

УДК 622.023:622.233/235

Васильева Людмила Александровна
инженер,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: lavasileva@igduran.ru

Жариков Сергей Николаевич
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: 333vista@mail.ru

Кутуев Вячеслав Александрович
научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 9634447996@mail.ru

О ВЛИЯНИИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА КАЧЕСТВО ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И НА СОХРАННОСТЬ ЗАКОНТУРНОГО МАССИВА*

Аннотация:

Рассматриваются вопросы структурного строения массива горных пород, влияющего на заданное качество буровзрывной подготовки горной массы и выход негабарита. Наличие уточненных данных о трещиноватости массива позволяет реализовать ряд перспективных технических решений и обозначить некоторые перспективные научные направления поиска.

Разрушение горных пород взрывом пока не имеет строгого математического описания, и во многом это связано с непредсказуемой структурной массива. Поэтому изучение закономерностей распространения трещин для совершенствования двух процессов добычи является важной и перспективной задачей, имеющей высокую значимость.

Обзор научно-технической литературы показал, что вопрос обследования трещиноватости массива для целей буровзрывных работ (БВР) освещен недостаточно. В имеющихся публикациях нет строгой детальности, что затрудняет восприятие и оценку полученных результатов и выводов. С другой стороны, недостаток информации может указывать на актуальность и перспективность исследований в этом направлении, тем более если ясно понимать способы применения этой информации для проектирования технологических взрывов.

Ключевые слова: качество дробления горной породы, структурное строение массива горных пород, трещиноватость, буровзрывные работы, сохранность законтурного массива.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.066

Vasilyeva Lyudmila A.
Engineer,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: lavasileva@igduran.ru

Zharikov Sergey N.
Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher,
Head of laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 333vista@mail.ru

Kutuev Vyacheslav A.
Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 9634447996@mail.ru

ON THE EFFECT OF FRACTURING ON THE QUALITY OF ROCK CRUSHING AND ON THE SAFETY OF THE OUT-CONTOUR ROCK MASS

Abstract:

The article deals with the structural architecture of the rock mass, which affects the specified quality of drilling and blasting preparation of rock mass and the output of oversized material. The availability of updated data on the fracturing of an array allows us to implement a number of promising technical solutions and identify some promising scientific directions of research.

The destruction of rocks by explosion does not yet have a strict mathematical description and this is largely due to the unpredictable structure of the massif. Therefore, studying the patterns of crack propagation to improve the two mining processes is an important and promising task of high importance.

A review of the scientific and technical literature evidentiates that the issue of examining the fracturing of the massif for the purposes of drilling and blasting operations is not sufficiently covered. There is no strict detailing in the available publications, which makes it difficult to perceive and evaluate the results and conclusions obtained. On the other hand, the lack of information may indicate the relevance and prospects of research in this direction. Especially, if you clearly understand the ways of using this information for the design of technological explosions.

Key words: quality of rock crushing, structure of the rock mass, fracturing, drilling and blasting, out-contour rock mass.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1

Введение

Динамика развития горнотехнических систем связана со своевременным обеспечением информационной и ресурсной составляющей производственных процессов. Во многом она зависит от выстраивания системных связей между бурением – взрыванием – выемкой – транспортированием при обеспечении высокого уровня безопасности горных работ. Поэтому организация подготовительных работ строится на определенных показателях, позволяющих некоторым образом оценивать качество производственного процесса.

Одним из основных показателей, определяющих эффективность подготовительных работ, является качество дробления горной массы при производстве взрывных работ [1].

Достижение необходимого качества дробления обеспечивается разрешением определенного перечня проблем. Проблемами, связанными с технологическими требованиями обеспечения заданной степени дробления горных пород и максимальной сохранности законтурного массива, особенно вблизи конечных контуров карьеров, являются:

- повышенный выход негабаритных фракций во взорванной горной массе;
- неравномерность дробления взорванной горной массы;
- нарушение целостности законтурного массива [2 – 4];
- сейсмическое действие и разлет осколков (при взрывах вблизи охраняемых объектов).

Рассмотрение взрыва для решения этих проблем предполагает установление закономерностей деформирования массива горных пород в зависимости от интенсивности динамического воздействия [1 – 3, 5, 6].

Состояние вопроса

В направлении изучения трещиноватости массива горных пород публикаций в современной научно-технической литературе не так уж много, а в изучении трещиноватости для целей БВР еще меньше. Наиболее развито изучение трещиноватости для определения направлений и углов падений основных систем трещин и составления соответствующих карт при проведении обследований обнажений откосов [7]. В [1, 2] отмечены некоторые закономерности, установленные при изучении связи трещиноватости и дробления вязких трудновзрываемых пород. Предложены некоторые решения, позволяющие использовать дополнительную информацию о трещиноватости массива для рациональных приемов при ведении взрывных работ. В [8] отмечена важность использования данных трещиноватости для формирования зарядов и выбора схем инициирования в массиве горных пород с переменной слоистостью.

