют соответствующие этой симметрии значения компонент векторов Бюргенса и одинаковые раскрытия вдоль оси y . Это позволяет уменьшить в 4 раза число неизвестных при описании раскрытия элементов поверхностной трещины, учитывая ее разбиение только в первом квадранте.

Важным элементом расчета развития трещин является критерий разрушения среды на ее кромке. В качестве такого критерия принимался критерий Новожилова [8]. Согласно этому критерию, развитие трещины происходит там, где усредненные по характерному размеру l_c растягивающие напряжения превосходят прочность среды на растяжение σ_c . В программе принималось, что шаг сетки разбиения трещин a равен l_c и усредненные значения напряжений в неразрушенной среде у кромки трещины в ее плоскости равны напряжениям в центрах квадратов, окружающих ее. Тот квадрат, где напряжение σ_{zz} превосходило σ_c , считался разрушенным и присоединялся к трещине. Принимая во внимание корневую особенность поведения напряжений возле кромки трещины, удастся установить связь этого критерия с критерием Ирвина, согласно которому развитие трещины происходит, когда коэффициент интенсивности напряжений K_I (КИН) на кромке трещины превосходит его критическое значение $K_I \geq K_{IC}$. При этом интервал усреднения l_c , являющийся параметром, характеризующим среду, через критический КИН и прочность на растяжение выражается формулой

$$l_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_c} \right)^2.$$

Расчет развития трещины проводился по шагам. На каждом шаге расчетов для заданной конфигурации трещины и нагружения определялась матрица системы уравнений. В результате решения этой системы находились раскрытия трещины. Рассчитывались напряжения в центрах

квадратов ближайшего окружения кромки трещины. Квадраты окружения, где по принятому критерию происходило разрушение, присоединялись к трещине. После формирования новой трещины и коррекции параметров нагружения расчеты циклически повторялись. В результате определялась эволюция формы трещины при равновесном ее развитии под действием возрастающей нагрузки, приложенной на берегах начальной трещины.

Пример такого расчета приведен на рис. 4 в безразмерных координатах, где показаны в плане, начиная с начального положения, формы правого крыла развивающейся трещины. На рис. 5 представлены в безразмерном виде изолинии раскрытия трещины и форма ее поверхности на одном из этапов внедрения клина.

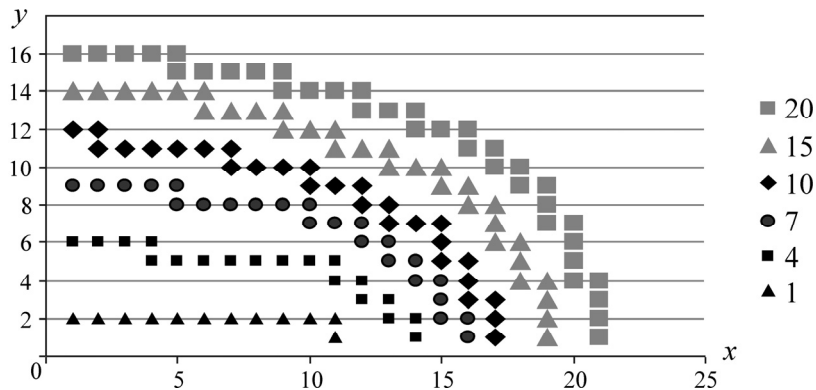


Рис. 4. Последовательные положения фронта трещины (правое крыло) при внедрении клина в упругое полупространство в зависимости от шага увеличения глубины внедрения

