

22. Шолох Н. В. (1999). Горно-геометрический мониторинг прогнозирования качественных показателей железорудных месторождений. / Сб. научных трудов второго международного симпозиума «Оперативный контроль и управление качеством минерального сырья при добыче и переработке». – Ялта. – С. 218–220.
23. Шолох Н. В. (2005). Прогнозирование показателей геохимического поля месторождений железистых роговиков Кривбасса. / Научно – техн. сборник «Разраб. рудн. месторождений». – Кривой Рог. – Вып. 89. – С. 144–147.
24. Шолох М. В., Топчий О. Л. (2012). Прогнозування якісних показників руд та порівняння їх ефективності. / Науково – техн. збірник «Гірничий вісник». – Кривий Ріг. – Вип. 95(1). – С. 78–82.
25. Шолох М. В., Топчий О. Л., Сергєєва М. П. (2013). Моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів для прогнозування якісних показників корисної копалини. / Зб. наукових праць «Вісник КНУ». – Кривий Ріг. – Вип. 35. – С. 55–60.
26. Шолох М. В., Топчий О. Л., Сергєєва М. П. (2013). Моніторинг прогнозування показників корисної копалини родовища на основі стохастичного моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів. / Сб. матеріалів міжнародної науково – техн. конференції. – Донецьк: ДонНГУ. – Вып. 3. – С. 47–52.
27. Шолох М. В. (2016). Моделювання динамічних рядів прогнозування якісних показників руди і корисної копалини у рудній сировині. / Науково – техн. збірник «Гірничий вісник» ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг. – Вип. 101. – С. 49–55.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019

УДК 622.235

А.Ю. АНТОНОВ, Ю.С. МЕЦ, П.И. ФЕДОРЕНКО, доктора техн. наук, профессора  
Криворожский национальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО МИКРОСЕКУНДНОГО ВЗРЫВАНИЯ

**Цель.** Установление зависимости качества дробления от эффекта усталости горных пород при многократно повторяющихся взрывных нагрузках.

**Методы исследований.** Проведенные теоретические изыскания и анализ циклического воздействия нагрузок механического характера на образцы различных горных пород подтвердили актуальность лабораторных исследований и дальнейшего промышленного эксперимента по изучению влияния многократных взрывных нагрузок и иницируемого ими эффекта усталости на прочностные свойства пород и качественные показатели разрушения.

**Научная новизна.** Изучен механизм циклического взрывного нагружения различной интенсивности, установлен экстремальный характер влияния взрывной усталости на качество дробления горных пород, получены новые возможности для разрушения массива.

**Практическое значение.** Решения, явившиеся результатом настоящих исследований, позволяют использовать эффект усталости горных пород при проектировании и проведении взрывных работ. Предложенные вариации использования данного эффекта практически не усложняют работы по монтажу взрывной сети, а дополнительные расходы будут минимальными. Использование эффекта усталости позволяет увеличить величину вновь образованной свободной поверхности и, соответственно, улучшить качество дробления при постоянных удельных расходах ВВ, а без повышения качества дробления можно существенно снизить энергозатраты на разрушение горных пород.

**Результаты.** Установлены зависимости качества дробления от числа циклов неразрушающего нагружения. При этом доказано наличие оптимального количества циклов, при которых эффект усталости наиболее эффективен. Так, дроблению способствует начальная стадия явления усталости (процесс разупрочнения), когда из общей массы микротрещин еще не начался рост крупных трещин. Насыщенные микротрещинами породы легче и «качественнее» разрушаются на отдельности при взрывании основных зарядов. Вновь образованная поверхность на 30% больше, чем при взрывном разрушении без предварительного нагружения. Установлено, что максимальный результат достигается при повышенных удельных расходах ВВ с использованием малых интервалов замедлений (500-2500 мкс) между скважинами в ряду или встречно-направленным развитием взрыва между скважинами ряда или смежных рядов. Промышленные эксперименты подтвердили полученные зависимости для оптимизации нагрузок на разрушаемые породы с целью улучшения качества дробления. Реализация эффекта взрывной усталости при производстве массовых взрывов осуществлена на ряде карьеров Кривбасса. Установлено снижение выхода крупных классов (+400мм) в 1,5 раза и уменьшение диаметра среднего куска на 35%.

**Ключевые слова:** горные породы, взрывное нагружение, эффект усталости, циклические нагрузки, динамика разрушения.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-99-103

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Явление усталости в различных исследованиях рассматривалось как вредное, уменьшающее прочность целиков, опор и т.д. Поэтому конечной целью таких работ была разработка мер, снижающих этот эффект или учитывающих его. Испытание состояния объекта после разрушения не вели. В нашем случае

явление усталости горных пород рассматривается как полезное, способствующее разрушению массива и разупрочнению взорванных пород. Поэтому, основная задача настоящих исследований состоит в установлении зависимости качества дробления от эффекта усталости. Предстоит определить, при каких параметрах этот эффект способствует взрывному дроблению, а при каких замедляет его.

