

П.З.Луговой¹, Н.Я.Прокопенко¹, С.П.Орленко²

**УПРАВЛЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕМ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
НЕВЗРЫВЧАТЫХ РАЗРУШАЮЩИХ СМЕСЕЙ**

¹ *Институт механики им. С.П. Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; plugovyy@inmech.ksev.ua*

² *Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина; orlenko_sergey@ukr.net*

Abstract. The physico-mechanical processes which take place under the crack of rock in the chosen direction with use of plates-inserts in the blast hole with non-explosive destructive compound mixes (NDCM) are studied theoretically. With use of strength ellipse of rock for the plane problem and the third strength condition, the process of crack nucleation in the chosen direction in the blast hole with plate inserts under NDCM is studied. The graphs for determination of technological parameters are obtained: the angle β determining the plate-insert arrangement to obtain the crack by angle α to the small strength ellipse of rock and the pressure on dependence of the necessary direction of crack nucleation. It allows to improve the mining technology of stone block and destruction of coal pillars by the blast hole method with use the plate inserts and NDCM.

Key words: rock, unexplosive destructive compound mixes, plate-insert, plane problem of theory of elasticity, angle of crack direction, technological parameters.

Введение.

Промышленное использование невзрывчатых разрушающих смесей (НРС) для добычи блочного камня, отбойки угольных целиков, проходки тоннелей, разрушения негабаритов или старых фундаментов на строительстве продолжается уже более тридцати лет. Опыт использования НРС подтвердил перспективность образования в шпурах искусственных концентраторов напряжений с помощью вставных элементов для образования трещин в породе в заданном направлении. Так, в работах [1, 2] с такой целью предложена пластина-вставка, а в статье [8] армирующие элементы в шпурах с НРС для экономного разрушения угольных целиков имеют форму цилиндрического тела, которое в поперечном разрезе образует замкнутую форму, составленную в виде двух параболических очертаний. В патенте [7] разработан способ разрушения горных пород с помощью НРС и патрон для его реализации. В полезной модели [9] проведено усовершенствование указанного способа. В американском патенте [17] использовано НРС для шадящей отбойки каменных блоков и разрушения фундаментов. В этих работах на интуитивном уровне предложено использовать пластины разного поперечного сечения в шпурах с НРС для раскола породы шпуровым методом в заданном направлении. Для использования этих методов в инженерном деле необходимо проводить ряд сложных экспериментов для определения технологических параметров как для пластин-вставок, так и для пород с разными физико-механическими свойствами для каждого отдельного случая. Поэтому разработка теоретических методов для определения геометрических размеров пластин-вставок и их ориентации в шпурах с НРС для раскола горной породы в заданном направлении является актуаль-

ной научно-технической задачей. Одними из первых работ в данном направлении являются статьи [10 – 12], где положено начало теоретических исследований раскола блочного камня при использовании пластин-вставок в шпурах с НРС. В работе [5] для определения значения параметров технологии управления расколом породы использован метод конечных элементов и определены эпюры распределения напряжений, достаточно полно проведены теоретические исследования физико-механических процессов, которые происходят при расколе горной породы в заданном направлении с использованием пластин-вставок в шпурах с НРС. Для плоской задачи теории упругости с использованием третьего условия прочности исследован процесс зарождения трещины в заданном направлении по строчке шпуров при статических нагрузках и получены графики для определения технологических параметров: давления в зависимости от радиуса шпура, толщин пластин-вставок и свойств горной породы. Для дальнейшего усовершенствования технологии применения пластин-вставок в шпурах с НРС для раскола породы в заданном направлении необходимо более детально теоретически исследовать влияние неоднородности пород на процессы трещинообразования, которые при этом происходят.

1. Постановка задачи. Разрешающие уравнения.