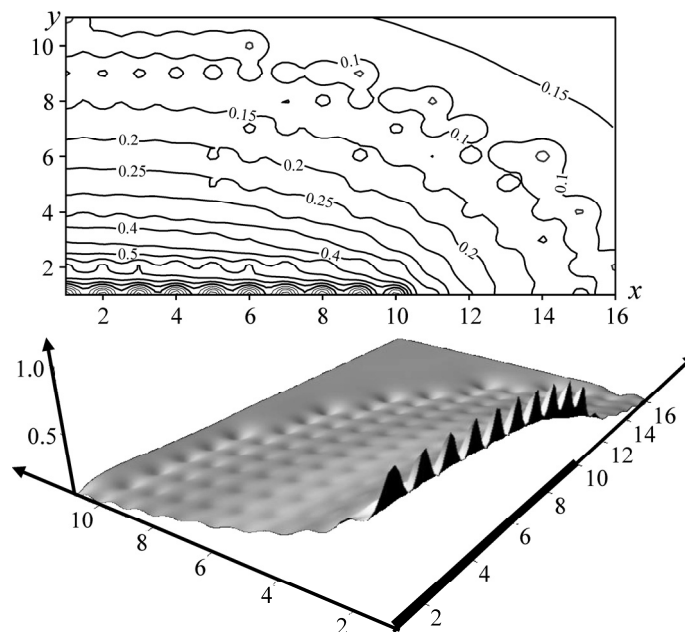


Рис. 5. Расчетные изолинии и форма раскрытия трещины, образующейся при ударе клина по свободной поверхности хрупкой среды

Для сравнения теоретических и экспериментальных результатов на рис. 6 приведены в безразмерном виде зависимости отношения глубины внедрения трещины к ее ширине на поверхности от относительной глубины. Получено хорошее совпадение данных расчета и экспериментов (см. таблицу).

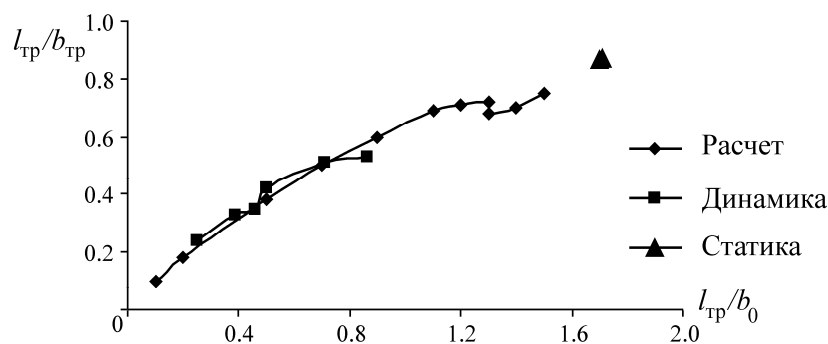


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная зависимости отношения максимального размера трещины $l_{тр}$ вдоль оси y к максимальному размеру $b_{тр}$ вдоль оси x от безразмерного значения $l_{тр}/b_0$, где b_0 — полуширина режущей части клина

Хорошее согласование данных о форме трещины, образованной в статическом и динамических экспериментах со статическими расчетами можно объяснить тем, что на заключительной стадии своего развития перед остановкой трещина развивается медленно в равновесном режиме. Этим и обусловлено совпадение результатов экспериментов с данными квазистатического расчета.

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное моделирование процесса развития трещины в хрупкой горной породе, возникающей при внедрении клиновидного ударника. Показано, что возникающая трещина имеет форму полуовала, параметры которого зависят от величины внедрения клина и длины его режущей части.

Разработана расчетная схема развития трещины в хрупкой среде при внедрении жесткого клина в трехмерной постановке.

Показано соответствие экспериментальных и расчетных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башеев Г. В., Ефимов В. В., Мартынюк П. А. Расчетная модель разрушения горных пород клиновидным ударным инструментом // ФТПРПИ. — 1999. — № 5.
2. Башеев Г. В. Расчетная модель откола куска горной породы при ударе клином под уступ // ФТПРПИ. — 2004. — № 5.
3. Матгис А. Р., Ческидов В. И., Лабутин В. Н., Зайцев Г. Д., Шер Е. Н., Мартынюк П. А., Башеев Г. В., Зайцева А. А., Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г. и др. (всего 16 авторов). Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых / под ред. В. Н. Опарина. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
4. Шер Е. Н., Михайлов А. М. Моделирование роста осесимметричных трещин при взрыве и гидро-разрыве вблизи свободной поверхности // ФТПРПИ. — 2008. — № 5.
5. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. — М.: Мир, 1987.
6. Peach M. and Koehler J. S. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them, Physical Review, 1950, No. 3, Vol. 80.
7. Шер Е. Н., Черников А. Г. Расчет параметров радиальной системы трещин, образующейся при взрыве удлиненного заряда ВВ в хрупких горных породах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. — № 2.
8. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // ПММ. — 1969. — Т. 33. — Вып. 2.

Поступила в редакцию 2/XI 2015