**Анализ исследований и публикаций.** Сущность эффекта усталости заключается в том, что при многократных, переменных во времени нагрузках, по величине ниже предела статистической прочности  $\sigma_{ст.}$ , в нагружаемом объеме породы растет количество местных ослаблений в виде микротрещин, что приводит к ее разрушению. Исследованиями установлено [1, 2], что если горную породу нагружать циклической нагрузкой ниже предела динамической прочности, то есть  $\sigma_{ц} < \sigma_{дин.}$ , то в этом случае даже при очень большом числе повторений предел прочности на разрушение остается при испытаниях таким же, как и в образцах, которые этим нагрузкам не подвергались. Это значит, что доля микротрещин и зон ослаблений не увеличилась. Из этого следует вывод, что если мы хотим использовать эффект ослабления, то необходимо обеспечить напряжения в объеме, превышающее  $\sigma_{дин.}$  Установлено также [2], что  $\sigma_{дин.}$  при механическом нагружении для разных горных пород различно и составляет  $(0,8 \div 0,5)\sigma_{ст.}$  При этом  $\sigma_{дин.}$  значительно снижается при росте числа циклических нагружений. Вместе с тем для горных пород характерно значительно меньшее число циклов  $N$ , при которых проявляется эффект усталости, чем для металлов, и что особенно важно, основной эффект наблюдается при небольшом числе циклов.

При взрыве заряда в окрестности скважины развивается давление порядка нескольких сотен тысяч атмосфер. При этом, движение волны сжатия сопровождается интенсивным образованием микротрещин [3-5], притом еще до выхода волны на свободную поверхность.

**Постановка задачи.** Для подтверждения теоретических предпосылок и установления количественных зависимостей усталости горных пород от параметров взрывного нагружения необходимо проведение лабораторных экспериментов на образцах магнетитовых кварцитов Кривбасса, подлежащих дальнейшему механическому дроблению, измельчению и обогащению, а при получении предполагаемых результатов - промышленная проверка эффекта усталости в различных условиях и вариациях опытов.

**Изложение материала и результаты.** Образцы для проведения лабораторных экспериментов представляли собой геометрические тела прямоугольной формы, изготовленные из монокристаллических руд.

В первой серии опытов была поставлена задача подтверждения наличия эффекта усталости в образцах магнетитовых кварцитов под воздействием многократно повторяющихся взрывных нагрузках. Рост интенсивности ослаблений (предположительно микротрещин) оценивался по снижению скорости звука в породе и изменению деформационных характеристик  $\epsilon$  (продольных и поперечных). Расчетным путем определялись модуль упругости  $E$  (сжатия) и коэффициент Пуассона  $\mu$ . Нагружение образцов осуществлялось на 100-тонном гидравлическом прессе по стандартной методике. Деформация измерялась индикаторами часового типа [2, 6, 7].

По результатам эксперимента были построены диаграммы зависимости напряжения  $\sigma$  - относительно деформации  $\epsilon$ , давшие наиболее достоверные и надежные данные о свойствах пород и иллюстрирующие связь между нагрузкой и деформацией на всем протяжении опыта.

Построены графики изменения скорости прохождения звука в образцах перпендикулярно и параллельно слоистости, найдены уравнения с учетом всех опытных данных вместе с результатом их обработки (табл. 1).

При этом установлена закономерность: с увеличением числа нагружений существенно уменьшается скорость звука. С уменьшением удельного расхода ВВ крутизна падения скорости звука в образцах уменьшается.

Результаты экспериментов показали, что характер зависимостей взрывной усталости аналогичен установленным ранее другими исследователями закономерностям при механическом нагружении образцов специальными вибраторами. Однако в самой физике сравниваемых процессов есть существенная разница: если при механическом циклическом нагружении максимальная нагрузка по всему образцу не превышает предела прочности из-за плавного нарастания нагрузки, то при взрывном нагружении в отдельных частях нагружаемого массива действуют

нагрузки, значительно превышающие предел прочности, и только средняя нагрузка по всему образцу ниже предела прочности.

Кроме того, нарастание и спад нагрузки происходит в промежутки времени, значительно более короткие. Очевидно, это является основной причиной того, что значительное разупрочнение материала наступает при единицах и десятках циклов нагружений, в то время, как при механическом этот факт начинает просматриваться, начиная с нескольких сотен и тысяч циклов.