Основным направлением использования НРС является добыча блочного камня с применением пластин-вставок в шпурах диаметром 40 мм. Поэтому, в основном, ниже будем исследовать технологию трещинообразования с помощью пластин-вставок при действии НРС на характерные горные породы, которые указаны в таблице.

| п/п | Горная порода | Модуль упругости E, МПа | Коэф. Пуассона | Граница прочности на растяж. $[\sigma_p]$, МПа | Граница прочности на сжатие $[\sigma_c]$, МПа | Удельный вес, Т/м |
|-----|------------------|-------------------------|----------------|---|--|-------------------|
| 1 | Диабаз | 93800 | 0,27 | 11 | 157 | 2,87 |
| 2 | Лабрадорит | 90000 | 0,33 | 20 | 200 | 2,76 |
| 3 | Порфирит | 88500 | 0,31 | 20 | 160 | 2,93 |
| 4 | Кварцевый порфир | 70000 | 0,21 | 38 | 336 | 2,63 |
| 5 | Гранит розовый | 57400 | 0,18 | 17 | 170 | 2,59 |
| 6 | Мрамор черный | 57400 | 0,32 | 21 | 75 | 2,82 |

Поскольку горные породы, указанные в таблице, имеют границу прочности на сжатие $[\sigma_c]$ и границу прочности на растяжение $[\sigma_p]$, то можно приближенно в плоском случае построить изолинии разрушения пород в точке в виде эллипсов следующего вида:

$$\frac{\sigma_x^2}{[\sigma_p]^2} + \frac{\sigma_y^2}{[\sigma_c]^2} = 1. \quad (1)$$

В формулу (1) входят напряжения σ_x и σ_y , поэтому необходимо определить их распределение вокруг шпура с пластиной-вставкой при действии НРС, чтобы определить наиболее вероятное направление раскола камня. Если в формуле (1) не определены напряжения σ_x , σ_y , то направление трещины при разрушении гранита будет неопределенным.

При щадящем режиме бурения шпуров размеры образующихся микротрещин на их кромках очень незначительны по сравнению с поперечным сечением шпуров и пластин-вставок, а кристаллы, с которых состоит порода, расположены хаотично; поэтому при постановке задач об исследовании напряженно-деформируемого состояния около шпуров с пластинами-вставками согласно [6] будем использовать модель изотропной сплошной среды. Диаметры шпуров при этом намного меньше их длины,

поэтому напряженное состояние около них соответствует состоянию плоской деформации. При этом для каждого сечения, перпендикулярного к оси шпура, будем иметь одинаковое распределение напряжений около контура шпура. Поскольку распределение деформаций около шпура при плоской деформации отличается только лишь константами от подобной задачи для плоского напряженного состояния, то моделирование распределения напряжений около шпура от действия НРС можно провести на пластинах с отверстием, к контуру которого приложены напряжения от действия НРС при наличии пластины-вставки. Прямоугольные пластины единичной толщины, размерами не меньше пяти диаметров шпура, вырезаются перпендикулярно к оси шпура. Принимаем, что края пластины жестко закреплены, а пластина-вставка абсолютно жесткая.

Известно, что при нагружении стенок шпуров с помощью НРС материал горной породы не может все время быть упругим и перейдет в состояние, которое назовем «состоянием за пределом упругости». Допустим, что это состояние будет иметь место в некоторой области около шпура. Напряженное и деформированное состояние за пределом упругости определяется соотношениями теории пластичности. Пластичный материал характеризуется тем, что не может воспринимать напряжения, которые превосходят определенную границу текучести. Условие пластичности для плоского напряженного состояния принимаем в виде [13]:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2, \quad (2)$$

Условие пластичности (2) и уравнения равновесия плоского напряженного состояния [20]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

составляют замкнутую систему уравнений плоской задачи теории пластичности относительно трех компонент напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$.

Если в уравнении пластичности (2) принять $k = \sigma_s / 2$, где $\sigma_s = [\sigma_p]$ – граница прочности породы при одностороннем растяжении, то уравнение пластичности (2) преобразуется в третий закон прочности для горной породы, который будет близким к эллиптической зависимости.

Следует отметить, что в области возможного изменения внешних нагрузок не должны возникать зоны разгрузок. При разгрузке использование условия (2) является незаконным. Нагрузки, которые образуются на стенках шпуров с пластинами-вставками статическими усилиями от НРС для отделения каменных блоков и разрушения пород зоны разгрузки, отсутствуют, поэтому при решении конкретных задач будем использовать условие прочности (2).

Проведем исследование влияния пластины-вставки в шпуре с НРС на напряженное состояние около шпура, что позволит определить направление раскола камня и соответствующие технологические условия. Согласно паспортным данным НРС [4] не в состоянии создать давление больше чем $[\sigma_c]$ горной породы, поэтому здесь и далее, в отличие от работ [15, 16, 18, 19], за условие возникновения трещины в точке будем принимать достижение в этой точке напряжений, равных $[\sigma_p]$. На рис. 1 приведена схема распределения давления от НРС в шпуре с пластиной-вставкой.

