© Г.М. Крюков, С.Н. Каширский, 2007

УДК 622.235

Г.М. Крюков, С.Н. Каширский

КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ ПО ЛНС ПРИ ВЗРЫВАХ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ПВВ ВБЛИЗИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБНАЖЕНИЯ

При взрывах зарядов ПВВ вблизи дополнительной поверхности обнажения происходят следующие явления:

- формирование трещин в сторону свободной поверхности, но не по ЛНС а под углом 30-60° к ней.
- формирование трещин по ЛНС.
- частичный откол почти не разрушенных кусков породы в сторону свободной поверхности с формированием не до конца проросшей трещины по ЛНС.
- выброс раздробленной массы породы.

Эти явления наблюдались и в наших лабораторных исследованиях на образцах мрамора, силикатных блоках и блоках оргстекла (рис. 1).

По сути дела эти процессы разрушения определяются несколькими явлениями:

- воздействием волн напряжений прямой и отражённой от свободной поверхности;
- формированием квазистатических полей напряжения между взорванным зарядом ПВВ и дополнительной поверхностью обнажения;
- поршневым эффектом действия взорванного заряда ПВВ на породу.

В настоящей работе рассматривается явление выкола клиновидных кусков породы в сторону свободной поверхности. Предполагается, что оно происходит на конечной стадии действия взрыва заряда ПВВ на разрушаемую породу и определяется квазистатическим распределением напряжений в породе между зарядом и свободной поверхностью, а так же поршневым эффектом ПД на породу. Для описания этого явления использовано давно высказанное (см. [1]) предположение о том, что влияние дополнительной поверхности обнажения на процесс разрушения пород взрывом удлинённого заряда теоретически может быть учтено путём введения второго симметричного относительно этой поверхности, «фиктивного», заряда с противоположным знаком. При этом результирующее на-пряжённого состояние в породе вблизи свободной поверхности будет находиться как суперпозиция полей напряжений от обоих зарядов.

При этом были использованы известные соотношения (см. например [2]), преобразования компонентов напряжений при переходе от одних осей координат к другим. Зная 3 компоненты напряжения (в случае плоского напряжённого состояния) относительно одной системы прямоугольных осей координат, возможно вычислить их для другой, по соотношениям:

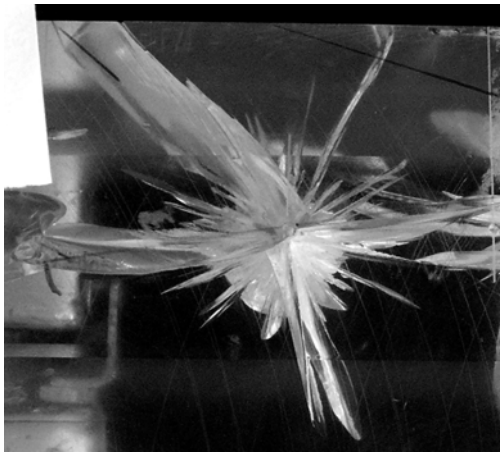

Рис. 1. Взрыв заряда вблизи свободной поверхности без формирования трещины по ЛНС, но с образованием длинных трещин под некоторым углом к поверхности

$$\angle Xr = \alpha_2 \; ; \angle X\alpha = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_2\right)$$

$$\angle Yr = \left(\frac{\pi}{2} + \alpha_2\right); \angle Y\alpha = \alpha_2$$

$$l_1 = \cos(Xr) = \cos\alpha_2$$

$$l_2 = \cos(Yr) = -\sin\alpha_2$$

$$m_1 = \cos(X\alpha) = \sin\alpha_2$$

$$m_2 = \cos(Y\alpha) = -\cos\alpha_2$$

	x	y
x'	l_1	m_1
y'	l_2	m_2

$$\sigma_{XX} = \sigma_{rr,B} \cdot \cos^2 \alpha_2 + \sigma_{\alpha\alpha,B} \cdot \sin^2 \alpha_2 = = \sigma_{rr,B} \cdot \cos 2\alpha_2$$

$$\sigma_{YY} = \sigma_{rr,B} \cdot \sin^2 \alpha_2 + \sigma_{\alpha\alpha,B} \cdot \cos^2 \alpha_2 = = -\sigma_{rr,B} \cdot \cos 2\alpha_2$$

