

ВЗРЫВНОЕ РЫХЛЕНИЕ ПОРОД НА КАРЬЕРАХ С БОЛЬШИМИ ЗАМЕДЛЕНИЯМИ

Е.Б. Шевкун¹, А.В. Лещинский¹, Ю.А. Лысак², А.Ю. Плотников²

¹ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия, e-mail: 000399@pnu.edu.ru

² ООО «АВТ-Амур», Благовещенск, Россия

Аннотация: Рассмотрены вопросы повышения качества взрывного рыхления скальных пород взрывом путем увеличения интервалов замедления между взрывами скважинных зарядов. В последние десятилетия ученые и специалисты в области взрывного дела пришли к согласию о необходимости рассматривать двухстадийный механизм разрушения пород под действием взрывных нагрузок. На первой стадии при объемном предразрушении волны напряжений от взрыва воздействуют на породу сжимающими и растягивающими нагрузками, в ней протекают процессы генерации и накопления микро- и макротрещин и других дефектов до определенной концентрации. На второй стадии, доразрушения, идут процессы слияния трещин в более крупные и доминирующий катастрофический, локальный рост некоторых из них с образованием отдельностей. Поэтому механическое действие взрыва проявляется не только в дроблении горных пород, но и в разупрочнении на удаленных расстояниях от заряда. В этой области массив горных пород меняет свои прочностные и деформационные свойства, переходит в новое состояние, называемое предразрушенным. Установлено, что приращение длины трещины за один цикл «сжатия-растяжения» составляет 10 мм, что феноменологически трактуется как предразрушение породы. Увеличение времени замедления между взрывами отдельных скважинных зарядов способствует многократному воздействию таких циклов с накопительным эффектом, что способствует слиянию трещин и последовательному уменьшению размера кусков.

Ключевые слова: дробление пород взрывом, интервал замедления, предварительное разрушение горных пород, ослабление горных пород.

Для цитирования: Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю. Взрывное рыхление пород на карьерах с большими замедлениями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 29–41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41.

Long-period delay loosening blasting in open pit mines

E.B. Shevkun¹, A.V. Leshchinskiy¹, Yu.A. Lysak², A.Yu. Plotnikov²

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 000399@pnu.edu.ru

² AVT-Amur LLC, Blagoveshchensk, Russia

Abstract: The article discusses enhancement of loosening blasting with longer periods of delay between blasts in hard rocks. In recent decades scientists and practitioners in blasting have agreed on two-stage mechanism of rock fracture under blast load. At the first stage of volumetric pre-fracture, stress waves from blasts subject rocks to compression and tension, and micro- and macro-cracks and other defects appear, accumulate and concentrate in rocks. At the second

stage of post-fracture, cracks coalesce into larger fractures of dominant destructive nature, the local growth of some cracks results in jointing. The mechanical action of blasting consists both in near-field shattering and in far-field weakening of rocks. Rocks in the far field alter their strength and fracture characteristics and drop into a new pre-fractured state. It is found that cracks grow in length by 10 mm in one compression-tension cycle, which is phenomenologically interpreted as pre-fracture of rocks. Longer periods of delay between blasts enable more frequent effect of the compression-tension cycles, with accumulation of cracks, which is favorable for coalescence of cracks and gradually reduces the size of blocks.

Key words: blasting fragmentation, delay period, pre-fracture of rocks, weakening of rocks.

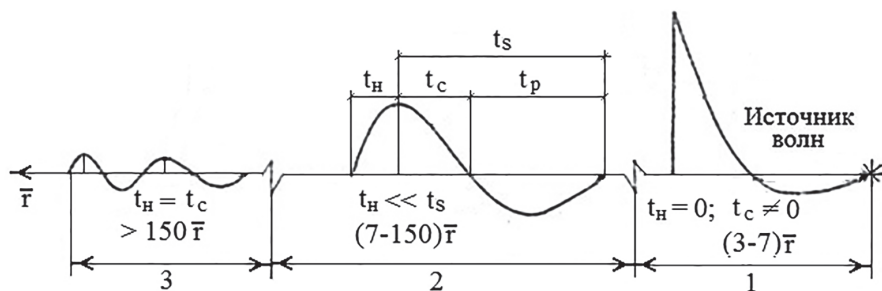
For citation: Shevkun E. B., Leshchinskiy A. V., Lysak Yu. A., Plotnikov A. Yu. Long-period delay loosening blasting in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):29-41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-29-41.

Введение

Известно, что процесс дробящего действия взрыва в среде — это активная составляющая часть общего разрушения горных пород с нарушением сплошности или разделением (диспергированием) пород в результате действия на них различных физических факторов взрыва. Этот процесс подробно рассмотрен в работе [1, с. 216]. Ударная волна от взрыва заряда ВВ (1 на рис. 1) переходит в волну сжатия (напряжения) в виде неупругого возмущения среды с достаточно плавным изменением пара-

метров и скоростью распространения, равной скорости звука в данной среде, а время выведения вещества из состояния покоя всегда меньше времени возвращения его к этому состоянию (2 на рис. 1).