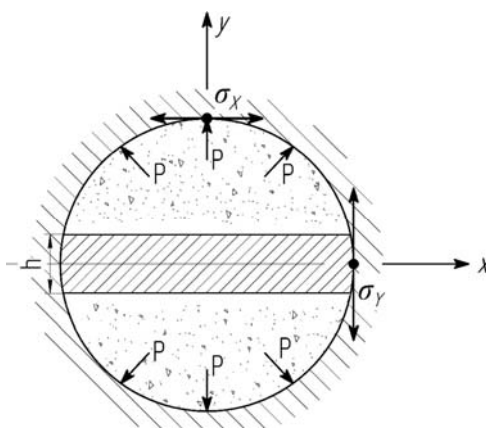


Рис. 1

Присутствие пластины-вставки изменяет нагрузку на кромку шпура и граничные условия на дугах контура шпура можно представить в таком виде:

$$-P(h) = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + \tau_{yx} \sin 2\theta; \quad 0 = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} \cos 2\theta,$$

$$\text{где } P(h) = A(\pi R^2 - h\sqrt{4R^2 - h^2}); \quad (4)$$

здесь A – удельное давление от НРС в шпуре без пластины-вставки – МПа/мм² [5]; R – радиус шпура – мм; h – толщина пластины-вставки – мм.

Для определения распределения напряжений около шпура с пластиной – вставкой имеем следующую краевую задачу: уравнения (2), (3); граничные условия на контуре шпура (4); на торцах пластины – $u_x = u_y = 0$, где u_x – перемещения точек пластины вдоль оси x , u_y – перемещения точек пластины вдоль оси y . Таким образом, имеем краевую задачу плоского напряженного состояния, когда на контуре шпура заданы силовые условия, а на краях пластины – заданы перемещения.

Поставленная выше задача о плоском напряженном состоянии около шпура с пластиной-вставкой при действии НРС решена методом конечных элементов [21] с помощью аттестованного конечноразностного программного комплекса ANSYS Workbench [3] и результаты приведены в статье [5].

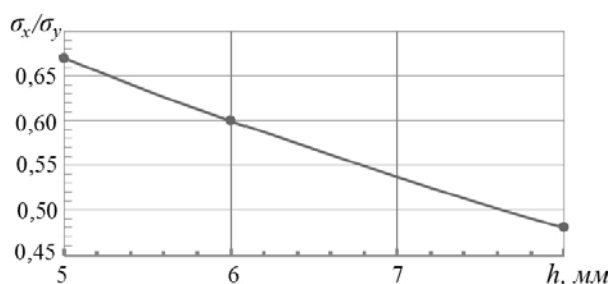


Рис. 2

Полученные результаты теоретических исследований позволили построить зависимость σ_x/σ_y от толщины пластины-вставки h , представленную на рис. 2 [9]. Эта зависимость позволяет количественно характеризовать взаимодействие напряжений σ_x и σ_y в процессе кристаллизации НРС в зависимости от толщины пластины-вставки h в шпуре.

Следует отметить, что функция $\sigma_x/\sigma_y = f(h)$ – подобная для всех пород при плоском напряженном состоянии, поскольку она имеет аналитическое выражение – $\sigma_x/\sigma_y = (v\varepsilon_x + \varepsilon_y)/(v\varepsilon_y + \varepsilon_x)$ и явно не зависит от упругих модулей горных пород.

Из условия прочности (2) следует, что максимальные растягивающие напряжения σ_y достигаются на торцах пластины-вставки, а ее ось определяет направление трещинообразования [5]. В данном случае пластины-вставки играют роль искусственных концентраторов напряжений.

Если условие прочности в виде (2) приближенно аппроксимировать эллипсом 2 на рис. 3 ($(x'^2/a_1^2 + y'^2/b_1^2 = 1)$), то отношение σ_x/σ_y будет соответствовать отношению a_1/b_1 малой полуоси эллипса к большой полуоси, которая $b_1 \geq [\sigma_p]$.

