

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГРАНИТА ПРИ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Цвигун В.Н., Койнов Р.С.*

*Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк*

**Ключевые слова:** горная порода, гранит, разрушение, контактное нагружение, индентор.

**Аннотация.** Созданию достоверных моделей деформации и разрушения твердых тел уделяется много внимания исследователей. Поразительно, как легко плоскости скольжения перерезают большие объёмы и расстояния, образуя ступенчатые, изломанные трещины, которые частично имеют зацепления. Изложены экспериментальные наблюдения трещинообразования, разных явлений, их анализ с позиций малоциклового усталости.

## MECHANISM OF DESTRUCTION OF GRANITE UNDER CONTACT LOADING

*Tsvigun V.N., Koinov R.S.*

*Siberian state industrial university, Novokuznetsk*

**Keywords:** rock, granite, fracture, contact loading, indenter.

**Abstract.** A lot of attention is paid to the creation of reliable models of deformation and destruction of solids by researchers. It is striking how easily the slip planes cut large volumes and distances, forming stepped, fractured cracks that are partially engaged. Experimental observations of crack formation, different phenomena, their analysis from the standpoint of low-cycle fatigue are presented.

Растяжение и сжатие горных пород имеют различные механизмы разрушения, которые «переключают» напряжения и деформации.

При схемах сжатия и растяжения, при однократном и циклическом разрушении одни и те же материалы разрушаются по своим механизмам, изучение которых связано с большими математическими и вычислительными, экспериментальными трудностями, но применение прозрачных образцов для изучения механизмов разрушения решает часть вопросов.

Есть еще достаточно много неясного в явлениях при разрушении, есть ряд вопросов и неполностью решенных проблем фрактографии [1] или недостаточно хорошо описано исследователями: циклические перегрузки и фрактография усталостных бороздок, интрузии и экстрезии, траковые следы (фрактография), влияние формы цикла на фрактографию, усталостные трещины – бабочки возле включений (при контакте качения), места вращения и деформации у вершины трещины (шарнир) и т.д. Эти базисные ценности по механизмам разрушения можно применить к разрушениям при многих явлениях природы (в том числе и землетрясениях). Поэтому, от простого к сложному, изложим свои экспериментальные наблюдения, полученные на

граните и органическом стекле. Для исследований использовали следующие образцы:  $K_{2C}$  (CHISHOLM) – 3 отверстия,  $K_{1C}$  – внецентренное растяжение (2 отверстия, толщина 18 мм), и призматические  $25 \times 6 \times 3$  мм с одной боковой трещиной, наши круглые образцы диаметром 50 и толщиной 5 мм для  $K_1$ ,  $K_2$  и любое сочетание  $K_1/K_2$ , фотоупругие картины распределения напряжений при  $K_1$  и  $K_2$  и их смеси у вершин подповерхностных трещин разной ориентации при контакте качения и при вертикальном и косом индентировании.

Немногие механические системы способны быстро за микросекунды или миллисекунды сбросить колоссальную накопленную упругую энергию. Гранит и базальт породы твердые, наиболее прочные и способны: а) работать как монолитный барьер, плотина на пути движения больших объемов горных пород (десятки кубических километров) и сдерживающих огромные запасы энергии перед своим взрывным разрушением. Мрамор, другие менее прочные каменные материалы не способны на эту роль, т.к. при низких напряжениях дробятся по механизму мозаики, микротрещин, происходит релаксация напряжений и энергия превращается в тепло. Гранит, базальт способны при взрывном характере разрушения излучать и передавать продольные, поперечные волны, волны релеевские и Лява. Три типа последних считаются пока, похоже, как наиболее разрушительные. Некоторые типы волн со скоростью 2-4 км/с способны преодолевать с малым затуханием сотни и тысячи километров по граниту и базальту, как по волноводу. Волны, которые в массиве передвигаются со скоростями около 1 км/с и быстрее считаются детонационными, их запускает процесс разрушения гранита, базальта и подобных пород, а далее – детонационная волна создает сама разогрев на своем фронте выше  $1000^{\circ}\text{C}$  и способна взрывать на своем пути: углеводороды, газы и другие углеродсодержащие соединения, йод, азот, водород, кислород и т.д.. Такие детонационные взрывы могут разгонять ударные волны, отсюда еще дополнительные импульсы на сейсмограммах. Еще есть возможные химические и физические источники таких стартовых ударных волн – метеориты и последующие за ними химические взрывы – в замкнутом объеме дают такие же результаты как при камуфлетном ядерном взрыве и излучаются ударные волны.