В области распространения волн сжатия, охватывающей объем 120–150 радиусов заряда ($R_{\text{зар}}$), среда ведет себя неупруго, в ней возникают остаточные деформации, ведущие к нарушению сплошности строения среды. Таким образом, процесс разрушения массива горных пород, ограниченного



- t_n - время нарастания напряжений от 0 до max
- t_c - время спада напряжений от max до 0
- t_p - время действия волны растяжений
- t_s - суммарное время возвращения к состоянию покоя
- $\bar{r} = r/R_{\text{зар}}$ - относительный радиус заряда

Рис. 1. Зоны распространения волн взрыва: ударных (1), сжатия (2) и сейсмических (3)

Fig. 1. Zones of blast waves: shock wave (1), compression wave (2), seismic wave (3)

открытой поверхностью, протекает не мгновенно, а в течение определенного времени, когда система сил и напряжений, участвующих в разрушении, значительно изменяется в пространстве. Процесс хрупкого разрушения горных пород взрывом с физической точки зрения характеризуется одним видом разрушения — отрывом под влиянием растягивающих напряжений от действия волны сжатия в фазе разрежения [1, с. 219]. Это и приводит к образованию систем трещин, разделяющих массив горных пород на отдельные.

Наличие в среде естественных трещин ведет к резкому перераспределению возникающих в ней напряжений и вызываемых ими деформаций. На границах поверхностей трещин волны сжатия отражаются, определяя в дальнейшем разрушение отрывного характера на поверхности данной трещины. На кинетику разрушения неоднородных трещиноватых горных пород (а все массивы горных пород именно такими породами и представлены) существенно влияют скорость и глубина прорастания трещин, связанная с механизмом развития естественных трещин и их зародышей, существующих в среде, и условиями перехода энергии взрыва в энергию образования новых поверхностей. Под действием циклической знакопеременной нагрузки возникает поток энергии в вершину трещины. При этом одинаковые по абсолютной величине растягивающие и сжимающие напряжения создают равные потоки энергии, однако их влияние на рост трещины прямо противоположно: энергия сжимающих напряжений оказывает упрочняющее действие, а растягивающих — направлена на разрыв связей в вершине трещины [2, с. 258]. Рост трещины не может происходить на стадии действия сжимающей нагрузки, несмотря на приток энергии в вершину трещины. Эта

особенность соответствует физической природе механизма разрыва связей только под действием растягивающих напряжений или касательных, причем не вся энергия растягивающих напряжений расходуется на рост трещины, а только ее превышение над энергией деформаций среды. После достижения трещиной максимального приращения, что происходит на стадии действия растягивающей нагрузки, в течение последующего времени длина трещины остается постоянной (не залечивается) [2, с. 262].

Многорядное короткозамедленное взрывание (МКЗВ) — один из способов регулирования качества дробления горных пород на карьерах, эффективность которого подтверждена более чем полувековым использованием в горнодобывающей промышленности. По большинству положительных эффектов от применения МКЗВ при взрывных работах сформировались достаточно четкие общепринятые представления. Вместе с тем, по одному вопросу — о влиянии величины замедления на процесс разрушения горных пород при последовательном взрывании комплектов зарядов — высказываются самые разнообразные мнения, порой прямо противоположные [3, с. 4]. Наметились два взаимоисключающих направления: первое — на уменьшение замедления до величины, меньшей начала движения пород, второе — на увеличение замедления до величины, обеспечивающей формирование дополнительных обнаженных поверхностей. Так, в работе [4, с. 201] интервал замедления при МКЗВ рекомендовалось выбирать, исходя из условия: взрыв первой серии зарядов должен обеспечить разрушение воронки взрыва, а взрыв второй серии должен произойти до отделения призмы выброса от массива, иначе поле напряжений от второго заряда не проникнет

в призму выброса. В то же самое время взрыв зарядов второй очереди должен производиться в момент, когда призмы выброса против зарядов первой очереди, оконтуренные радиальными трещинами, сдвинутся настолько, что в массиве образуются трещины такой ширины, когда их можно рассматривать как новые поверхности обнажения. Такое состояние в массиве наступает после того, как призма выброса вспучивается примерно на 0,1 м, при этом отмечается, что нельзя принимать завышенных значений, поскольку все трещины, проникшие в область зарядов второй очереди, успеют раскрыться, что отрицательно скажется на качестве дробления [4, с. 203]. Последнее утверждение никак не обосновано ни теоретически, ни практическими наблюдениями. Время образования призмы выброса в массиве принималось равным 14–17 мс, ее вспучивание — 10 мс, поэтому, учитывая величину диаметра заряда, линии наименьшего сопротивления и свойства пород, выраженных через скорость разрушения среды, время замедления между взрывами групп зарядов рекомендовалось от 10 до 50 мс [4, с. 209]. Еще один постулат — к моменту взрыва зарядов второй очереди весь массив должен еще находиться в напряженном состоянии, вызванном взрывом зарядов первой очереди, также не раскрыт. За счет чего массив горных пород находится в напряженном состоянии? Ведь волна напряжений смещается по массиву со скоростью звука в нем (3–4 км/с), следовательно, ее влияние ограничивается первыми миллисекундами.

