



Механика контактного разрушения

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ОБРАЗОВАНИЕМ ПЛОСКОЙ ТРЕЩИНЫ

С.В. СИНЕВ, канд. техн. наук

121069, Москва, Новинский б-р, д.18 кв. 26.

Телефон 8(495) 695-54-51; 8-916-847-0456; E-mail: stanislav-vs@mail.ru

Анализируются условия возможности образования плоской трещины параллельной полупространству с позиций теории трещин и механики разрушения. Приводится фотография плоских трещин и механизм их формирования. Предположительно они образуются при скоростной разгрузке горной породы, нагруженной в пределах упругих деформаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разрушение, трещина, микротрещина, структура, механизмы, магистральная, полупространство, деформации.

В теории трещин [1] Л.И.Седов зарождение трещин тесно связывает с дислокациями, имеющимися внутри тела, в том числе в виде пластических деформаций в упругопластической области. В полупространстве любого материала при нагружении индентора образуется локальная пластическая деформация, в которой под действием растягивающих напряжений зарождаются и начинают развиваться трещины. Поэтому для механики контактного разрушения [2] важным является знание величины максимальных касательных напряжений, кото-

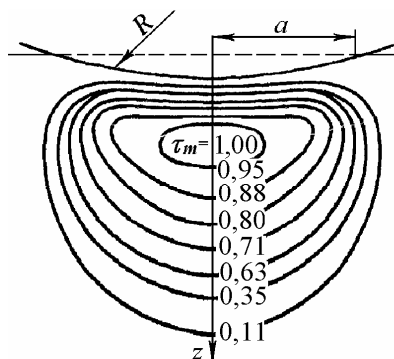


Рис.1. Линии равных максимальных касательных напряжений в плоскости осевого сечения для случая внедрения шара в упругое полупространство

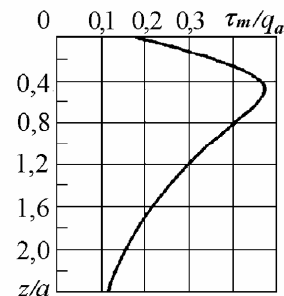


Рис.2. Изменение максимальных касательных напряжений по глубине

рые представляют собой наибольшие полуразности главных напряжений. Распределение этих напряжений изучали Дэвис [3] и Хант [4]. На рис.1 приведены линии равных наибольших полуразностей главных напряжений. Величину этой разности в точках, лежащих на оси z , находят интегрированием (путем замены переменных) выражений, данных С. П. Тимошенко [5] для простейшего случая равномерного распределения нагрузки по поверхности контакта. Определенная таким путем разность главных напряжений равна

$$2\tau_m(z) = \sigma_\theta - \sigma_z = \sigma_r - \sigma_z = 1,5q_a \left[\frac{1,5}{1 + (z/a)^2} + (1 + \nu) \left(1 - \frac{z}{a} \operatorname{arctg} \frac{z}{a} \right) \right], \quad (1)$$

так как два главных напряжения σ_r и σ_θ равны между собой. Среднее давление q_a принималось за единицу измерения напряжения. Типичная кривая, вычисленная на основании этого уравнения, показана на рис.2. Значение коэффициента Пуассона ν слабо влияет на высоту и положение максимума этой кривой, что можно показать численным решением уравнения, полученного после приравнивания нулю производной уравнения (1). Хант нашел таким путем положение наибольшего касательного напряжения для значений ν , лежащих между 0,25 и 0,40:

$$(z/a)_{\max} = 0,381 + \nu/3.$$

Соответствующая наибольшая разность главных напряжений

$$2\tau_m(z) = \sigma_r - \sigma_z = 1,5q_a (0,756 - 0,450\nu).$$

При $\nu = 0,3$ на глубине $z = 0,49a$ возникает максимальное касательное напряжение $\tau_m = 0,465q_a$.