Известно, что много гранитов имеют природные трещины, направление которых совпадает с направлениями, по которым откол блоков выполняется с наименьшими энергозатратами. В этом случае малую ось эллипса 1 $[\sigma_p]$ (рис. 3), который описывает изолинии разрушения гранитов в плоском случае, совместим с указанным выше направлением, а центр шпура с пластиной-вставкой совместим с центром эллипса 1 таким образом, чтобы ось пластины-вставки совпадала с малой осью эллипса 1 (см. рис. 3).

Теоретически доказано, что за счет увеличения нагрузок на стенки шпура во время реакции кристаллизации НРС [12] в шпуре с пластиной – вставкой размеры внутреннего эллипса 2, который соответствует условию прочности для плоского случая (2), будут увеличиваться. В момент касания большей вершины малого эллипса 2 (рис. 3), который в это время имеет вид: $\frac{x'^2}{a_1^2} + \frac{y'^2}{[\sigma_p]^2} = 1$ и аппроксимирует

условие прочности (2), по оси X образуется трещина.

При отделении гранитных блоков часто возникает технологическая необходимость образовать трещину раскола не по направлению природных трещин, а между осями (σ_x) (X), (σ_y) (Y), которые условно назовем осями ортотропии. В таком случае необходимо определить зависимость угла между пластиной – вставкой и нужным углом, который определяет направление раскола.

Разработанная на основе теоретических исследований методика управления направлением трещинообразования в секторе между осями ортотропии (эллипс 1) базируется на двух предположениях, а именно:

- изменение изолиний прочности породы в сечении шпура может быть представлено эллипсом (1);

- распределение напряжений, которые возникают в результате реакции кристаллизации НРС в шпуре, где находится пластина-вставка и входят в третье условие прочности для плоского случая (2), также опишем замкнутой кривой, близкой к эллипсу 2 (рис. 3).

Представленные ниже исследования метода управления направлением трещинообразования в секторе между осями ортотропии базируются на анализе связей между такими параметрами:

- максимальная граница прочности породы на растяжения $[\sigma_p]$. Условно принимаем, что эти напряжения направлены вдоль оси X шпура (рис. 3);

- максимальная граница прочности породы на сжатие $[\sigma_c]$. Условно принимаем, что эти напряжения направлены вдоль оси Y шпура (рис. 3);

- толщина пластины-вставки h (рис. 3);

- α угол между требуемым направлением трещинообразования через точки A и A' и осью X эллипса (1), β – угол между осью X эллипса (1) и осью X пластины-вставки, что обеспечивает образование трещины под углом α к оси X эллипса (1).

На рис. 4 показано промежуточный случай реакции кристаллизации НРС в шпуре с пластиной-вставкой, когда эл-