Улучшение качественных показателей взрывов с применением неэлектрических систем инициирования типа ИСКРА характеризуется компактной формой развала взорванной горной массы, что способствует снижению потерь и разубоживания; уменьшению выхода

крупнокусовых фракций горной массы; улучшению качества проработки подошвы уступа и снижению сейсмического эффекта. Это объясняют многократным взрывным нагружением массива горных пород при реализации принципа «одно замедление — одна скважина», что способствует образованию дополнительных поверхностей обнажения, поэтому в работе [5] удельное замедление между скважинами в ряду принимают от 29 мс/м, а между рядами скважин — от 33 мс/м. Именно сочетание принципа «одно замедление — одна скважина» и увеличенных интервалов замедления позволяет радикально повысить качество дробления горной массы.

Материалы и методы

Многолетняя практика ведения взрывных работ на карьерах показывает, что управление взрывом для достижения заданных показателей возможно лишь при правильно выбранной последовательности взрывания скважинных зарядов. При прочих равных условиях интенсивность разрушения горных пород при взрыве предопределяется характером взаимодействия зарядов — длительностью и кратностью приложения взрывных нагрузок, создаваемых каждым зарядом. Установлено [6, с. 15], что основными параметрами, существенно влияющими на эффективность отбойки горных пород при МКЗВ, являются время замедления между взрывами смежных зарядов в ряду и между рядами и схемы их взрывания. Наилучшее качество дробления достигается при полном развитии независимых максимальных зон дробления от взрыва каждого из зарядов с образованием наибольшего числа обнаженных поверхностей около взрывааемых зарядов.

Под действием взрыва удлиненного заряда в породе за зоной регулируемого дробления r образуется зона предразру-

шения за счет формирования в породе микро- и макротрещин. Специальными экспериментальными исследованиями [3, с. 6], установлено, что снижение прочности пород на одноосное растяжение не менее чем на 15% имеет место до $1,35r$. Если инициирование зарядов осуществляется с замедлением, то заряд, инициируемый первым, разрушает породу между ними, как при взрыве одиночного заряда. Второй же заряд, инициируемый с замедлением τ_1 относительно первого, осуществляет разрушение породы между ними более интенсивно, чем при одиночном взрыве и значительно интенсивнее, чем при одновременном взрыве обоих зарядов. И обусловлено это тем, что часть породы, не разрушенная взрывом первого заряда, тем не менее, будет ослаблена его действием. При этом наибольшее разрушение породы будет всегда осуществляться зарядом, инициируемым последним в этом комплекте [3, с. 13].

В последние годы в результате ряда теоретических и экспериментальных работ было установлено, что механическое действие взрыва проявляется не только в дроблении и разрушении горных пород, но и в разупрочнении на удаленных расстояниях от заряда [7, с. 226]. В этой области проходящие от взрыва волны напряжений приводят к развитию и повышению концентрации существующих микродефектов, макротрещин, ослаблению межзерновых и межкристалльных связей. Массив горных пород меняет свои прочностные и деформационные свойства, переходит в новое состояние, называемое предразрушенным. Для горных пород типичны микронарушения, при которых в среде возникают макротрещины, меняется ее микроструктура, что не приводит к нарушению сплошности (дроблению), но меняет эффективные параметры среды. Зона предразрушающего действия

взрыва характеризуется сравнительно небольшим диапазоном изменения скоростей, но значительным — в среднем в 1,5–2 раза — снижением прочности на больших расстояниях от заряда — вплоть до $200R_{зар}$ [7, с. 229].

Такая трактовка вполне укладывается в новую концепцию разрушения горных пород [8, с. 60] о двухстадийном механизме разрушения горных пород, исследованном учеными из ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Суть стадийного характера разрушения горных пород состоит в следующем. При любом механическом и ином способе воздействия на породу, независимо от характера этого воздействия (поверхностное или локальное), процесс разрушения протекает в две стадии. На первой стадии в объеме породы протекают процессы генерации и накопления микро- и макротрещин и других дефектов до определенной концентрации. Эта стадия подготовительная, представляющая собой объемное предразрушение. На второй стадии идут процессы слияния трещин в более крупные и доминирующий катастрофический, локальный рост некоторых из них с образованием отдельностей. Это — стадия доразрушения.