В практике исследований наиболее распространены две схемы трещинообразования при упруго-пластичном внедрении сферического индентора, так называемое герцевское нагружение. Первая схема предопределена упруго-

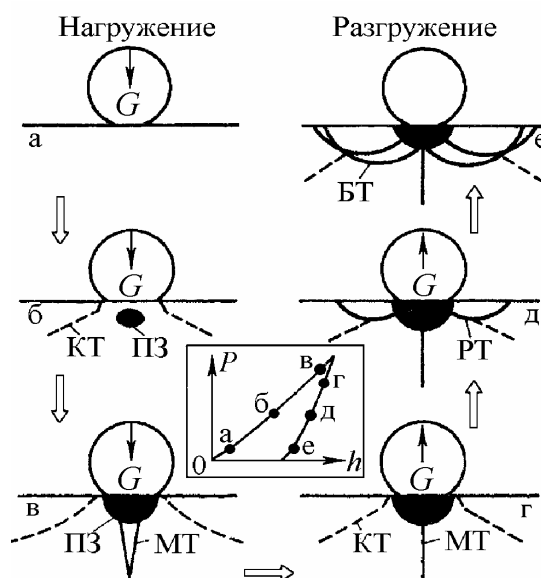


Рис.3. Схема трещинообразования при упругопластичном внедрении шара: ПЗ — зона пластической деформации, КТ — конические трещины, МТ — медианные (осевые) трещины, РТ — радиальные трещины, БТ — боковые трещины

хрупкими свойствами стекла, вторая — упругими свойствами прочих материалов. Отдельную нишу занимают схемы, предопределяемые формой индентора.

При внедрении шара в материале может происходить переход от почти упругого к почти пластическому деформированию. Поэтапная последовательность развития трещины при внедрении индентора в виде шара, показана на рис.3. Вначале (рис.3,а) контакт упругий и вполне описывается по Г.Герцу. С увеличением нагрузки напряжения возрастают пропорционально среднему контактному давлению, и при достижении касательным напряжением некоторой величины в материале зарождается пластическая деформация (темная зона на рис.3,б). На поверхности около контактной области внезапно образуются круговые трещины, количество и размер которых зависит от радиуса шара. Дальнейшее нагружение формирует трещину в виде развитого усеченного конуса, описанного Г.Герцем в 1881 году. Увеличение нагрузки приводит к расширению пластической зоны, у основания которой образуется медианная трещина (рис.3,в). При разгрузке медианная трещина закрывается сжимающими силами упругодеформированного материала (рис.3,г). На поверхности полупространства знак напряжения меняется, и при остаточной нагрузке, равной примерно половине максимальной, образуется система радиальных трещин (рис.3,д). Одна из радиальных трещин может слиться с медианной. Остальные инициируются от краев контактной площадки и растут при дальнейшей разгрузке. Коническая трещина, вроде бы не влияет на рост и форму радиальных трещин. Но, при снятия нагрузки, около деформированной зоны возникают растягивающие напряжения, приводящие к расширению системы боковых трещин (рис.3,е). Боковые трещины формируются у начала границы пластической зоны при почти полном снятии нагрузки, примерно до 10 %, с последующим ростом вверх к поверхности полупространства, принимая блюдцевидную форму. Пересечение радиальных трещин с боковыми приводит к образованию осколков на поверхности полупространства. М.В.Свэйн [6] подчеркнул важность этого обстоятельства для фрагментации в разрушении горных пород.

Последовательность развития трещин может быть несколько иной, если это поликристаллический материал, особенно с повышенной пластичностью. В работе [7] с применением методов акустической эмиссии, оптической и электронной сканирующей микроскопии проводились эксперименты на аморфном стекле, монокристаллах поваренной соли, шпинеля и сапфира, а также на поликристаллических сульфиде и селениде цинка, карбиде кремния с размерами зерен от 1 до 18 мкм. Широкий выбор материалов обусловлен диапазоном механических свойств (твердость от 0,24 до 23 ГПа, вязкость разрушения от 0,4 до 5 МПа·м^{1/2}). В исследованиях применялся метод акустической эмиссии, оптической и электронной сканирующей микроскопии. В стекле трещины формировались по описанной прежде схеме. В других материалах последовательность была несколько иной (рис.4). Вначале нагружения формируются радиальные трещины, развивающиеся от периферии кратера отпечатка. С увеличением нагрузки средняя длина их возрастает и появляются медианные трещины дискообразной конфигурации. Медианные трещины растут и сливаются с радиальными, образуя форму, близкую к полудиску. Далее формируется серия подповерхностных трещин, располагающихся между радиальными. При разгрузке все три типа трещин активно развиваются и появляются дополнительные трещины. Хотя конечная конфигурация трещин для аморфных и для кристаллических материалов схожа, но формирование их различно. В любом случае трещины зарождаются на границе пластической и упругой областей, а распространяются только в упругую область.