Для простоты оценок рассматривается плоско-деформированное состояние, формирующееся в породе при мгновенном взрыве бесконечно длинного заряда. Как известно, [3, 4] при камуфлетном взрыве этого заряда в непрерывной однородной, изотропной, линейно-упругой среде при $t \to \infty$ (t - время действия взрыва на породу) формируется статическое напряжённое состояние вида:

$$\sigma_{rr} = -P_0\left(\frac{a_0}{r}\right)^2; \; \sigma_{\alpha\alpha} = P_0\left(\frac{a_0}{r}\right)^2;$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{\alpha r} = \sigma_{rz} = \sigma_{\alpha z} = 0 \qquad (1)$$

где σ_{rr} - радиальное напряжение, Па; $\sigma_{\alpha\alpha}$ - полярное напряжение, Па; σ_{zz} - нормальное напряжение параллельное оси заряда, Па; P_0 - постоянное давление в цилиндрической зарядной полости радиусом a_0, Па; r - радиус рассматриваемой точки породы от оси заряда, м.

Прежде всего, была выполнена оценка напряжённого состояния породы на свободной поверхности при указанной суперпозиции полей напряжений.

Рассматривается произвольная точка М в породе (рис. 2) напряжённое состояние в ней будет определяться соотношениями:

От взрыва заряда в точке А –

$$\sigma_{rr,A} = -P_0\left(\frac{a_0}{r_1}\right)^2; \; \sigma_{\alpha\alpha,A} = P_0\left(\frac{a_0}{r_1}\right)^2$$

От мнимого взрыва заряда в точке В –

$$\sigma_{rr,B} = P_0\left(\frac{a_0}{r_2}\right)^2; \; \sigma_{\alpha\alpha,B} = P_0\left(\frac{a_0}{r_2}\right)^2$$

(2)

Суммарные значения для напряжений относительно координат XY будут равны:

$$\sigma_{XX}^{\Sigma} = \sigma_{rr,A} \cdot \cos 2\alpha_1 + \sigma_{rr,B} \cdot \cos 2\alpha_2; \qquad (3)$$
$$\sigma_{YY}^{\Sigma} = -\sigma_{rr,A} \cdot \cos 2\alpha_1 - \sigma_{rr,B} \cdot \cos 2\alpha_2$$

Для точек на свободной поверхности имеют место равенства: $r_1 = r_2$; $\alpha_1 = \alpha_2$ так что с учётом (2) и (3) получаем, что на этой поверхности $\sigma_{YY}^{\Sigma} = \sigma_{XX}^{\Sigma} = 0$. То есть при суперпози-

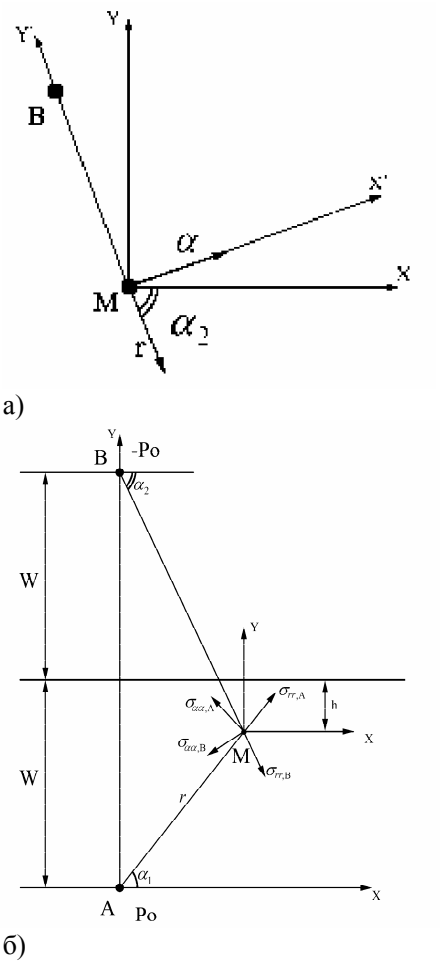

Рис. 2. а) Схема пересчёта напряжений при переходе от одной системы координат к другой; б) Схема суперпозиции статических полей напряжений от воздействия действительного А и «мнимого» В зарядов

ции двух рассматриваемых напряжений от действительного и мнимого зарядов, на свободной поверхности суммарные напряжения равны нулю, так что на ней выполняются граничные условия. Для рассматриваемых процессов при ($W = 20a_0$) напряжения, формирующиеся около зарядной полости действительного заряда А от действия «фиктивного» В, будут иметь порядок $10^{-4} \cdot P_0$. Очевидно, напряжения в породе, при точной (но существенно усложнённой) постановке соответствующей задачи, с учётом напряжений от действия «мнимого» заряда В на стенках зарядной полости заряда А, будут отличаться на сотые доли процента от напряжений по приведённому выше приближённому решению, при выполнении указанных оценок этими различиями, безусловно можно пренебречь. Итак, будем считать что, упомянутое предположение соответствует действительности, а суммарные напряжения (3) могут быть использованы для оценок характера распределения напряжений в породе. Прежде всего, рассмотрим распределение напряжений по ЛНС. Оно равно:

$$\sigma_{rr}^{\Sigma} = -P_0\left(\frac{a_0}{r_1}\right)^2 + P_0\left(\frac{a_0}{r_2}\right)^2 \quad ;$$
$$\sigma_{\alpha\alpha}^{\Sigma} = P_0\left(\frac{a_0}{r_1}\right)^2 - P_0\left(\frac{a_0}{r_2}\right)^2 \qquad (4)$$