На рубеже XX и XXI вв. произошло важное для естествоиспытателей событие — возникло понимание того, что в основе развития нелинейных геомеханических и геодинамических процессов лежит блочно-иерархическое строение массивов горных пород в очень широком диапазоне линейных размеров — от атомарных и до космических масштабных уровней [9, с. 4].

Установлено неизвестное ранее явление знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия [10, 11]. Существование данного явления заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород посредством мощных взрывов, в их

окрестностях происходят смещения разных знаков между геоблоками с колебательным движением друг относительно друга, обусловленные стесненным поворотом и трансляционным движением породных блоков разного иерархического уровня, зависящего от размеров образующихся полостей, горного давления и энергии взрывов.

Существенной особенностью знакопеременной реакции горных пород на мощные взрывные воздействия в геосредах явилось их «дальнодействие» [12, с. 115]: локальные механические проявления необратимого характера происходят до расстояний $(8 - 10) \cdot r$. Обнаружение знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия стало экспериментальным доказательством того, что большая доля энергии взрывов расходуется не только на дробление породного массива в очаговой зоне и ее непосредственной окрестности, но и передается в виде кинетической энергии структурным элементам напряженной геосреды.

На руднике «Октябрьский» Талнахско-Октябрьского месторождения осуществлен цикл электрометрических исследований по изучению реакции сплошных халькопирит-пирротиновых руд впереди очистного забоя при сплошной камерной системе отработки вертикальными прирезками [9, с. 8].

Корреляционный анализ кривых, полученных по электрометрическим исследованиям методом естественного потенциала (ЕП), свидетельствует о последовательном во времени переходе локальных максимумов (минимумов) кривых ЕП в локальные минимумы (максимумы): после отбойки блока 1 камеры кривой ЕП соответствует локальный максимум; блока 2 — локальный минимум; блока 3 — локальный максимум, после отбойки блока 4 — локальный минимум. Т.е. если предыдущее взрыв-

ное воздействие приводит к относительному уплотнению какого-либо участка массива руд, то последующее — к его относительному разуплотнению и т.д. Иными словами, если при k -й серии взрывов произошло относительное уплотнение массива по определенным участкам за счет смыкания трещин, то $k+1$ серия взрывов приводит к относительному разуплотнению этих участков массива за счет раскрытия трещин, и наоборот. Спектральный состав кривых свидетельствует, что с приближением очистного забоя происходит прогрессирующее дробление естественных блоков на более мелкие. Для этой системы разработки область влияния взрывов от камеры распространяется на расстояние не менее 50 м, причем область интенсивного разуплотнения окружающего массива простирается на расстояние порядка 20 м.

Примечательной особенностью анализируемых технологических взрывов, как это следует из [13], является их «дальнодействие»: отмеченные деформации массивов распространяются вокруг образующихся полостей значительно дальше, чем это можно ожидать из классических представлений о зоне взрывного разрушения сплошной среды [14, 15], примерно на порядок.

Результаты

При просмотре развития взрыва, снятого видеокамерой с частотой съемки 300 кадр./с [18], визуально наблюдается прохождение 7 волн напряжений по средней части блока и 12 волн напряжений по концевой его части. Эти волны эпизодически возникают при одновременном взрыве нескольких скважин из-за разброса времени срабатывания замедлителей: завод-изготовитель допускает срабатывание поверхностного замедлителя в 200 мс через 190—210 мс, а скважинного замедлителя в 1000 мс —

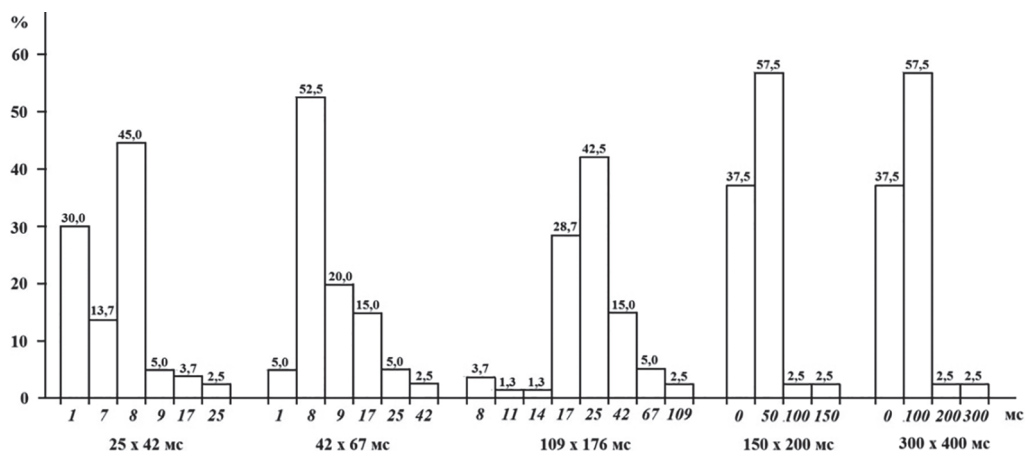


Рис. 2. Количественная характеристика интервалов замедления между соседними взорванными скважинами при различных схемах взрывания