Есть важный вопрос: каким образом сдвиги идут на поверхности земли по прямым линиям (радиусам) от фокуса на десятки и сотни километров, с такой легкостью, быстро и непонятно, рассекая все, что встречается на пути. Конечно, в статике контактные деформации, в силу законов пластичности, низкой скорости нагружения и минимума энергии, имеют спиральный вид, т.е. квазистатика сжатия даст криволинейные рассечения макрообъемов, а там, где есть ударные волны – картина выглядит по другому – ударные волны – это вибрации на переднем фронте, разогрев, мозаичное дробление и нет большого бокового рыскания вершины упругой волны и сдвига, просто соседние объемы не успевают принять нагрузку, усилия, напряжения, деформации, идет прямолинейное движение со снижением в разы сил трения за счет вибрации, воды, разогрева и т.д.

В СибГИУ (Новокузнецк) изучали [2] трещинообразование в граните

при статическом индентировании разного количества инденторов в гранитный блок  $0,6 \times 0,6 \times 0,3$  м.

При записи осциллограммы (индентор – шар диаметром 8 мм из сплава WC, рис. 1, кривая), при подходе к точке А раздается резкий звук – и шар проваливается на некоторую глубину (всего 0,2 мм) и выкалываются круговые щепки гранита – область А (рис. 1а). Далее, когда продолжаем нагружение, площадь выкола после следующего акустического сигнала, становится больше, запасенная энергия больше, выкалывается круг В и после продолжения нагружения – выкол С. Все три вида разрушения легко объяснить – образованием конических трещин Герца, их удлинением и выколом окружностей гранита А, В, С (рис. 1а). Под шаром образуется мелкий сильно спрессованный песок из гранита.

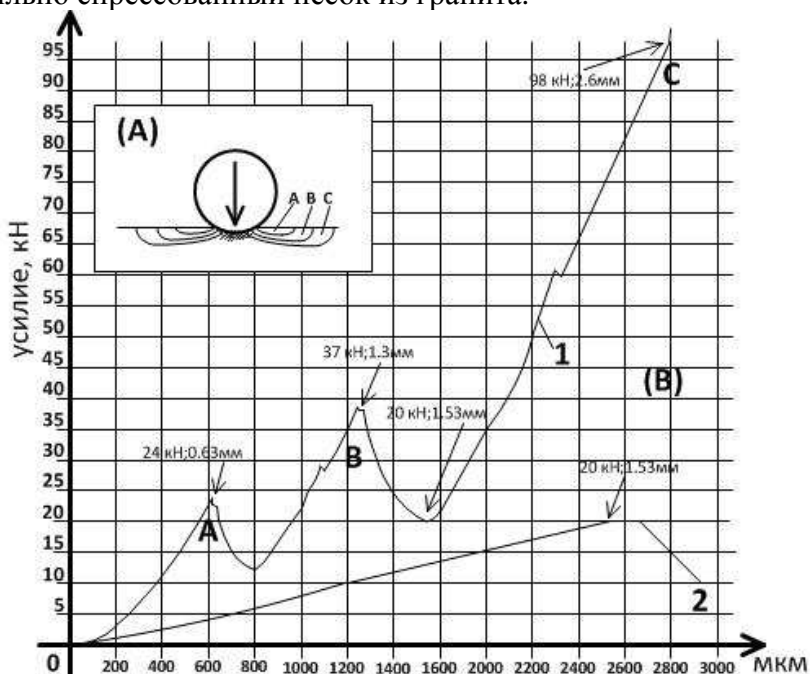


Рис. 1. Осциллограмма вдавливания шара диаметром 8 мм в гранит (в) 1 и в органическое стекло – 2

По теории Герца коническая трещина не должна возникнуть при внедрении шара в полуплоскость (нет растяжения) вблизи поверхности, но они есть (расчетами в ANSYS это доказано) и они будут расположены вне контактной площадки через 0,1–0,2 мм за ее периметром и величины напряжений растяжений достаточны для зарождения сначала на дефектах материала. В хрупких материалах, с низкой вязкостью разрушения (силикатное стекло  $K_{1c}=1,0$  МПа\*м<sup>1/2</sup>,  $K_{2c}=0,5$ ), конические трещины образуются легко, они симметричны, когда нагрузка на шар вертикальная, но если сила приложена под углом – то в сторону движения шара – коническая трещина имеет угол  $10^0$  к поверхности, а задний фронт трещины, почти  $30^0$  (симметричная коническая трещина Герца имеет угол около  $20^0$ ). При качении шара по стеклу образуется цепь из конических трещин, имеющих

взаимные пересечения подобные олимпийским кольцам и, если шар по стеклу перекачивать несколько раз по одной дорожке, то коническая трещина Герца в местах пересечений будут местами множественных выколов, и старта разных подповерхностных трещин, которые подрастают перед катящимся шаром, но эти процессы очень трудно анализировать (сложные явления, много трещин).