В целом основными структурными особенностями породного массива, определяющими его механические свойства, являются трещиноватость, блочность, слоистость в пределах исследуемого массива горных пород [9].

Трещиноватость является определяющей структурно-механической особенностью породного массива [9 – 12]. Согласно [1], при взрыве на 65 – 70 % массив разрушается по имеющимся трещинам и только на 25 – 30 % – по вновь образованным трещинам.

Помимо интенсивности растрескивания массива на качество взорванной горной массы существенное влияние оказывает направление системы трещин [2], что предварительно подтверждают результаты проведенных экспериментальных взрывов на моделях из оргстекла, представленные в [2]. Однако при этом следует учитывать, что плотность оргстекла ($1,18 \text{ т/м}^3$) более чем в два раза меньше плотности трудновзрываемого крупноблочного массива и разрушение массива может пойти по-другому. К сожа-

лению, дальнейших публикаций, развивающих это направление, пока не выявлено. Тем не менее следует рассмотреть подробнее публикации [1, 2, 13, 14].

Согласно [1, 13, 14], для изучения структурного строения массивов горных пород проводятся инструментальные замеры параметров залегания трещин и систем трещин, а также укрупненное визуальное обследование обнажений массива на различных участках карьера.

По результатам анализа полученной инженерно-геологической информации в рабочем пространстве выделяется несколько блоков с относительно однородным структурно-тектоническим строением и сходными параметрами залегания основных трещин. Устанавливаются азимут и угол падения основных систем трещин в блоках. С учетом данных блочной модели карьера детализируется структурное строение массива по участкам, отличающимся наибольшим выходом негабаритных фракций во взорванной горной массе.

Следующим этапом является исследование влияния трещиноватости на качество дробления горных пород. Согласно [15] размер отдельности в массиве во многом определяет удельный расход ВВ. Поэтому сведения о трещиноватости массива являются важной информацией для определения рациональных параметров БВР.

Обсуждение

В работах [1, 2] для снижения выхода негабарита предложены следующие пути повышения степени дробления взорванной горной массы в зависимости от структурного строения массива и направления простирания основных систем трещин в массиве, которые, по мнению авторов, не приведут к увеличению затрат либо последние будут незначительными:

- оптимизация интервалов времени замедления и порядка взрывания скважинных зарядов во взрывном блоке;
- оптимизация сетки скважин;
- уменьшение длины взрывного блока;
- обеспечение такого направления фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают отраженную волну напряжений.

Также в [1] предложены пути, которые требуют увеличения затрат на БВР:

- повышение удельного расхода ВВ за счет сгущения сетки скважин;
- уменьшение диаметра взрывных скважин;
- оконтуривание взрывного блока рядом скважин малого диаметра.

Все указанные пути решения проблемы могут иметь место при определенных условиях и ограничениях. Оптимизация интервалов замедления может быть достаточно эффективной при использовании НСИ и электронных детонаторов. При использовании детонирующего шнура даже с пиротехническими реле в роли замедлителей оптимизация интервалов замедления и порядка инициирования зарядов в большинстве вариантов неприемлема, т.к. детонирующий шнур может себя подбить в момент взрыва, что приведет к отказам.

Изменение параметров сетки скважин (подразумевается не только сужение – расширение квадратной сетки, а шахматная, прямоугольная и т.д.) связано с направлениями инициирования зарядов и зависит от имеющихся в наличии средств инициирования (СИ).

Уменьшение параметров выемочного блока ведет к повышению точности срабатывания сети инициирования зарядов, что предупреждает случайное срабатывание большей массы в ступени замедления в виду погрешностей срабатывания замедлителей в скважинах и на поверхности.

Обеспечение направления фронта отбойки для создания отраженной волны напряжений, пожалуй, наиболее простой и эффективный способ улучшения качества дробления. Сдавливание массива для сужения трещины ведет к подсеканию последней

в крест и уменьшению диссипации энергии взрыва в породных нарушениях. Следовательно, повышается дробящее воздействие. Подробно это рассмотрено в [16].

Сгущение сетки скважин ведет к увеличению объемов работ по бурению и увеличению затрат на взрывчатые материалы. Не всегда такой путь является целесообразным. В этом случае сравниваются затраты между вариантами и выбирается, как правило, менее затратный. Для того чтобы это было реализовано, затраты на разделку негабарита должны превышать указанные издержки. Следует также отметить, что такой подход может иметь место лишь в крупноблочном малотрещиноватом массиве, а в сильнотрещиноватом представляется неэффективным, потому что от большего количества ВВ будет лишь повышенная диссипация энергии по трещинам.