Fig. 2. Quantitative characteristics of delay periods between neighbor blastholes in different blasting patterns

через 960–1020 мс. Многократное повторение чередующихся сжимающих и растягивающих напряжений и длительное распирающее воздействие продуктов детонации в трещинах предыдущих взрывов удлиняет и расширяет их, в том числе и за пределами блока, что позволяет формировать крутые борта карьера без нарушений за линией отрыва при хорошем качестве дробления [17]. Более качественный откол породы от массива и более крутой откос уступа свидетельствует о том, что большая часть энергии продуктов детонации передается разрушаемому массиву [18, с. 108].

Выполненные экспериментальные взрывы позволили в дальнейшем расширить сетку скважин диаметром 215 мм с 5×6 до 7×7 м, увеличить выход взорванной горной массы с 18,9 м³/м до 25,7 м³/м, уменьшить величину удельного расхода ВВ с 0,98 до 0,84 кг/м³ и величину перебура на 1 м при сохранении качества дробления. Отмечено также, что крупные куски горной массы часто разваливаются в забое под воздействием ковша экскаватора, что подтверждает существенное развитие трещиноватости при длительном многократном воз-

действии волн напряжения в режиме «сжатие–растяжение», возможном только при таких больших интервалах замедления.

Обсуждение

Увеличенные интервалы замедления при поскважинном взрывании позволяют практически на порядок увеличить общее время действия на массив горных пород многократных знакопеременных нагрузок, включая растягивающие напряжения. Так, общее время развития взрыва блока из 81 скважины увеличивается с 536 мс при схеме взрывания 25×47 мс до 5600 мс при схеме взрывания 300×400 мс.

Существенно меняется распределение замедления между последовательно взрывающимися скважинами при различных схемах взрывания (рис. 2).

Так, в схеме с замедлениями 25×47 мс 88,7% составляют интервалы от 1 до 8 мс, в схеме с замедлениями 42×67 мс 87,5% составляют интервалы от 8 до 17 мс, в схеме с замедлениями 109×176 мс 86,2% составляют интервалы от 17 до 42 мс, а в схеме с замедлениями 300×400 мс 57,5% составляют за-

медления в 100 мс. Еще 37,5% скважин взрываются одновременно из-за кратности ступеней замедления 100 мс, но расстояние между такими скважинами всегда большое, исключаящее их взаимовлияние, да и между ними уже имеется разрушенный предыдущими взрывами массив, поглощающий волны напряжения [17]. В работе [19] изложены основы теоретического подхода к изучению особенностей волнового предразрушения горных пород, в котором считается, что микротрещины в области упругого деформирования развиваются под действием импульса растяжения в упругой волне. Определяющими параметрами являются величина импульса растяжения, время его действия и скорость начала развития микротрещины и при определенном соотношении величин этих параметров природные зародышевые микротрещины могут прорасти на некоторую величину. Так, в работе [2, с. 262] показано, что приращение длины трещины за один цикл «сжатия–растяжения» составляет 10 мкм, что феноменологически трактуется как предразрушение породы. Последнее чрезвычайно важно для повышения степени дробления горных пород взрывом, ибо микроструктурные параметры породы в области упругого деформирования могут существенно изменяться при серии взрывных воздействий, поскольку имеют накопительный эффект [12, с. 112]. Отсюда следует, что размеры области предразрушения могут увеличиваться при продолжающихся динамических воздействиях на массив, и этот фактор техногенного воздействия на породу следует учитывать. В зависимости от технологических факторов размеры области предразрушения породы могут различаться в несколько раз: расчеты показали, что приведенный внешний радиус области предразрушения R к радиусу зарядной полости

$R_{зар}$ в случае сферической симметрии изменяется от 14 до 90 [19, с. 51].

Рассмотрим динамику нагружения условного массива горных пород с наиболее распространенными параметрами скорости звука в нем C_p равной 3–4 км/с — именно с такой скоростью движется волна напряжения по такому массиву. Примем среднюю скорость звука 3,5 км/с, тогда за 1 мс волна сжатия проходит 3,5 м. Рассмотрим схему взрывания скважин диаметром 200 мм, расположенных по сетке 6х6 м, с замедлением 25х42 мс. При динамическом нагружении предельная скорость развития трещин от скорости волны напряжения в массиве составляет по данным работы [1, с. 220] 0,34–0,51, а по данным работы [20, с. 215] только 0,1–0,13 — при проведении экспериментов в доломитах скорость развития трещин составляла 550 м/с при скорости распространения волны сжатия 4500 м/с.