В результате исследований установлено, что под герцевской площадкой образуются только вертикальные трещины, имеющие разное положение в отношении оси z , включая фрагментарные осколки. Плоская приповерхностная трещина в полупространстве формируется в процессе разрушения горных пород при бурении скважин с дефицитом нагрузки, которую невозможно создать для полноценного объемного разрушения [8]. Реализуются нагрузки зон пластических деформации (ПЗ) и конических трещин (КТ) на рис. 3, б, а также области медианных (осевых) трещин (МТ) при G_2 на рис. 4, т.е. области максимальных касательных напряжений на глубине $z = 0,3 - 1,0 a$.

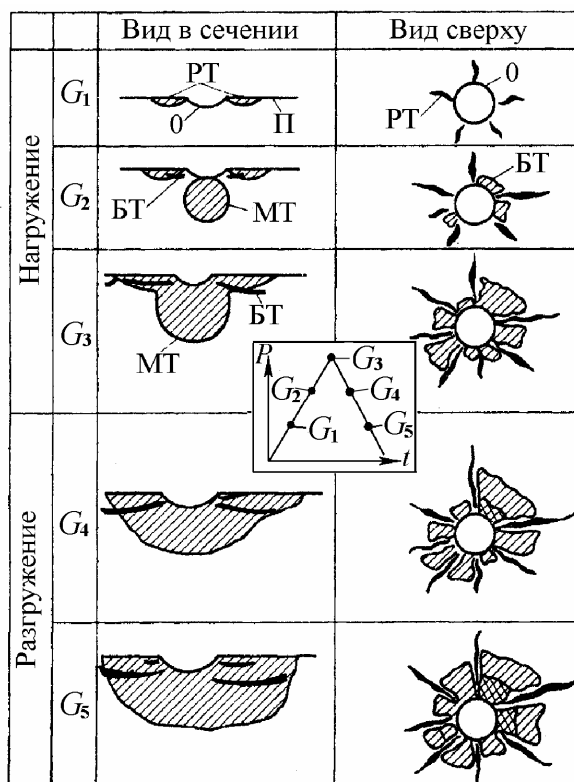


Рис. 4. Последовательность образования трещин при упругопластическом внедрении шара: П — поверхность материала, О — отпечаток, РТ — радиальные трещины, МТ — медианные (осевые) трещины, БТ — боковые трещины.

Спустя десятилетие появились публикации, частично подтверждающие формирование приповерхностных плоских трещин в полупространстве, которые возникают при усталостном износе в металле. Наиболее частыми видами поверхностного повреждения считаются изнашивание отслаиванием, которое проявляется отделением тонких чешуек или пластинок охрупченного материала, и питтинг, представляющий выкрашивание отдельных мест поверхности, а иногда даже и откол довольно больших фрагментов материала.

В теории изнашивания отслаиванием, разработанной Н.П. Сух и сотрудниками [9, 10, 11, 12], формирование зародышевых горизонтальных подповерхностных трещин объясняется слиянием микропор, образующихся на границах раздела фаз, включений и т.п., благодаря растягивающим напряжениям в поверхностном слое упругопластического полупространства. Растягивающие напряжения появляются в поверхностном слое при его многократном циклическом деформировании микровыступами контртела в процессе трения. Формирование вертикальных трещин возможно при концентрации напряжений созда-

ваемыми впадинами микронеровностей, внедрившимися инородными частицами и осколками окисных пленок, ямками коррозии и адгезионными вырывами.