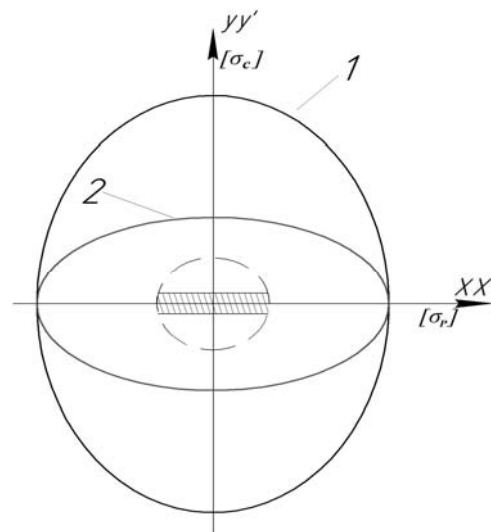


Рис. 3

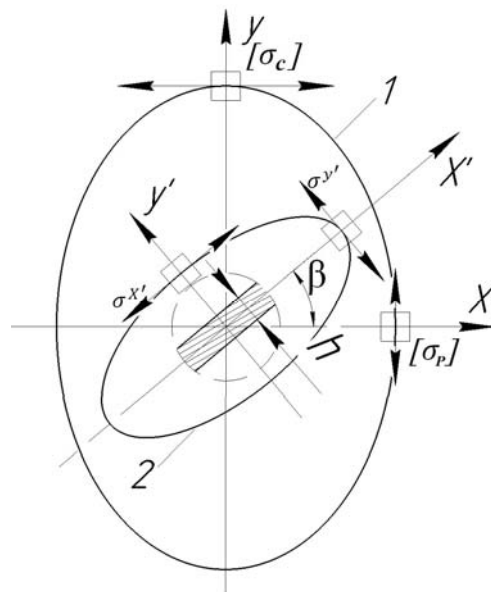


Рис. 4

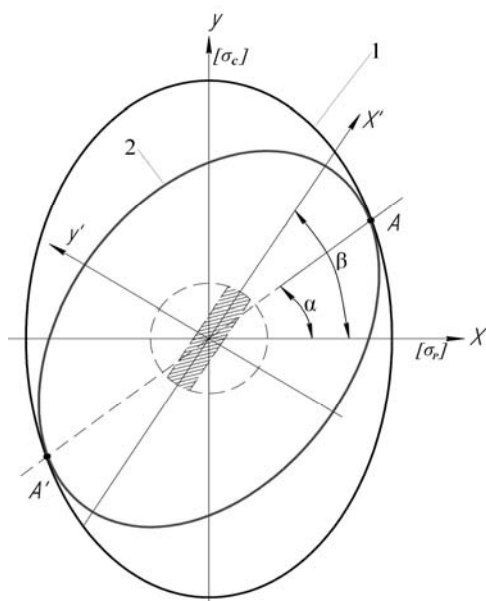


Рис. 5

Отметим, что эллипс (1) и условие прочности (2) описываются кривыми второго порядка, потому, в общем случае, они пересекаются в четырех точках, а в случае их касания пересекаются только в двух точках (рис. 5). Это и есть аналитическое условие для определения точек касания эллипсов и направления трещинообразования. Кроме этого, прямая AA' проходит через центр шпура и пересекает ось X под углом α , то ее уравнение можно записать в виде $Y = X \operatorname{tg} \alpha$. Из рис. 5 следует, что точки пересечения этой прямой с эллипсом 1 совпадают с точками касания внутреннего эллипса 2 с эллипсом 1 (рис. 5). Решив совместную систему уравнений (1) и $\sigma_y = \sigma_x \operatorname{tg} \alpha$ получим координаты точек касания внутреннего и внешнего эллипсов в таком виде:

$$X(x_0) = \pm \frac{[\sigma_p][\sigma_c]}{\sqrt{[\sigma_c]^2 + [\sigma_p]^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}; \quad Y(y_0) = \pm \frac{[\sigma_p][\sigma_c]}{\sqrt{[\sigma_c]^2 + [\sigma_p]^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Из рис. 5 графически легко определить на сколько следует увеличить давление в шпуре с пластиной-вставкой от НРС, чтобы трещина образовалась под углом α к оси X . Для этого следует раствором циркуля с начала координат провести кривую радиусом, который равен большей полуоси малого эллипса 2 (рис. 5) до пересечения с осью X .

При этом определяется такой важный технологический параметр, как угол β между осью пластины-вставки X' и осью X . Именно установка оси пластины-вставки X' под углом β к оси X обеспечит трещинообразование в шпуре в направлении под углом α к оси X (рис. 5) (к направлению природных трещин в граните).

Для проведения конкретных исследований с целью определения реальных значений угла β в зависимости от угла α зададимся следующим комплексом условий:

ортотропные свойства гранитов будем характеризовать используя уравнение эллипса (1) (направления осей $[\sigma_p][\sigma_c]$);

характер действия НРС в шпуре с пластиной – вставкой описывается эллипсом, который соответствует условию прочности (2), соотношения осей которого для разных толщин h пластин – вставок определяются согласно графической зависимости на рис. 2;

толщина пластины – вставки h равна: $5 \div 8$ мм;

радиус шпура $R = 20$ мм.

эллипсы 1 и 2 (рис. 4) не имеют совместных точек. Соотношения осей меньшего эллипса на рис. 4 равно отношению напряжений σ'_y/σ'_x (рис. 2), направленных вдоль осей X' и Y' . Эти соотношения значительно зависят от толщины пластины-вставки h [5]. Процесс трещинообразования в направлении под углом α к оси X происходит следующим образом: на первом этапе размеры меньшего эллипса 2, который подобен условию прочности (2), увеличиваются при действии НРС [12] без точек взаимного соприкосновения с эллипсом 1. Затем размеры меньшего эллипса увеличиваются с усилением действия НРС до того момента, когда произойдет касание малого 2 и большого 1 эллипсов в точках A и A' , что и определит начало раскола камня в направлении AA' , который произойдет под углом α к оси X (рис. 5).