После взрыва скважины 1 за 25 мс (взрыв скважины 2) волна напряжения уйдет на 87,5 м — за пределы блока. С некоторым запозданием, допустим 2 мс (см. рис. 1), в этой волне начнется действие фазы растяжения, вызывающее образование трещин [2]. Рассмотрим два варианта — рост трещин со скоростью $0,4C_p$ [1] и $0,1C_p$ [20]. В первом случае за 1 мс трещина растет на 1,4 м, во втором — на 0,35 м. Принимая размер зоны разрушения в $40R_{зар}$ (4 м), а зоны предразрушения R в $200R_{зар}$ (20 м), получим время на формирование зоны разрушения ≈ 3 мс и зоны предразрушения — 14 мс в первом случае, во втором — соответственно 11 мс и 57 мс.

Уже этот укрупненный расчет показывает, что формирование зоны предразрушения, даже при скорости роста трещин в $0,4C_p$, возможно при замедлениях более 14 мс между взрывами последовательно взрывааемых скважин. Исходя

из этого, очевидно, что схемы с замедлениями 25×47 мс и 42×67 мс не могут обеспечить достаточное время на завершение роста и слияния микротрещин в трещины, формирующие отдельности массива. Только схемы с замедлениями выше 100 мс могут обеспечить достаточное время для формирования не только зоны разрушения, но и предразрушения. Аналогичное мнение о влиянии циклических нагрузок на раскрытие зерен полезного компонента высказано и в работе [21, с. 178]. Значительная дисперсия упругих и прочностных свойств минералов, физико-механических свойств руд с разными структурными параметрами и характеристиками разрушения может существенным образом проявиться при кумулятивном характере накопления повреждений, т.е. при циклическом нагружении. Особенностью данного типа нагружения является постепенный рост и накопление трещин, движущихся в поле со сложной структурой микронапряжений, складывающийся в руде, содержащей минералы с разной прочностью и разными деформационными характеристиками. Картина и характер разрушения определяется накоплением нарушений от цикла к циклу и формированием множественной структуры разрушения.

В ходе проведения испытаний образцов на сжатие было установлено, что разрушение во многом зависит от характера прилагаемых нагрузок. Так, если образец нагрузить последовательно несколько раз все возрастающей нагрузкой, то наблюдается интенсивное накопление и развитие нарушений (трещин и микротрещин) — накапливаются необратимые разупрочняющие изменения. Величина разрушающей нагрузки в этих опытах была на 20–30% ниже, чем при обычном однократном нагружении. Естественно предположить, что в многокомпонентном материале, содержащем частицы с различными уп-

ругими и прочностными характеристиками, при многократном приложении нагрузки будет происходить кумулятивное разупрочнение каких-то отдельных фаз. Образцы подвергались циклическим воздействиям со средним циклическим напряжением 160 МПа и амплитудой циклического напряжения 60 МПа. Установлено, что в результате циклического воздействия сжимающей нагрузкой накопление разрушений происходит от цикла к циклу, и особенно активно протекают процессы разупрочнения в последних циклах, когда происходит массовое накопление микроразрушений, образуется множественная сетка микротрещин (резко возрастает интенсивность и суммарная акустическая эмиссия). В результате таких воздействий наблюдается множественное разрушение с образованием поверхности в несколько раз большей, чем при обычном (нециклическом деформировании) при этом энергия, запасенная (или требуемая для разрушения) при циклическом воздействии снижается в 1,3–1,4 раза.

Аналогичные результаты получены при многочисленных моделированиях динамики развития трещин в горных породах при изменении внешних воздействий [22–27].

Выводы

Многократное циклическое воздействие на массив горных пород волн напряжения от последовательных взрывов скважинных зарядов с увеличенным замедлением между ними позволяет завершить все процессы прорастания и слияния дислокаций и микронарушений в трещины, происходящие с невысокой скоростью. Растут длина и раскрытие трещин в зоне дробления и их число в зоне предразрушения. В первом случае увеличивается возможность проникновения сильно сжатых продуктов

взрыва (ПВ) в трещины и активного их расклинивания, что выражается снижением действия ПВ в сторону устья скважины при взрыве следующих зарядов — все большее их количество уходит в возникшие от предыдущих зарядов трещины, способствуя их развитию. Формируются гладкие устойчивые откосы уступов, длительность сохранения таких откосов по факту достигла 8 лет. Во втором — растет общая нарушенность массива, способствующая увеличению количества ослабленных участков, служащих местами зарождения точек разрушения, поскольку прочность всей системы определяется прочностью самого слабого места.

В сочетании с клиновым врубом в глубине блока, обеспечивающим режим взрывания «в зажиме», качественные показатели на карьерах группы компаний «Петропавловск» характеризуются компактным развалом связно-сыпучих пород со спокойным рельефом поверхности, способствующим снижению потерь и разубоживания полезного ископаемого, практическим отсутствием крупных фракций горной массы.