Разрушение питтингом происходит, если на поверхности сформировалась зародышевая наклонная трещина, распространяющаяся вглубь материала, которая изменяя траекторию своего движения, выходит на поверхность или соединяется с другими поверхностными трещинами. Как правило, движение питтинговой трещины сопровождается значительным ветвлением (рис.5) с образова-



Рис.5. Последовательность выкрашивания поверхности ролика при контактном разрушении: а) — б) состояния поверхности после нарастающего числа циклов нагружения.

нием ямок выкрашивания на поверхности полупространства. Выкрашивание приобретает форму утолщающегося веера, направленного в сторону, противоположную движению контактной пары. Долгое время считалось, что зародышевые микротрещины при питтинге образуются в глубине материала в области максимальных касательных напряжений. Однако С.В.Пинегин [13] экспериментально установил, что питтинговое разрушение начинается только с поверхности контактирующих тел, поскольку при подаче в контактную зону абразивного порошка происходит абразивное изнашивание без следов питтинга, т.е. возможные области образования питтинга подавляются абразивом.

По мнению Н.Ямашита и сотрудников [14], зародышевые микротрещины питтинга образуются на поверхности под острым углом в 20° — 30° посредством многократного ее деформирования микровыступами, что подтверждено экспериментально.

При бурении скважинконцентратором напряжений на забое может стать неровность или шероховатость поверхности, а также дефект структуры горной породы. Любое нагружение в зоне концентратора, сопровождающееся возникновением растягивающих напряжений, создает зародышевую трещину.

Наклонная трещина возникает на поверхности в соответствии закономерностей образования конической трещины (рис.3,б) с дальнейшим выполаживанием в приповерхностную плоскую на глубине z , причем многоцикловое нагружение вовсе необязательно. Угол наклона зародышевой трещины при питтинге совпадает с образующей конуса при разрушении горной породы.

Плоская приповерхностная трещина в полупространстве формируется в процессе движения по этой поверхности источника напряженного состояния материала. Возможно ли такое действие при статическом и динамическом нагружении без перемещения? Рассматривая все известные гипотезы формирования реверсивных деформационных аномалий в образцах горных пород при сжатии, а также гипотезы, привлекаемые для объяснения эффекта реверса деформаций в предразрушающей области нагружения: гипотезы остаточных напря-

жений; гипотезы упругого восстановления материала около трещин отрыва, развивающихся в породе при сжатии; гипотезы распирающего действия сдвиговых микродефектов; гипотезы очага макроразрушения, моделируемого мягким включением; гипотезы очага макроразрушения, моделируемого мягким дилатирующим включением, которые основываются на классических представлениях механики о деформировании и разрушении материалов, автор [15] делает вывод о физической невозможности появления горизонтальной трещины, поскольку при сжатии такие трещины, как известно, закрываются.

Однако, методом проб и ошибок, подбором горной породы, в которой предполагаемый эффект образования плоской трещины мог бы быть получен, гипотеза о возможности существования горизонтальной трещины под поверхностью полупространства успешно подтверждена. При испытании под индентором в одном из образцов сформировалась ярко выраженная горизонтальная

