

УДК 539.378.6

С.А. Гончаров, Р.А. Гладаревский

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ
РЯДА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ПРИ ВЗРЫВНОЙ
ОТБОЙКЕ СЛОИСТЫХ МАССИВОВ ЖЕЛЕЗИСТЫХ
КВАРЦИТОВ**

Эффективность разупрочнения массива железистых кварцитов на микро- и макроуровнях существенно зависит от их строения: макротекстуры или ориентации слоистости кварцитов и микротекстуры или ориентации и формы составляющих их зерен. Экспериментальными исследованиями, проведенными в МГГУ, установлена анизотропия микротекстуры железистых кварцитов [1]. Размеры рудных зерен (агрегатов) вдоль слоистости находятся в пределах 13–110 мкм, перпендикулярно слоистости – в пределах 9–80 мкм. Коэффициент изометричности (отношение размеров зерен параллельно и перпендикулярно слоистости) колеблется в пределах 1,0–3,3 с достоверностью 90 %, а его среднее значение равно 1,54. Это определяет большую площадь поверхности зерен и соответственно значительную энергоемкость разрушения межзерновых связей вдоль слоистости по сравнению с таковыми поперек нее. В работе [2] показана возможность повышения показателей обогатительного передела на стадии взрывной отбойки без дополнительных расходов на увеличение удельного расхода ВВ. Предполагается применение оптимальных схем обурирования рабочих площадок и схем коммутации скважин, при которых на наиболее энергоемких (с позиции раскрытия зерен) направлениях слоистости обеспечиваются максимальные сдвиговые напряжения при взрывной отбойке железистых кварцитов

на карьерах. В силу того, что предел прочности на сдвиг в 3–4 раза меньше такового на сжатие, то на этих направлениях возможно обеспечить максимальное разупрочнение межзерновых связей. Известно, что при одноосном сжатии максимальные касательные напряжения реализуются на площадках, ориентированных под углом 45° к направлению действия сжимающих сил [3]. При взрывании ряда скважин на достаточном удалении от заряда (за пределами зоны дробления) распространяющаяся от данного ряда упругую волну в первом приближении можно считать плоской волной сжатия. Подбирая схему обурирования и коммутации скважин можно ориентировать плоскость взрывной волны сжатия под углом 45° к плоскости слоев железистых кварцитов. При этом на площадках, параллельных слоистости при взрывной отбойке железистых кварцитов от массива будет обеспечено максимальное разупрочнение межзерновых связей.

Рассмотрим плоскую вертикальную волну сжатия, распространяющуюся по направлению нормали n к ней. Плоскость Ω_1 волны ориентирована под углом β к линии простирания слоев и параллельна ряду взрывааемых скважин 1 (рис. 1 и рис. 2). Угол падения слоев Ω_2 железистых кварцитов равен α . Выберем на линии L_1 простирания некоторого слоя произвольную точку и поместим в нее начало координат (рис. 2). Плоскость $ХОУ$ со-

вместим с горизонтальной поверхностью Ω_3 блока, а ось OY – с линией простира-
ния L_1 . Для решения задачи предположим, что ось OZ находится в плоскости Ω_1
волны сжатия. Иначе говоря, угол β мож-
но интерпретировать как угол поворота
плоскости Ω_1 вокруг оси OZ против часо-
вой стрелки относительно линии простира-
ния L_1 .

Общие уравнения плоскостей Ω_1
и Ω_2 , проходящих через начало коор-
динат, соответственно имеют виды [4]:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 z = 0 \quad (1)$$

и

$$A_2 x + B_2 y + C_2 z = 0, \quad (2)$$

где $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ - некото-
рые числовые коэффициенты. Поскольку плос-
кость Ω_1 проходит через ось OZ ,
то $C_1 = 0$. Аналогично для плоскости Ω_2 ,
проходящей через ось OY нахо-
дим $B_2 = 0$. Тогда уравнения (1) и (2) пре-
образуются к виду

$$A_1 x + B_1 y = 0 \quad (1^*)$$

и

$$A_2 x + C_2 z = 0. \quad (2^*)$$

Для определения остальных коэффи-
циентов рассмотрим проекции плоскостей
 Ω_1 и Ω_2 соответственно на плоскости
 XOY и XOZ (рис. 3, а, б).