Повысилась производительность выемочного оборудования, снижен удельный расход ВВ при одновременном улучшении качества проработки подошвы уступа и снижении сейсмического эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутузов Б. Н. и др. Справочник взрывника / Под общ. ред. Б. Н. Кутузова. — М.: Недра, 1988. — 511 с.
2. Каркашадзе Г. Г., Ларионов П. В., Мишин П. Н. Моделирование роста трещины под действием циклической нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 258–262.
3. Крюков Г. М., Глазков Ю. В. Теоретическая оценка степени взрывного дробления горных пород на карьерах при разных способах инициирования зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — СВ 8. — 26 с.
4. Друкованый М. Ф. Методы управления взрывом на карьерах. — М.: Недра, 1973. — 416 с.
5. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Добровольский А. И., Галимьянов А. А. Патент № 2593285 РФ, МПК F42D 1/08. Способ открытой разработки группы угольных пластов с валовым взрывным рыхлением вскрышных пород; патентообладатель: Тихоокеанский государственный университет. № 2015127598/03, заявл. 08.07.2015; опубл. 10.08.2016.
6. Лапшов А. А. Оптимизация интервалов замедлений при массовых взрывах на карьерах. Автореф. дисс... к.т.н. — Екатеринбург, 2011. — 16 с.
7. Лупий С. М. Зоны предразрушения при буровзрывном способе проведения горных выработок и влияния их на параметры анкерного крепления // Взрывное дело. — 2016. — № 115/72. — С. 226–232.
8. Скрябин Р. М., Федоров Л. Н. Новые подходы к организации ресурсосберегающих процессов разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1995. — № 5. — С. 59–62.
9. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. 1 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 2. — С. 3–27.
10. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН СССР. — 1987. — Т. 293. — № 1.

11. Курленя М. В. и др. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН СССР. — 1992. — Т. 323. — № 2.
12. Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1989. — № 9. — С. 109–115.
13. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999. — 335 с.
14. Родионов В. Н. и др. Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971. — 222 с.
15. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1979. — 272 с.
16. Митюшкин Ю. А. и др. Оптимизация параметров взрывных работ увеличением интервалов замедления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 4. — С. 341–348.
17. Шевкун Е. Б., Лещинский А. В., Лысак Ю. А., Плотников А. Ю. Особенности взрывного рыхления при увеличенных интервалах замедления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 272–282.
18. Юровских А. В. Разработка модели разрушения горных пород на квазистатической стадии действия взрыва: Дис. .. канд. техн. наук: 25.00.20. — СПб., 2003. — 119 с.
19. Кочанов А. Н., Одинцев В. Н. Теоретическая оценка радиуса области предразрушения пород при камуфлетном взрыве // Взрывное дело. — 2015. — № 113/70. — С. 41–54.
20. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. — М.: Недра, 1989. — 376 с.
21. Хопунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии). — Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. — 429 с.
22. Халкечев Р. К., Халкечев К. В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измельчении горных пород на основе методов подобия и размерности в динамике трещин // Горный журнал. — 2016. — № 6. — С. 64–66.
23. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 77, Pp. 89–96.
24. Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 155–170.
25. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of blasting parameters using regression models in ratcon and NSCE granite quarries. Ibadan, Oyo State, Nigeria // Geomaterials. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 28–37. DOI: 10.4236/gm.2013.31004.
26. Haeri H., Shahriar K., Fatehi Marji M., Moarefvand P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in precracked rock-like discs // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 67. Pp. 20–28.
27. Liu T., Cao P., Lin H. Damage and fracture evolution of hydraulic in compression-shear rock cracks // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2014. Vol. 74. Pp. 55–63. **TIAB**

REFERENCES

1. Kutuzov B. N. etc. *Spravochnik vzryvnika* [The reference book of the detonator], Moscow, Nedra, 1988, 511 p.
2. Karkashadze G. G., Larionov P. V., Mishin P. N. Modeling crack growth under the action of cyclic loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no 3, pp. 258–262.

3. Kryukov G. M., Glazkov Yu. V. Theoretical assessment of the degree of explosive crushing of rocks in quarries with different methods of initiating charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2003. Special edition 8, 26 p.

4. Drukovanyy M. F. *Metody upravleniya vzryvom na kar'erakh* [Explosion control methods in quarries], Moscow, Nedra, 1973, 416 p.

5. Shevkun E. B., Leshchinsky A. V., Dobrovolsky A. I., Galimyanov A. A. *Patent RU 2593285*, MPK F42D 1/08. 10.08.2016.

6. Lapshov A. A. *Optimizatsiya intervalov zamedleniy pri massovykh vzryvakh na kar'erakh* [Optimization of the intervals of decelerations during mass explosions in open pits], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2011, 16 p.

7. Lupiy S. M. Prefracture zones during the blasting method of mine workings and their influence on the parameters of anchor fastening. *Vzryvnoe delo*. 2016, no 115/72, pp. 226–232.