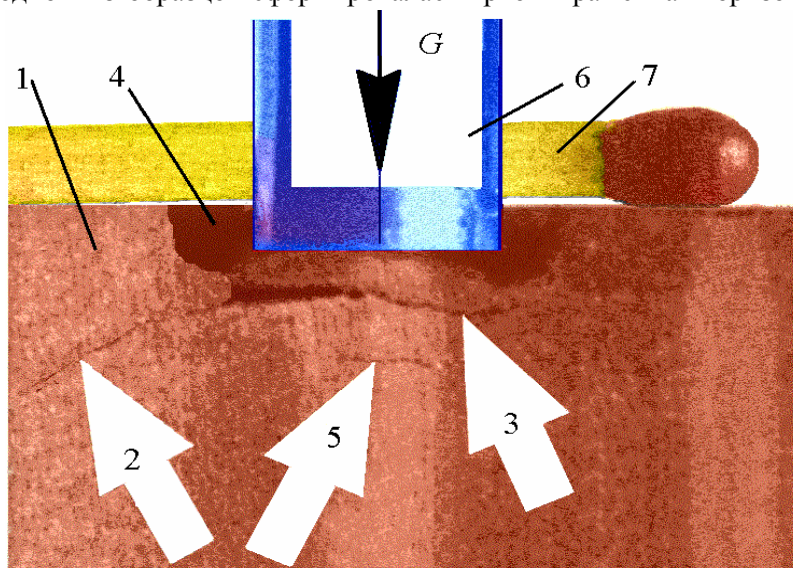


Рис.6. Формирование плоской трещины под индентором в полупространстве: 1 — массив породы; 2 — коническая трещина; 3 — первая плоская трещина; 4 — кратер; 5 — вторая плоская трещина; 6 — индентор; 7 — спичка.

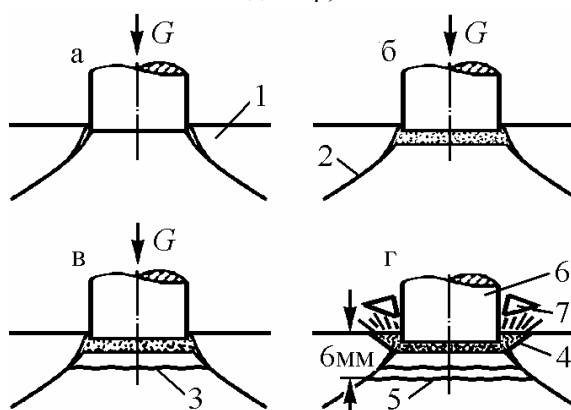


Рис.7. Схема разрушения породы с образованием трещины, параллельной поверхности полупространства: 1 — массив породы; 2 — коническая трещина; 3 — первая плоская трещина; 4 — кратер; 5 — вторая плоская трещина; 6 — индентор; 7 — консоль, вырванная из кратера.

трещина (см. фото на рис.6). Для визуальной масштабной оценки глубины фор-

мирования трещины на поверхности полупространства, возле индентора, помещена спичка 7 (рис.6).

На рис.6 отчетливо видна коническая трещина 2 и две плоские, параллельные полупространству, 3 и 5. Вокруг индентора 6 обратный конус кратера 4 с неровными берегами под углом от 30° до 60° .

Механизм разрушения горной породы с образованием плоской трещины представляется следующим образом. В начале нагружения индентора в полупространстве 1 формируется коническая трещина 2 (рис.6 и рис.7,а). Процесс характеризуется ростом нагрузки G в графике зависимости $G(z)$ (рис.8) до его максимального значения и его падения при котором происходит отрыв конуса 2 от массива породы 1 (рис.7,а), так называемый первый скачок разрушения. Дальнейшее нагружение сопровождается структурным разрушением вершины конуса 2 (рис.7,б).

Размер разрушенной вершины обусловлен наличием свободного пространства в конической трещине между конусом 2 и консолью 1 на рис.7,б, что позволило разместиться в этом объеме частицам структурно разрушенной породы.

В процессе реструктурирования происходит второй скачок разрушения в графике зависимости $G(z)$ (рис.8) и разгрузка конуса 2 с образованием первой трещины 3 на рис.6 и рис.7,в. Последующее увеличение нагрузки приводит к третьему скачку $G(z)$ при котором реструктурированная горная порода вырывается вместе с объемом обратной консоли 7 (рис. 7,г) образуя кратер 4 вокруг индентора 6, причем эта мгновенная разгрузка конуса 2 сопровождается формированием второй трещины 5 на рис.6 и рис.7,в.

Скорость реструктурирования, по-видимому, сопоставима со скоростью распространения упругой волны, что позволяет разгрузить неразрушенную часть конуса 2 с отрывом ее от массива на некоторой глубине, в конкретном случае 6 мм, по плоскости параллельной полупространству 5 (рис.7,в). Размер части конуса, отделяемой плоской трещиной обусловлен сдерживающим свойством не разрушенной кольцевой консоли массива 1 на рис.6 и рис.7.

В ходе проводимых исследований сформировалась гипотеза о волновой природе разрушения горной породы в рассматриваемых эффектах.