Относительное изменение растягивающих полярных напряжений по ЛНС с приближением к свободной поверхности будет определяться соотношением:

$$\overline{\sigma}_{\alpha\alpha}^{\Sigma} = 1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 \qquad (5)$$

Для определённости ниже приводятся конкретные расчеты для взрыва заряда граммонита 79/21 в граните при следующих параметрах: давление в зарядной полости $P_0 = P_ж = 6{,}8 \cdot 10^9$ Па; радиус заряда $a_0 = 0{,}125$ *м*; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}22$; модуль Юнга $E = 6{,}610^{10}$ *Па*; плотность породы $\rho_{пр} = 2{,}7 \cdot 10^3$ *кг / м*^{3}; скорость продольных волн в породе $C_1 = 5283$ м/с; показатель политропы $\gamma = 3{,}08$; предел

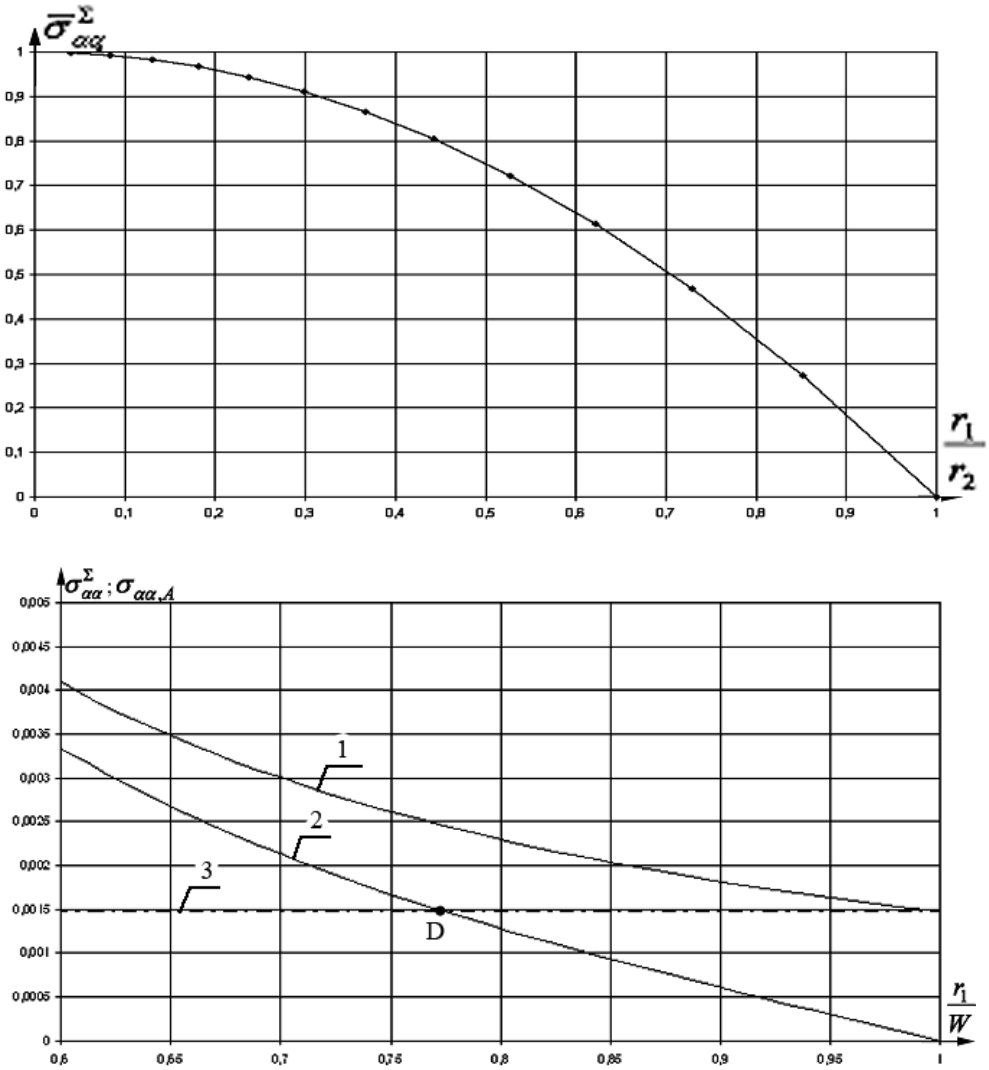

Рис. 3. а) график уменьшения суммарного растягивающего напряжения по ЛНС с приближением к свободной поверхности; б) сопоставительный график уменьшения растягивающих напряжений и растягивающих напряжений по ЛНС с приближением к свободной поверхности без учёта её влияния (1) и с учётом её влияния (2); 3 - $\sigma_{рас}$. $\overline{\sigma}^{\Sigma}_{\alpha\alpha} = \frac{\sigma^{\Sigma}_{\alpha\alpha}}{\sigma^{\Sigma}_{\alpha\alpha(0)}}$

прочности на одноосное растяжение $\sigma_{рас} = 1 \cdot 10^7$ *Па*; предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 1{,}38 \cdot 10^8$ *Па*; плотность ВВ: $\rho_{ВВ} = 1{,}1 \cdot 10^3 кг/м^3$.

В расчетах было принято

$$W = b_0 = a_0 \sqrt{\frac{P_{ж}}{\sigma_{рас}}}$$