Уменьшение диаметра скважин в некоторых случаях может быть достаточно эффективным. Обратить внимание следует на свойства применяемых взрывчатых веществ. Диаметр влияет на протекание детонации, соответственно, на давление, возникающее при взрыве. Представляется целесообразным рассматривать этот вопрос вместе с вопросом подбора рационального боевика для того или иного применяемого ВВ с целью получения оптимального инициирующего импульса.

Оконтуривание взрывного блока может иметь положительный эффект, потому что, согласно [17], наличие поверхности отражения волн напряжений дает прирост энергии на дробление. В этом случае важным вопросом будет то, насколько взрыв оконтуривающей ленты должен опережать взрыв основного блока. Также встанет вопрос о возможности либо невозможности применения вариантов из-за наличия тех или иных СИ.

Выводы

Структурное строение массива горных пород определяет подходы к его разрушению буровзрывным способом. Наличие уточненных данных о трещиноватости массива позволяет реализовать ряд перспективных технических решений и обозначить некоторые перспективные научные направления поиска.

Разрушение горных пород взрывом пока не имеет строгого математического описания, и во многом это связано с непредсказуемой структурой массива. Поэтому изучение закономерностей распространения трещин для совершенствования двух процессов добычи является важной и перспективной задачей, имеющей высокую значимость.

Обзор научно-технической литературы показал, что вопрос обследования трещиноватости массива для целей БВР освещен недостаточно. В имеющихся публикациях нет строгой детальности, что затрудняет восприятие и оценку полученных результатов и выводов. С другой стороны, недостаток информации может указывать на актуальность и перспективность исследований в этом направлении, тем более если ясно понимать способы применения этой информации для проектирования технологических взрывов.

Список литературы

1. Яковлев А.В., Шимкив Е.С., 2015. Исследование влияния основных систем трещин в массиве Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на качество дробления взорванной горной массы. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 15 - 19. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>
2. Яковлев А.В., Шимкив Е.С., Переход Т.М., 2019. Основные направления и результаты исследований дробления трудновзрывааемых пород. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 137 - 144. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.137>
3. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems*.

Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer, Cham, pp. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46

4. Зотеев В.Г., Макаров А.Б., Эпштейн И.В., 2018. Оценка возможности использования "Руководства по проектированию бортов карьеров" при проектировании открытой разработки рудных месторождений в условиях современной России. *Золото и технологии*, № 1(39), С. 52 - 57.

5. Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2021. Building a Nomogram to Determine Drilling @ Blasting Parameters in the Marginal Quarry Zone. *IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1079, № 062081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062081>

6. Адушкин В.В., Спивак А.А., 1990. Особенности деформирования блочной среды при взрыве. *ФТПРПИ*, № 2, С. 46 - 52.

7. Жариков С.Н., Зотеев О.В., Кутуев В.А. и др., 2018. Оценка влияния сейсмических колебаний на горный массив верхнего и нижнего участков склона 1751 км перегона Биянка-Симская. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 57 - 65. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.057>

8. Реготунов А.С., Жариков С.Н., Сухов Р.И., Кутуев В.А., 2021. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 52 - 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>

9. Мамбетов Ш.А., 2013. *Геомеханика: учебник: в 2-х т. Т. 1. Основы геомеханики*. Бишкек: Изд-во КРСУ, 138 с.

10. Барон Л.И., Личели Г.П., 1966. *Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке*. Москва: Недра, 136 с.

11. Liu F., 2022. Modeling fracture propagation in a rock-water-air system with the assumed enhanced strain method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 123, No. 11, pp. 2429 - 2466. <https://doi.org/10.1002/nme.6945>

12. Qi C., Zhao F., Dyskin A.V., Xia C., Pasternak E., 2022. Crack interaction and fracturing of geomaterials with multiscale cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 153, No. 105084. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105084>

13. Яковлев А.В., Панжин А.А., Рождественский В.Н., Пьянзин С.Р., Кочнев К.А., 2012. Оценка степени трещиноватости локальных скальных массивов, подлежащих взрывной отбойке. *Маркшейдерия и недропользование*, № 5, С. 22 - 29.

14. Рождественский В.Н., Панжин А.А., Пьянзин С.Р., Кочнев К.А., 2014. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 5, С. 75 - 79.

15. Корнилков С.В., Стенин Ю.В., Стариков А.Д., 1997. *Расчет параметров буровзрывных работ при скважинной отбойке на карьерах: учебное пособие*. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 112 с.

16. Бондаренко И.Ф., Жариков С.Н., Зырянов И.В., Шеменев В.Г., 2017. *Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 172 с.

17. Адушкин В.В., Спивак А.А., 1993. *Геомеханика крупномасштабных взрывов*. Москва: Недра, 319 с.