Данные проекции представляют собой
прямые, определяемые уравнениями

$$tg \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \cdot x - y = 0 \quad (3)$$

и

$$tg \alpha \cdot x + z = 0. \quad (4)$$

Сравнивая соответствующие коэффи-
циенты при неизвестных в уравнениях
(1*) и (3), а также (2*) и (4) получим

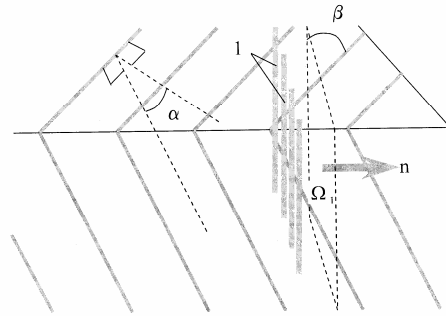


Рис. 1

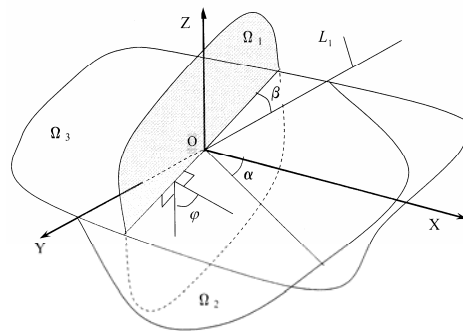


Рис. 2

$$A_1 = tg \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right), \quad A_2 = tg \alpha,$$

$$B_1 = -1, B_2 = 0, C_1 = 0, C_2 = 1.$$

Угол φ между плоскостями Ω_1 и
 Ω_2 определяется выражением [5]:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} = \\ &= \frac{tg \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \cdot tg(-\alpha)}{\sqrt{tg^2 \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + 1} \cdot \sqrt{tg^2 \alpha + 1}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как [5]

$$tg \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha},$$

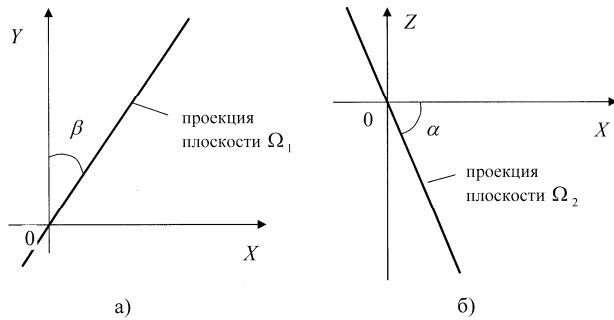


Рис. 3

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) &= \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}, \\ \sqrt{\operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)+1} &= \sqrt{\frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)+\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\cos^2\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right)}, \\ \sqrt{\operatorname{tg}^2(-\alpha)+1} &= \frac{1}{\cos\alpha}, \end{aligned}$$

то после несложных преобразований из (3) получим

$$\cos\varphi = \sin\left(\frac{\pi}{2}-\beta\right) \cdot \sin\alpha. \quad (6)$$

или

$$\cos\varphi = \cos\beta \cdot \sin\alpha. \quad (6^*)$$

Следовательно, угол между плоскостями вертикальной волны сжатия и слоев железистых кварцитов определяется формулой

$$\varphi = \arccos[\cos\beta \cdot \sin\alpha]. \quad (7)$$

Угол φ представляет собой согласно (7) функцию двух независимых переменных α и β , т.е. $\varphi = \varphi(\alpha, \beta)$, т.е. величина φ определяет

некоторую поверхность в трехмерном пространстве. Трехмерный график зависимости (7) дан на рис. 4. На данном графике по вертикальной оси откладывается угол φ . При заданных α и β угол представляет собой расстояние от точки $M(\alpha, \beta)$ на плоскости $\varphi = 0$ до поверхности $\varphi = \varphi(\alpha, \beta)$ (рис. 4).