Рис. 4. Уменьшение суммарных полярных растягивающих напряжений $\sigma_{\alpha\alpha}^{\Sigma}$ ***по ЛНС с удалением от центра заряда на расстояние при фиксированных значениях*** r ***и с увеличением полярного угла*** α***.*** $r =$ ***:*** *1 -* $5a_0$; *2 -* $10a_0$; *3 -* $15a_0$; *4 -* $20a_0$; *5 -* $25a_0$; *6* – дополнительная поверхность обнажения

где $P_{ж}$ - давление в точке Жуге, Па; b_0 - радиус зоны регулируемого дробления: м.

Так что при камуфлетном взрыве удлинённого заряда во всех точках породы на расстояниях $r = b_0$ полярное (растягивающее) напряжение равно $\sigma_{рас}$.

Соотношение (5) описывает уменьшение полярного растягивающего напряжения по ЛНС за счёт влияния свободной поверхности с приближением к ней. При этом суммарное напряжения $\sigma_{\alpha\alpha}^{\Sigma}$ на ЛНС будет меньше чем $\sigma_{рас}$ на расстояниях $\bar{r} \geq 0{,}77$ (рис. 3. т. D) и следовательно, на этих расстояниях не будет развиваться радиальная трещина по ЛНС. То есть в результате воздействия на породу отражённой от свободной поверхности взрывной волны имеет место замедление (блокировка) роста трещины по ЛНС, а не усиление развития этой трещины как принято считать [1, 2].

Особенно чётко уменьшение полярных растягивающих напряжений по ЛНС за счёт влияния дополнительной поверхности ($\alpha = 90°$) обнажения видно на графиках, представленных на рис. 4. Расчеты на этом рисунке выполнены при указанных выше параметрах ПВВ и гранита при которых $b_0 = 26{,}08 \cdot a_0$. Из этих графиков следует, что с увеличением r - расстояния рассматриваемых точек породы от центра заряда, полярные растягивающие напряжения с увеличением α, то есть с приближением к свободной поверхности ($\alpha = 90°$ - соответствует ЛНС) уменьшаются. Таким образом, под влиянием дополнительной