При нормальном нагружении шаром, получается в полиэтилене (толстая пачка пластин толщиной 1 мм) ясная картина плоской деформации и трещин (рис. 12). В начале нагружения площадка под шаром имеет диаметр около 0 и начинает увеличиваться. От поверхности шара вглубь полимера образуется несколько наклонных коротких линий сдвига. Площадь контакта с ростом нагрузки увеличивается.

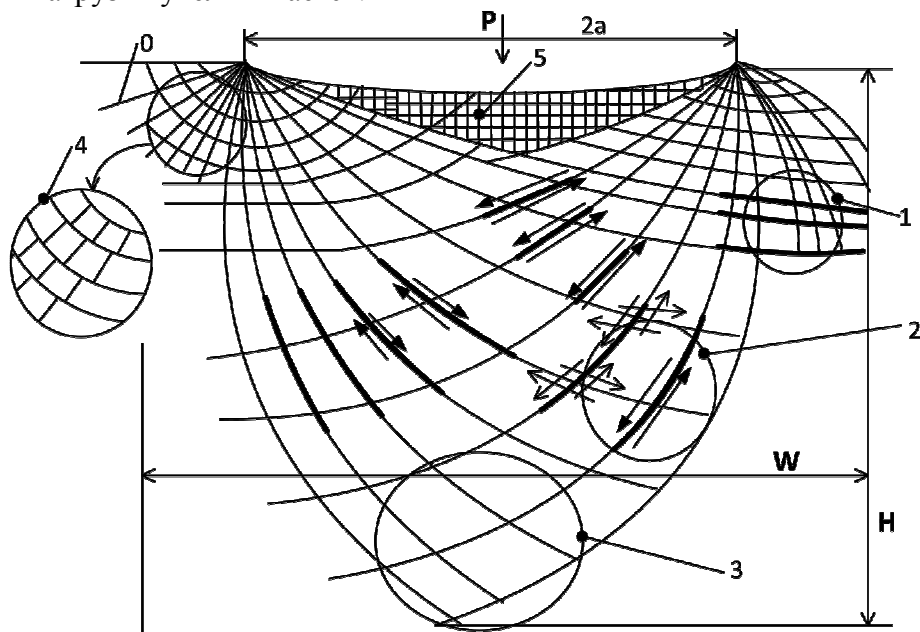


Рис. 2. Напряженное состояние в зоне деформации при внедрении шара под действием вертикальной силы  $P$  0,1,2,3,4 – зоны образования трещин. 4 – образование ступеней и трещин на линиях сдвигов; стрелочки – направление сил сдвига.  $P=2500\text{Н}$ ,  $W=H=3,2\text{ мм}$ ,  $2a=2,5\text{ мм}$ .

Все поверхностные трещины, которые оказываются внутри контактной площадки – закрываются, но их продолжения, которые оказываются вне контактной площадки, подрастают в длину, одновременно искривляя свой путь наподобие фигуры подсолнуха, т.е. идет образование сначала линий сдвига в виде спиралей, а затем некоторые полосы сдвига раскрываются и получают трещины смешанного типа  $K_1/K_2$ . Старая задача – какие больше радиальные или окружные напряжения, вокруг контактной площадки при внедрении шара в полуплоскость. По нашим экспериментам – они почти одинаковые. Теперь понятно, что старт конической трещины Герца выглядит так: а) достигаем пороговых больших контактных напряжений (по нагрузке на шар,  $\varnothing$  КП и диаметру шара в момент образования конических трещин можно

через ANSYS определять разрушающие напряжения и считать  $K_{Ic}$  (например для силикатного стекла 250 МПа)), образуется касательная (первая) короткая трещина на будущей окружности конической трещины, она образуется на дефекте стекла, и сразу она начинает удлиняться по кругу конической трещины, пока не замкнется в окружность. Если трещина еще не круглая, а полдиаметра и шар передвинуть чуть в сторону, будет образовываться новая трещина, на новом месте, а старая никак не взаимодействует с новой. В полистироле, почему-то, образуется при нагрузке – разгрузке до 13 концентрических трещин. При увеличении нагрузки на шар старые трещины, состоящие из коротких касательных трещин по периметру (вне) КП, попадая в площадь контакта, закрываются, а их вершины (этих трещин), которые начинают удлиняться и выглядят как раскрытые трещины вне контактной площадки, начинается рост, удлинение по этим криволинейным красивым фигурам, известным в теории пластичности как поле линий скольжения при упругопластической деформации. При сжатии шара с полуплоскостью – плоская деформация – по оси симметрии под шаром выглядит как классическое распределение линий скольжения (рис. 2). Прямо под шаром находится зона затрудненной деформации 5, где по центру действуют максимальные удельные давления, температуры в граните, (рис. 1, точка С диаграммы) достигают  $900^{\circ}\text{C}$ . Если материал имеет до деформации равновесные зерна, допустим 100 мкм, то после деформации верхние около 30 слоев превращаются в плоские кирпичики с 2-3 кратной длиной и шириной (это объясняет почему на дорожке качения искусственная поперечная поверхностная трещина раскатывается, а не растет вглубь). Наоборот, трещина, нанесенная под острым углом к поверхности и навстречу качению, имеет шансы развиваться и в питтинг и позже в спаллинг – трещины.