Момент, когда произойдет касание малого и большого эллипсов в точках A и A' , определит начало раскола камня в направлении AA' , который произойдет под углом α к оси X (рис. 5). Координаты точки касания эллипсов (5) условно обозначим через x_0, y_0 .

Уравнение эллипса 1 (рис. 5) в координатах X, Y запишем в следующем виде: $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, а эллипса 2 (рис. 5) – в координатах X', Y' в виде $x'^2/a_1^2 + y'^2/b_1^2 = 1$.

Система координат X', Y' повернута относительно системы координат X, Y на угол β . Чтобы записать уравнение эллипса 2 (рис. 5) в координатах x, y необходимо выполнить аффинное преобразование координат x', y' в следующем виде:

$$x' = x \cos \beta + y \sin \beta; \quad y' = -x \sin \beta + y \cos \beta. \quad (6)$$

Подставив выражения (6) в уравнение эллипса 2 (рис. 5), получим его уравнение в координатах x, y

$$\frac{(x \cos \beta + y \sin \beta)^2}{a_1^2} + \frac{(-x \sin \beta + y \cos \beta)^2}{b_1^2} = 1. \quad (7)$$

В точке с координатами x_0, y_0 (5) выполняется равенство

$$\frac{(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)^2}{a_1^2} + \frac{(-x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta)^2}{b_1^2} = \frac{\sigma_x^2}{[\sigma_p]^2} + \frac{\sigma_y^2}{[\sigma_c]^2} = \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2}. \quad (8)$$

Уравнение касательной к каноническому уравнению большого эллипса (1) в точке (5) имеет вид

$$\frac{x_0 x}{a^2} + \frac{y_0 y}{b^2} = 1, \quad (9)$$

а уравнение касательной в точке (5) к малому эллипсу (7), которое задано в неявном виде, записывается следующим образом:

$$\frac{(x \cos \beta + y \sin \beta)}{a_1^2} (x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta) + \frac{-x \sin \beta + y \cos \beta}{b_1^2} (-x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta) = 1. \quad (10)$$

Приравняем уравнения (9) и (10) и соберем коэффициенты при x и y ; получим систему алгебраических уравнений относительно $(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)/a_1^2$ и $(-x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta)/b_1^2$, решение которой имеет следующий вид:

$$a_1^2 = \frac{x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta}{\frac{x_0}{a^2} \cos \beta + \frac{y_0}{b^2} \sin \beta}; \quad b_1^2 = \frac{-x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta}{\frac{-x_0}{a^2} \sin \beta + \frac{y_0}{b^2} \cos \beta}. \quad (11)$$

Перейдем в (11) вместо $\sin \beta$ и $\cos \beta$ к $\operatorname{tg} \beta$ и получим следующие выражения для a_1^2 и b_1^2 :

$$a_1^2 = \frac{a^2 b^2 (1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta)}{b^2 + a^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}; \quad b_1^2 = \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) a^2 b^2}{a^2 \operatorname{tg} \alpha - b^2 \operatorname{tg} \beta}.$$

Используя условие, что отношение $\sigma_x/\sigma_y = b/a$ (рис. 2), рассмотрим случай, когда $b_1 = 0, b \cdot a_1 = c \cdot a_1 \Rightarrow b_1^2 = c^2 a_1^2$. Согласно этому условию получим квадратное уравнение относительно $\operatorname{tg} \beta$ такого вида:

$$d_1 \operatorname{tg}^2 \beta + d_2 \operatorname{tg} \beta + d_3 = 0 \quad (12)$$

$$(d_1 = (b^2 c^2 - a^2) \operatorname{tg} \alpha; d_2 = (1 - c^2)(a^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - b^2); d_3 = (b^2 - a^2 c^2) \operatorname{tg} \alpha). \quad (13)$$

Решение квадратного уравнения имеет такой вид:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{-d_2 \pm \sqrt{d_2^2 - 4d_1 d_3}}{2d_1} \quad (14)$$

и оно существует, если

$$d_2^2 - 4d_1 d_3 \geq 0. \quad (15)$$

Подставим значения (13) в условие (15) и получим бигармоническое уравнение относительно $\operatorname{tg} \alpha$:

$$e_1 \operatorname{tg}^4 \alpha + e_2 \operatorname{tg}^2 \alpha + e_3 \geq 0, \quad (16)$$