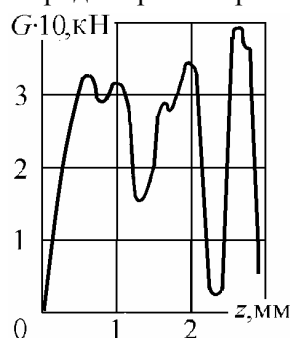


Рис.8. Экспериментальная зависимость силы сопротивления породы от глубины внедрения индентора.

Другим объяснением этого процесса могла стать скоростная разгрузка статически нагруженного в пределах упругих деформаций индентора на полупространство горной породы.

На основе анализа размерностей Н.Е.Мотт [16] установил, что по мере роста трещины скорость ее распространения приближается к пределу, составляющему часть скорости продольной волны.

Эксперименты показывают, что скорость распространения трещины равна скорости волн Релея, т.е. 0,6 скорости распространения продольной волны. Гипотетически можно предположить, что скорость структурного разрушения пород под индентором, обеспечивает такую разгрузку.

Более основательное изучение наблюдаемого механизма образования плоской трещины под поверхностью полупространства могло бы послужить как повышению эффективности процесса разрушения горных пород при бурении, так и установлению возможности реструктуризации пород промышленных пластов при вертикальном и горизонтальном бурении для интенсификации притока флюидов.

Литература

1. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды, т. II. – Москва: «Наука», 1973, 584 с.
2. *Колесников Ю.В., Морозов Е.М.* Механика контактного разрушения. М.: ЛКИ. – 2010. – 224 с.
3. *Davis R. M.* The determination of static and dynamic yield stresses using a steel ball // Proc. Roy. Soc, Lond., Ser. A. – 1949. – V. 197, N 1050. – P. 416 – 432.
4. *Hunt E. B.* Elastoplastic instability caused by the size effect and its influence of rubbing wear // J. Appl. Phys. – 1955. – V. 26, N 7. – P. 850 – 856.
5. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
6. *Swain M. V., Lawn B. R.* Indentation fracture in brittle rocks and glasses // Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. – 1976. – V. 13, N 11. – P. 311–319.
7. *Evans A. G., Wilshaw T. R.* Quasi-static solid particle damage in brittle solids // Acta Met. – 1976. – V. 24, N 10. – P. 939 – 956.
8. *Синев С.В.* Механизмы разрушения горных пород в шарошечном бурении // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – №4. – С. 18 – 28.
9. *Fleming J. R., Suh N. P.* Mechanics of crack propagation in delamination wear // Wear. – 1977. – V. 44, N 1. – P. 39–56.
10. *Jahanmir S., Suh N. P.* Mechanics of subsurface void nucleation in delamination wear // Wear, 1977. – V. 44, N 1. – P. 17–38.
11. *Suh N. P.* An overview of the delamination theory of wear // Wear. – 1977. – V. 44, N 1. – P. 1–16.
12. *Suh N. P., Sridharan P.* Relationship between the coefficient of friction and the wear rate of metals // Wear. – 1975. – V. 34, N 3. – P. 291–299
13. *Пинегин С. В.* Работоспособность деталей подшипников. – М.: Машгиз. – 1949. – 135 с.
14. *Yamashi'ta N., Mura T., Cheng H.S.* Effect of stresses induced by a spherical asperity on surface pitting in elasto-hydrodynamic contacts // Trans. ASLE. – 1985. – V. 28, N 1. – P. 11–20.
15. *Опанасюк А.А.* Исследование закономерностей деформирования горных пород в предразрушающей области нагружения. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Владивосток. – 2006. – 16 с.
16. *Mott N.E.* Fracture of metals; theoretical consideration Engineering. – 1948.

DESTRUCTION OF ROCKS WITH FORMATION OF FLAT CRACK

S.V.Sinev

Conditions of possibility of formation of a flat crack parallel to the surface from positions of the theory of cracks and mechanics of destruction are analyzed. The photo of flat cracks and the mechanism of their formation is resulted. Presumably they are formed at high-speed unloading of the rock loaded in limits I will rest-gih deformations.

KEYWORDS: destruction, a crack, a microcrack, structure, mechanisms, main, semispaces, deformations.