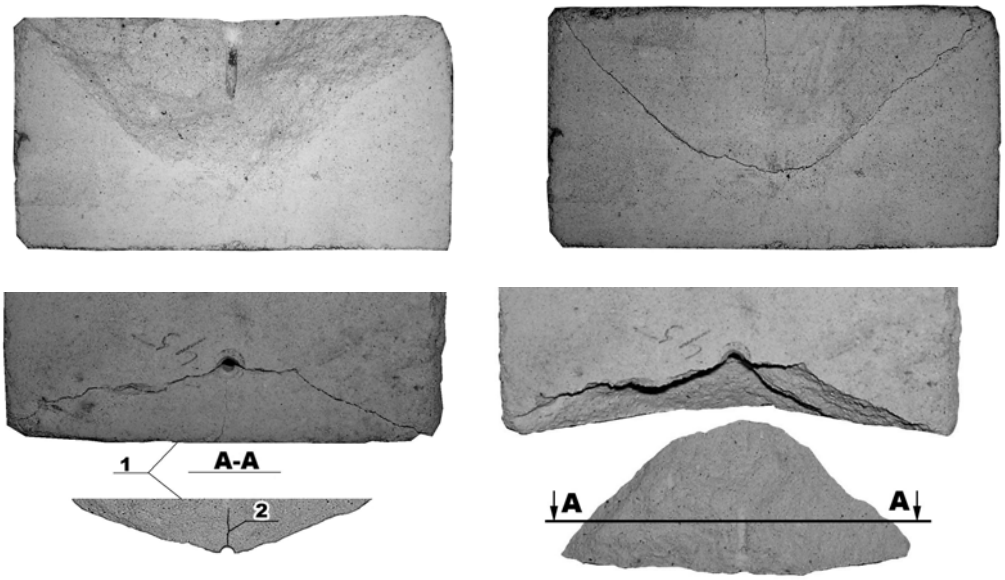

Рис. 5. Фотография силикатного блока, в котором под действием прямой и отражённой волн образовался выкол с не до конца проросшей трещиной по ЛНС:
1 – дополнительная поверхность обнажения; *2* – трещина по ЛНС

поверхности обнажения преимущественное развитие получают трещины, направленные не по ЛНС, а под некоторым углом к ней, подтверждая тем самым известные результаты лабораторных исследований (см. рис. 1). Именно этим обстоятельством обусловлен процесс выкола кусков породы в сторону свободной поверхности под действием поршневого эффекта ПД. В самих же откалываемых кусках породы формируется трещина по ЛНС, не доходящая до поверхности обнажения. Причём для рассматриваемых параметров ПВВ и гранита значение $\sigma_{\alpha\alpha}^{\Sigma} = \sigma_{рас}$ будет иметь место на расстояниях $\cong$ на 20 % меньше чем при взрыве одиночного заряда. Таким образом, эти оценки, опирающиеся только на квазистатическое распределение напряжений в породе между зарядом и свободной поверхностью, показали, что за счёт влияния свободной поверхности, длина трещины по ЛНС, не увеличивается, как было принято считать [1, 5], а уменьшается по сравнению с длинной радиальной трещины при камуфлетном взрыве такого же заряда.

В действительности же процессы формирования трещины по ЛНС и явления выкола кусков породы в сторону дополнительной свободной поверхности существенно зависят ещё от временной суперпозиции прямых и отражённых волн. Соответствующие оценки будут предметом дальнейших исследований.

Приведённые оценки впервые позволили объяснить экспериментальные факты первичного формирования радиальных трещин не по ЛНС, а под некоторым углом с дополнительной свободной поверхностью и явление откола кусков породы в сторону свободной поверхности от взорванного заряда. Причём в этих кусках трещина по ЛНС про-

растает не до конца (до дополнительной свободной поверхности), а их сечение плоскость перпендикулярной оси заряда имеет треугольную форму.

Выводы

1) При квазистатических оценках введение второго «мнимого» заряда с обратным знаком и расположенного симметрично действительному относительно свободной поверхности, нулевые граничные условия выполняются, что позволяет использовать этот приём для расчёта реального квазистатического напряжённо-де-формируемого состояния породы между взорванным удлинённым зарядом ПВВ и этой поверхностью.

2) Дополнительная поверхность обнажения снижает уровень квазистатического напряженно-де-формируемого состояния породы между этой поверхностью и зарядом, блокируя тем самым рост трещины по ЛНС и способствуя росту трещин в сторону дополнительной поверхности обнажения под углом φ π 90° к последней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Суханов А.Ф. Кутузов Б.Н.* Разрушение горных пород взрывом. Учебник для ВУЗов – М.: Недра, 1983, 344 с.
2. *Крюков Г.М., Глазков Ю.В.* Феноменологическая квазистатистическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ: Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня – М.: Издательство Московского государственного горного университета. 2003.
3. *Лейбензон Л.С.* Курс теории упругости. – М.: 1947, 459 с.
4. *Lame G.* Lecons sur la theorie mathematique de l'elasticite descorps solides. — Paris, 1852, 355 p.
5. *Крюков Г.М.* Физика взрывного разрушения. Учебное пособие - М.: МГИ, 1986, 64 с.

Коротко об авторах

Крюков Г.М. – доктор технических наук, профессор,
Каширский С.Н. – аспирант,

Московский государственный горный университет.

Р У К О П И С И ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Мазуркевич А.С.* Охрана окружающей среды утилизацией хвостов обогащения для погашения пустот (557/03-07 — 02.11.06) 3 с.
2. *Трушин А.В.* Эволюция моделей экономического развития от индустриальных к инновационным (558/03-07 — 16.01.07) 15 с.