промежуточное решение которого имеет вид

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{-e_2 \pm \sqrt{e_2^2 - 4e_1 e_3}}{2e_1} = \frac{-e_2 \pm \sqrt{e_4}}{2e_1}, \quad (15)$$

где $e_1 = a^4(1 - c^2) > 0$; $e_2 = 2a^2 b^2(1 - c^2) - 4(b^4 c^2 - a^2 b^2 - a^2 b^2 c^4 + c^2 a^4)$; $e_3 = b^4 > 0$;
 $e_4 = e_2^2 - 4e_1 e_3 \geq 0$.

Решение существует, если $e_4 \geq 0$, $-e_2 \pm \sqrt{e_4} \geq 0$. Поэтому при определении $\operatorname{tg} \beta$ существует ограничение на угол α , которое отвечает механическим свойствам и характеру явления раскола гранитов между осями ортотропии. Если $\alpha = 0$, то и $\beta = 0$, а при $\alpha = \beta$ малый эллипс 2 вырождается в прямые $x = \pm a_1$.

2. Числовые результаты и их анализ.

Для проведения конкретных исследований с целью определения реальных значения значений угла β в зависимости от угла α зададимся следующими данными: выберем гранит – Лабрадорит, свойства которого указаны в таблице: $[\sigma_p] = 20$ Мпа, $[\sigma_c] = 200$ Мпа, что определяет вид эллипса (1); характер действия НРС в шпуре с пластиной-вставкой описывается эллипсом, который соответствует условию прочности (2), соотношения осей которого для разных толщин h пластин-вставок определяется согласно графической зависимости, приведенной на рис. 2; толщина пластины-вставки h равняется: $5 \div 8$ мм; радиус шпура $R = 20$ мм.

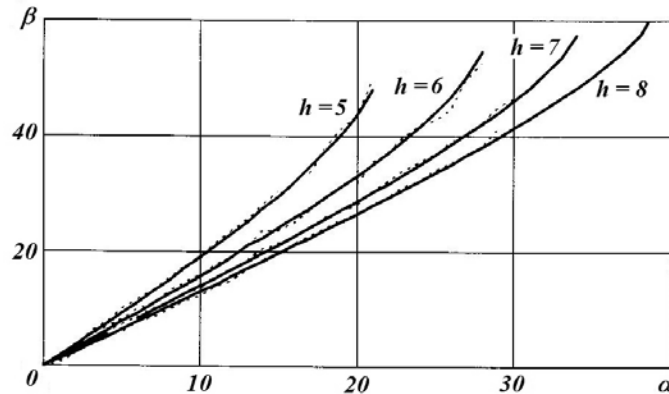


Рис. 6

На рис. 6 приведена графическая технологическая зависимость угла β , под которым следует установить пластину-вставку к оси X , чтобы получить трещину под углом α к оси X .

Из рис. 6 следует ограничение на угол $0 \leq \alpha \leq 38^\circ$ и угол $0 \leq \beta \leq 60^\circ$, которое соответствует механическим свойствам лабрадорита и явлению его раскола под углом $0 \leq \alpha \leq 38^\circ$ к направлению природных трещин.

В данном расчете раскола Лабрадорита под углом α к оси X в шпуре с пластиной-вставкой необходимо создать давление в шпуре от НРС больше на $10 \div 15\%$ от $[\sigma_p]$ породы.

На рис. 6 точками показаны результаты графических расчетов, выполненных с помощью программы «Компас» [14]. Удовлетворительное совпадение аналитических и графических результатов расчета зависимости угла β от угла α указывает на достоверность полученных данных.

Заключение.

Разработан метод управления направлением трещинообразования в секторе между осями ортотропии горных пород.

Аналитически показано, что при расколе породы под углом α к оси X в шпуре с пластиной-вставкой необходимо создать давление, которое превышает на $10 \div 15\%$ от $[\sigma_p]$ породы.

При определении угла β существует ограничение на угол α , которое соответствует механическим свойствам пород и характеру их раскола.

Получена технологическая зависимость угла β , под которым надо установить пластину-вставку к оси X , чтобы образовать трещину под углом α к оси X .