References

1. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., 2015. Issledovanie vliyaniya osnovnykh sistem treshchin v massive Severnogo kar'era OAO "EVRAZ KGOK" na kachestvo drobleniya vzorvannoi gornoi massy [Study of the influence of the main crack systems in the massif of the Northern quarry of OAO EVRAZ KGOK on the quality of crushing of the exploded rock mass]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3, P. 15 - 19. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>

2. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., Perekhod T.M., 2019. Osnovnye napravleniya i rezul'taty issledovaniy drobleniya trudnovzryvaemykh porod [Main directions and results of research on the crushing of hard-to-explode rocks]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3, P. 137 - 144. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.137>
3. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, Cham, pp. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46
4. Zoteev V.G., Makarov A.B., Epshtein I.V., 2018. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya "Rukovodstva po proektirovaniyu bortov kar'erov" pri proektirovanii otkrytoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii v usloviyakh sovremennoi Rossii . [Assessment of the possibility of using the "Guidelines for the Design of Quarry Sides" in the design of open-pit mining of ore deposits in the current conditions of modern Russia]. *Zoloto i tekhnologii*, № 1(39), P. 52 - 57.
5. Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2021. Building a Nomogram to Determine Drilling @ Blasting Parameters in the Marginal Quarry Zone. *IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1079, № 062081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/6/062081>
6. Adushkin V.V., Spivak A.A., 1990. Osobennosti deformirovaniya blochnoi sredy pri vzryve [Features of deformation of the block environment during explosion]. *FTPRPI*, № 2, P. 46 - 52.
7. Zharikov S.N., Zoteev O.V., Kutuev V.A. i dr., 2018. Otsenka vliyaniya seismicheskikh kolebaniy na gornyi massiv verkhnego i nizhnego uchastkov sklona 1751 km pereгона Biyanka-Simskaya [Assessment of the influence of seismic vibrations on the mountain massif of the upper and lower sections of the slope at the 1751 km of the Biyanka-Simskaya-leg]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 57 - 65. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.02.057>
8. Regotunov A.S., Zharikov S.N., Sukhov R.I., Kutuev V.A., 2021. Otsenka sovremennogo sostoyaniya burovzryvnykh rabot i neobkhodimost' osushchestvleniya perekhodnykh protsessov na nekotorykh krupnykh gornykh predpriyatiyakh Urala i Sibiri [Assessment of the current state of drilling and blasting operations and need for transition processes at some large mining enterprises in the Urals and Siberia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 52 - 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
9. Mambetov Sh.A., 2013. Geomekhanika: uchebnik: v 2-kh t. V. 1 . Osnovy geomekhaniki [Geomechanics: Textbook: in two volumes. V. 1. Fundamentals of Geomechanics]. Bishkek: Izd-vo KRSU, 138 s.
10. Baron J.I., Licheli G.P., 1966. Treshchinovatost' gornykh porod pri vzryvnoi otboike [Fracturing of rocks during blasting]. Moscow: Nedra, 136 p.
11. . Liu F., 2022. Modeling fracture propagation in a rock-water-air system with the assumed enhanced strain method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 123, No. 11, pp. 2429 - 2466. <https://doi.org/10.1002/nme.6945>
12. Qi C., Zhao F., Dyskin A.V., Xia C., Pasternak E., 2022. Crack interaction and fracturing of geomaterials with multiscale cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 153, No. 105084. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105084>
13. Yakovlev A.V., Panzhin A.A., Rozhdestvenskii V.N., P'yanzin S.R., Kochnev K.A., 2012. Otsenka stepeni treshchinovatosti lokal'nykh skal'nykh massivov, podlezhashchikh vzryvnoi otboike [Assessment of fracturing rate of local rock massifs that are to be subject of explosive breakage]. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*, № 5, P. 22 - 29.
14. Rozhdestvenskii V.N., Panzhin A.A., P'yanzin S.R., Kochnev K.A., 2014. Issledovanie treshchinovatosti lokal'nykh massivov s pomoshch'yu sredstv nazemnogo lazer-nogo skanirovaniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii [Study of fracturing of local arrays by means of ground-based laser scanning]. *Gornyi zhurnal*, № 5, P. 75 - 79.

15. Kornil'kov S.V., Stenin Yu.V., Starikov A.D., 1997. Raschet parametrov burovzryvnykh rabot pri skvazhinnoi otboike na kar'erakh: uchebnoe posobie [Calculation of parameters of drilling and blasting operations during borehole drilling at quarries: textbook]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGGA, 112 p.

16. Bondarenko I.F., Zharikov S.N., Zyryanov I.V., Shemenev V.G., 2017. Burovzryvnye raboty na kimberlitovykh kar'erakh Yakutii [Drilling and blasting operations at the kimberlite quarries of Yakutia]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 172 p.

17. Adushkin V.V., Spivak A.A., 1993. Geomekhanika krupnomasshtabnykh vzryvov [Geomechanics of large-scale explosions]. Moscow: Nedra, 319 p.