Угол падения α слоев железистых кварцитов представляет собой характеристику массива горных пород, поэтому он задается для каждого блока и является постоянной величиной, а угол β между плоскостью Ω_1 волны сжатия и линией простирания слоев определяется схемами обуривания и коммутации скважин. Таким образом, при заданном угле падения α слоев угол β определяется только величиной $\varphi_{\text{опт}} = 45^\circ$, соответствующей оптимальной ориентации плоскости волны сжатия.

В графическом виде зависимость (7) при заданных углах α падения слоев железистых кварцитов представлена на рис.

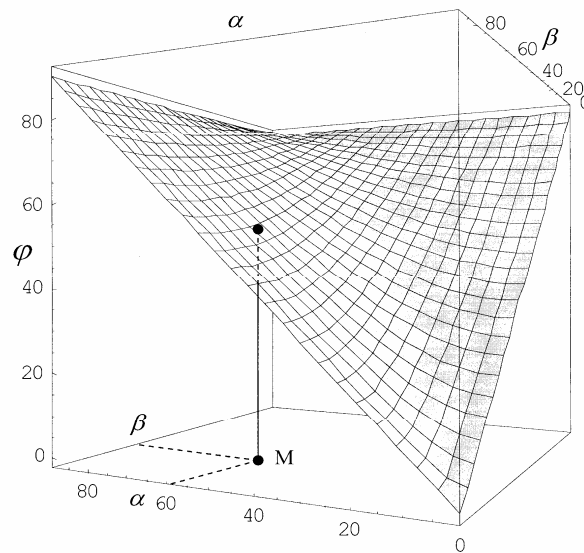


Рис. 4

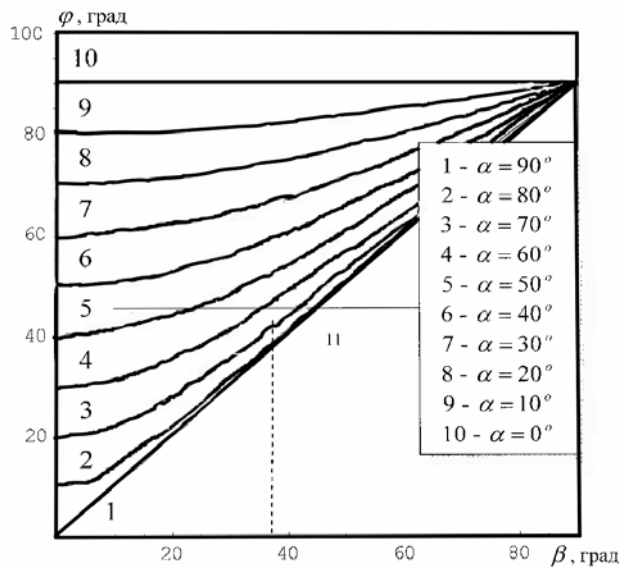


Рис. 5
 5. Кривые 1, 2, ..., 10 получены соответственно при углах падения слоев железистых кварцитов, равных $90^\circ, 80^\circ, \dots, 0^\circ$. На том же рисунке дана горизонтальная прямая 11, соответствующая $\varphi = 45^\circ$. Непосредственно из рис. 5 видно, что при углах падения слоев $\alpha < 45^\circ$ и любых β угол φ всегда больше 45° (кривые 6, 7, 8, 9, 10 не пересекаются с прямой 11). Причина этого заключается в следующем.

Из выражения (6) находим

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha}. \quad (8)$$

Поскольку синус любого угла меньше или равен единице, т.е.

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \leq 1,$$

то из (8) имеем

$$\frac{\cos \varphi}{\sin \alpha} \leq 1. \quad (9)$$

или

$$\cos \varphi \leq \sin \alpha.$$

При $\varphi = 45^\circ$ получим условие существования опти-

мального угла β_{opt} , при котором обеспечиваются максимальные касательные напряжения в плоскостях, параллельных слоям железистых кварцитов

$$\frac{\cos 45^\circ}{\sin \alpha} \leq 1. \quad (10)$$

Отсюда имеем

$$\sin \alpha \geq \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7071.$$

Следовательно, условие существования оптимального угла β_{opt} можно представить в виде

$$\alpha \geq \arcsin(0,7071) = 45^\circ. \quad (10^*)$$

Это наглядно видно из графика зависимости отношения $\cos 45^\circ / \sin \alpha$ от угла падения слоев α , приведенного на рис. 6. Из данного рисунка видно, что при углах $\alpha < 45^\circ$ величина отношения $\cos 45^\circ / \sin \alpha$ становится больше единицы и условие (10) не удовлетворяется ни при каких значениях β , т.е. при таких углах α угол β не существует.