РЕЗЮМЕ. Докладно теоретично досліджені фізико-механічні процеси, які відбуваються при розколі гірської породи в потрібному напрямку з застосуванням пластин-вставок в шпурах з НРС. З використанням еліпса міцності гірської породи для плоского випадку і третьої умови міцності досліджено процес зародження тріщини в потрібному напрямку в шпурах з пластинами-вставками при дії НРС. Отримано графіки для визначення технологічних параметрів: кута β , під яким необхідно розташувати пластину-вставку, щоб одержати тріщину під кутом α до меншої осі еліпса міцності гірської породи; тиску, в залежності від потрібного напрямку тріщиноутворення. Це дозволило вдосконалити технологію видобутку кам'яних блоків і руйнування вугільних ціликів шпуровим методом з застосуванням пластин-вставок і НРС.

1. Авторское свидетельство Российской Федерации № 1798495. Сквжинная вставка для направленного разрушения монолитов расширяющимися веществами / В. И. Штеле. опуб. 25.11.1993. Бюл. № 8.
2. Авторское свидетельство СССР №1536906 Кл. Е 21 С 37/00. 1988.
- 3 Басов К.А. ANSIS. Справочник пользователя. –М.: ДМК Пресс, 2015. – 640 с.
4. Карасёв Ю.Г., Бакка Н.Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня. –СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т., 1997. – 428 с.
5. Кравець В.Г., Луговий П.З., Стовпник С.М., Ковтун А.І. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук: КДПУ, 2017. –Вип. 2/2017(20). – С.15 – 25.
6. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978, – 390 с.
7. Сахно І.Г., Касьян М.М. Патент на винахід №100062, МПК (2006.01) E21C 37/06. Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючими сумішами й патрон для його реалізації. – 2012. – бюл. 21.
8. Ткачук К.К., Стовпник, С.М. Гребенюк Т.В. Застосування концентраторів руйнування при виїманні вугільних ціликів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Вип. 20. – С. 94 – 99.
9. Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун А.І. Патент на корисну модель (Україна), НПК E21C 37/00, опубліковано 10.16.2014 бюл. 11.

10. *Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І.* Розробка та дослідження процесу керування напрямом розколу блочного каменю при використанні невибухових руйнуючих сумішей // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук: КДПУ, 2013. – Вип. 2 (12). – С. 50 – 57.
11. *Фоменко І.О., Ковтун А.І.* Дослідження технологічних параметрів процесу керування напрямом розколу блочного каменю під час використання невибухових руйнуючих сумішей // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – Вип. 26. – С. 63 – 69.
12. *Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І.* Керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії гранітів при використанні невибухових руйнуючих сумішей та агрегатів з пластинами-вставками // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук: КДПУ, 2016. – Вип. 2 (16). – С. 41 – 48.
13. *Chakrabarty L.* Theory of Plasticity, 3 rd. ed. – New York: Butterworth – Heinemann, 2006. – 896 p.
14. *Ing – grafika.ru /1/ program / Kompas – 3dv13. html.*
15. *Kaminsky A.A., Selivanov M.F.* Modeling Subcritical Crack Growth in a Viscoelastic Body under Concentrated Forces // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 5. – P. 538 – 544.
16. *Khoroshun L.P.* Discretization and Numerical Solution of a Plane Problem in the Mechanics of Interfacial Cracks // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 1. – P. 76 – 88.
17. *Pat. USA 4565579* МКІ С 04 В 2/0 НКІ 106/1182. Nonexplosive chemical composition for gently breaking rock or concrete nase / Fujiok Isani, Imada Kazutushi, Kishmura Motoyasu; Ishibashi Jaka-yuhli Cenral Glass Co., Ltd. – N US 06/545,695; 1986.
18. *Selivanov M.F.* Slow Growth of a Crack with Contacting Faces in a Viscoelastic Body // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 6. – P. 617 – 622.
19. *Selivanov M.F., Chernoiivan Yu.A.* Determining Displacements of Contacting Crack Faces in Orthotropic Plate // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 4. – P. 407 – 418.
20. *Timoshenko S.P., Goodier J.N.* Theory of Elasticity: 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1970. – 567 p.
21. *Zienkiewicz O.* The finite element method. Vol. 2: Solid Mechanics: 5th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – P. 221 – 239.

Поступила 15.11.2017

Утверждена в печать 22.05.2018