Очевидно, форма трещин при контакте качения, фазы их роста, как и поведение дефектов, трещин при нормальном однократном индентировании говорит о том, что небольшие изменения условий трения и направления результирующей силы приводят к другим видам разрушения (например, в литературе еще нет описания  $\psi$  - трещин и т.д.), т.е. контактная задача – многослойная непрерывная система. Где на каждом уровне разные величины  $K_1/K_2$ , их зависимость от глубины и места относительно контактной площадки, влияние остаточных напряжений сжатия от качения, или лазерного дробеструйного наклепа, говорит о необходимости подробных исследований.

На рис. 2 выделим 5 зон, где образуются трещины: Зона 0 – образуется коническая трещина из углов контактной площадки и направлена под углом  $20^{\circ}$  наружу от КП. Зоны 1 и 2 – это места подрастания трещин, образованных в линиях сдвига на глубине около  $0,5a$  под контактной площадки, чуть в стороне от оси симметрии. Есть еще одна зона – 3 для образования и роста вертикальной трещины, но она реализуется, если на контактной площадке есть определенные условия: а) отсутствует трение; б) если при качении, за счет трения, картина изохром (их распределение) отклоняется под действием наклона результирующей силы  $P$ . Есть еще зона 4, здесь зона Прандтля, где есть некоторое выталкивание материала вне периферии контактной площадки

вверх, образуются за счет больших градиентов деформации ступенчатые трещины идет первоначальное растрескивание, по радиусам и затем сдвиг по каналам (своим) перемещает кубики наружу.

Если рассмотреть в стереомикроскоп кубики деформаций в зоне, например 2, то они имеют механизм образования пор в углах встречи (рис. 3), и трещин по граням, т.е. связи ослаблены, кубики могут заклиниваться в полосах сдвига, их углы разрушаются, т.е. механизм чем-то похож на канальное прессование, реверсивная пластическая деформация такого механизма небольшая, но пор и трещин образуется много, т.е. объем материала увеличивается на 5% и более.

Таким образом могут быть объяснены причины разрушения гранита при индентировании, путем изучения образования 5 зон трещин под поверхностью материала при индентировании, образования и механизма роста ступенчатых трещин и пор вокруг блоков – параллелепипедов, образование нереверсивных пластических деформаций при контактном сжатии.

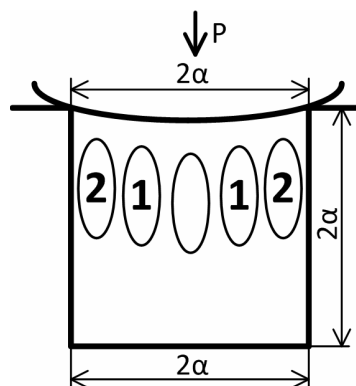


Рис. 3. Зоны максимального раскрытия продольных (1) и поперечных (2) трещин при нормальном нагружении, фотоупругие исследования

#### Список литературы

1. Шур Е.А. Модели образования фактографических рельефов на усталостных трещинах / Е.А. Шур, В.Н. Цвигун, Р.С. Койнов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: сборник научных трудов. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2018. – Вып. 40. – С. 118-135.
2. Жуков И.А. О результатах экспериментального исследования разрушения горной породы ударными воздействиями / И.А. Жуков, В.Н. Цвигун // МашиноСтроение: Материалы девятнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – №19. – С. 125-137.

#### References

1. Shur E. A. Models of formation of factographic reliefs on fatigue cracks / E.A. Shur, V.N. Tsvigun, R.S. Koinov // Bulletin of the mining and metallurgical section of the Russian Academy of natural Sciences. Department of metallurgy: collection of scientific works. – Novokuznetsk: Publ. house SibSIU, 2018. – Vol. 40. – P. 118-135.
2. Zhukov I.A. on the results of an experimental study of rock destruction by impact / I.A. Zhukov, V.N. Tsvigun // Mechanical engineering: Proceedings of the nineteenth scientific and practical conference on mechanics and mechanical engineering. – Novokuznetsk: SibSIU, 2009. – № 19. – P. 125-137.

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Цвигун Владимир Нестерович</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Tsvigun Vladimir Nesterovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Койнов Роман Сергеевич</b> – ведущий специалист по информатизации	<b>Koinov Roman Sergeevich</b> – leading specialist for information
Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк, Россия	Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

Получена 04.04.2019