Это свидетельствует о том, что **вертикальную** плоскую волну сжатия Ω_1 можно ориентировать под двугранным уг-

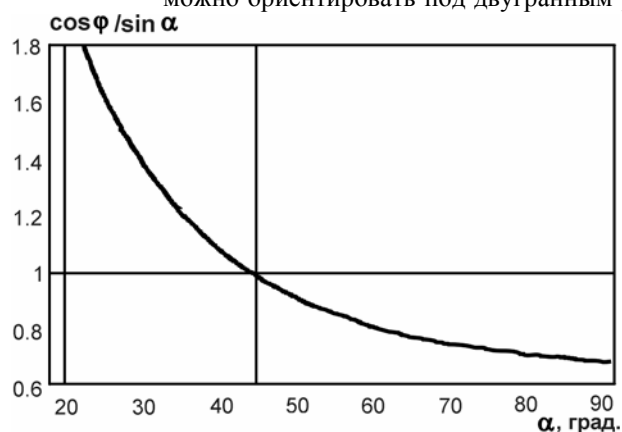


Рис. 6

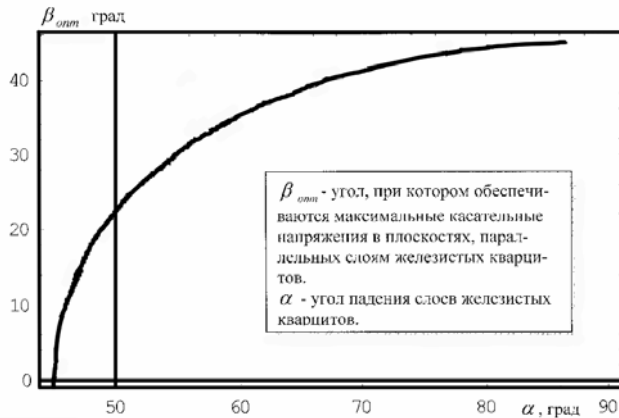


Рис. 7

лом 45° к плоскости слоистости железистых кварцитов Ω_2 **только в том случае**, если угол падения слоистости α будет **больше** 45° .

Отметим также, что при $\alpha = 0^\circ$ и любых β угол φ всегда равен 90° . Это естественно, поскольку при любой ориентации вертикальной плоскости она перпендикулярна горизонтальной. Таким образом, оптимальная ориентация плоской волны сжатия относительно слоев железистых кварцитов возможна при их крутом падении под углом $\alpha > 45^\circ$.

Из выражения (8) имеем

$$\beta = \pm \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{\cos \varphi}{\sin \alpha} \right) \right]. \quad (11)$$

Исходя из условия максимальной касательных напряжений, достигаемых при ориентации плоской волны сжатия относительно плоскости слоев железистых кварцитов под углом $\varphi = \pi/4$, из формулы (11) находим

$$\beta_{opt} = \pm \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{\sqrt{2} \sin \alpha} \right) \right] \quad (45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ). \quad (12)$$

Зависимость (12) в графическом виде представлена на рис. 7.

При углах падения слоев железистых кварцитов, меньших 45° , максимум сдвиговых (касательных) напряжений **не достигается** при **любой** ориентации вертикальной волны сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян И.Р. Разработка способа взрывного разупрочнения межзерновых связей при добыче железистых кварцитов на карьерах. Автореферат дисс. на соис. уч. степ. канд. техн. наук. М.: 1988.
2. Гончаров С.А. Оптимизация дробления руды в забое – резерв повышения эффективности обогатительного передела. Горный журнал, № 10, 1988. – С. 55–57.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. 560 с.
4. Александров П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. – М.: Наука, 1979.
5. Бронштейн И.Л., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1981. 720 с.

Коротко об авторах

Гончаров С.А. – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Гладаревский Р.А. – аспирант,
кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.