8. Skryabin R. M., Fedorov L. N. New approaches to the organization of resource-saving processes of rock destruction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 1995, no 5, pp. 59–62.

9. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the phenomenon of alternating rock reaction to dynamic effects – to the waves of the pendulum type in tense geomeidia. Part I. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 2, pp. 3–27.

10. Kurlenya M. V., Oparin V. N., Revuzhenko A. F., Shemyakin E. I. About some features of the reaction of rocks to explosive effects in the near zone. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1987. vol. 293, no 1.

11. Kurlenya M. V. The alternating reaction of rocks to a dynamic effect. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1992, vol. 323, no 2.

12. Sadovsky M. A., Adushkin V. V., Spivak A. A. About the size of zones of irreversible deformation during an explosion in a block medium. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1989, no 9, pp. 109–115.

13. Kurlenya M. V., Oparin V. N. *Skvazhinnye geofizicheskie metody diagnostiki i kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massivov gornykh porod* [Well logging methods for the diagnosis and control of the stress-strain state of rock masses], Novosibirsk, Nauka, 1999, 335 p.

14. Rodionov V. N. *Mekhanicheskiy effekt podzemnogo vzryva* [The mechanical effect of an underground explosion], Moscow, Nedra, 1971, 222 p.

15. Nikiforovskiy V. S., Shemyakin E. I. *Dinamicheskoe razrushenie tverdykh tel* [Dynamic destruction of solids], Novosibirsk, Nauka, 1979, 272 p.

16. Mityushkin Yu. A. Optimization of the parameters of blasting operations by increasing the intervals of deceleration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no 4, pp. 341–348.

17. Shevkun E. B., Leshchinsky A. V., Lysak Yu. A., Plotnikov A. Yu. Features of explosive loosening at prolonged intervals of deceleration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 4, pp. 272–282.

18. Yurovskikh A. V. *Razrabotka modeli razrusheniya gornykh porod na kvazistaticheskoy stadii deystviya vzryva* [Development of a model of rock destruction at the quasistatic stage of the explosion], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2003, 119 p.

19. Kochanov A. N., Odintsev V. N. Theoretical estimation of the radius of the region of prefracture of rocks in a camouflage explosion. *Vzryvnoe delo*. 2015, no 113/70, pp. 41–54.

20. Baron V. L., Kantor V. Kh. *Tekhnika i tekhnologiya vzryvnykh rabot v SShA* [Technique and technology of blasting in the USA], Moscow, Nedra, 1989, 376 p.

21. Khopunov E. A. *Selektivnoe razrushenie mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya (v obo-gashchenii i metallurgii)* [Selective destruction of mineral and technogenic raw materials (in enrichment and metallurgy)], Ekaterinburg, OOO «UIPTS», 2013, 429 p.

22. Khalkachev R. K., Khalkachev K. V. Fracture selectivity control during crushing and grinding of rocks based on similarity and dimension methods in crack dynamics. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no 6, pp. 64 – 66.

23. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 77, Pp. 89 – 96.

24. Xiaodong Fu, Qian Sheng, Yonghui Zhang, Jian Chen Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 80. Pp. 155 – 170.

25. Akande J. M., Lawal A. I. Optimization of blasting parameters using regression models in ratcon and NSCE granite quarries. Ibadan, Oyo State, Nigeria. *Geomaterials*. 2013. Vol. 3. No 1. Pp. 28 – 37. DOI: 10.4236/gm.2013.31004.

26. Haeri H., Shahriar K., Fatehi Marji M., Moarefvand P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in precracked rock-like discs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 67. Pp. 20 – 28.

27. Liu T., Cao P., Lin H. Damage and fracture evolution of hydraulic in compression-shear rock cracks. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 74. Pp. 55 – 63. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевкун Евгений Борисович¹ – д-р техн. наук, профессор,

Лещинский Александр Валентинович¹ – д-р техн. наук,

доцент, профессор, e-mail: 000399@pnu.edu.ru,

Лысак Юрий Алексеевич² – генеральный директор,

Плотников Андрей Юрьевич² – зам. главного инженера по БВР,

¹ Тихоокеанский государственный университет,

² ООО «АВТ-Амур»,

Для контактов: Лещинский А.В., e-mail: 000399@pnu.edu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.B. Shevkun¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

A.V. Leshchinskiy¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Professor, e-mail: 000399@pnu.edu.ru,

Yu.A. Lysak², General Director,

A.Yu. Plotnikov², Deputy Chief Engineer,

¹ Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Russia,

² AVT-Amur LLC, Blagoveshchensk, Russia.

Corresponding author: A.V. Leshchinskiy, e-mail: 000399@pnu.edu.ru.

Получена редакцией 29.01.2020; получена после рецензии 30.04.2020; принята к печати 20.09.2020.

Received by the editors 29.01.2020; received after the review 30.04.2020; accepted for printing 20.09.2020.