Таблица 1

Эмпирические уравнения влияния предварительного взрывного нагружения на скорость звука в магнетитовых кварцитах

Условия взрыва	Расстояние от ВВ до образца, мм	Уравнения изменения скорости звука в образцах	Индекс корреляции	Надежность индекса корреляции
Параллельно слоистости	2,7	$C=2100+3190 e^{-0,055N^2}$	0,88	53
	3,6	$C=2100+3280 e^{-0,055N^2}$	0,36	44
	4,5	$C=2200+3280 e^{-0,027N^2}$	0,94	72
	5,4	$C=2250+3350 e^{-0,02N^2}$	0,87	44
	6,3	$C=2250+3360 e^{-0,019N}$	0,85	38
Перпендикулярно слоистости	2,7	$C=1500+3880 e^{0,12N^2}$	0,84	36
	3,6	$C=1600+3710 e^{0,05N^2}$	0,86	44
	4,5	$C=1700+3580 e^{0,02N^2}$	0,91	71
	5,4	$C=1780+3650 e^{0,02N^2}$	0,79	29
	6,3	$C=1800+3720 e^{0,044N}$	0,82	30

Поэтому, основная задача исследований состоит в установлении зависимости качества дробления от эффекта усталости, т.е. установлении - при каких параметрах этот эффект способствует взрывному дроблению.

Исследована зависимость изменения диаметра среднего куска от числа циклов неразрушающего нагружения. Установлено, что с ростом числа циклов качество взрывного дробления закономерно растет, однако более интенсивно диаметр среднего куска уменьшается вначале. Отсюда, можно сделать вывод о том, что разрушающее взрывное нагружение вызывает рост трещин в массиве, который потом легче разрушается на более мелкие куски. При повышенной интенсивности неразрушающих взрывных нагрузок возрастание числа циклов нагружения улучшает взрывное дробление до определенного предела. Дальнейшее возрастание количества циклов нагружения ухудшает динамику разрушения.

Наличие оптимума объясняется следующим образом: после первых циклов неразрушающего взрывного нагружения в образце создается много мелких незамкнутых между собой трещин, размеры которых статистически варьируются. Последующие циклы нагружений, кроме добавления в массиве микротрещин, увеличивают размер трещин, уже образованных предыдущим нагружением. В дальнейшем, крупные трещины поглощают вносимую энергию от последующих циклов на свой рост. С увеличением числа циклов в массиве преобладает рост нескольких больших трещин, в дальнейшем раскалывающих массив на крупные отдельные. Большие «раскрытые» трещины являются экраном для волн напряжений, что ухудшает дробление отдельных за трещинами. Таким образом, дроблению способствует начальная стадия явления усталости, когда из общей массы микротрещин еще не начался рост крупных трещин, то есть доказано наличие оптимального количества циклов, при котором эффект усталости улучшает качество взрывного дробления. Вновь образованная свободная поверхность на 30% больше, чем при взрывном разрушении без предварительного нагружения. Следовательно, использование эффекта усталости, позволяющее увеличить величину свободной поверхности и, соответственно, улучшить качество дробления при постоянных удельных расходах ВВ, а без повышения качества дробления можно существенно снизить энергозатраты на разрушение горных пород.

Проведенные исследования подтвердили теоретические предпосылки о том, что эффект взрывной усталости горных пород существенно повышает, при определенных условиях, эффективность взрывного дробления.

Экстраполяция данных, полученных на образцах, на массив сделана с учетом того факта, что для магнетитовых кварцитов Криворожья иерархическая последовательность дефективности различных структурных уровней слабо выражена [8-10]. Магнетитовые кварциты в высокой степени монолитны. В то же время, даже при развитой структуре отдельностей горных пород в балансе энергозатрат на разрушение они (отдельности) играют подчиненную роль [10]. При циклических взрывных нагрузках, не превышающих некоторый пороговый уровень за счет диссипации энергии, происходит преимущественная активация и образование дефектов высоких порядков. Фактически происходит преобразование структурных характеристик массива [9] так, что более энергоемкими являются дефекты более высоких порядков.

Для реализации взрывной усталости в промышленных условиях при производстве массовых взрывов разработан и проверен на карьерах ГОКов Кривбасса ряд инженерных решений.

В частности, достижение эффекта усталости при повышенных удельных расходах ВВ осуществляется с применением малых интервалов замедления (500-2500 мкс) между скважинами в ряду или встречно-направленным развитием взрыва между скважинами ряда или смежных рядов. Результаты промышленных взрывов подтвердили полученные зависимости. Так, при разрушении магнетитовых кварцитов крепостью  $f=18-20$  по шкале М.М. Протодеяконова, установлено снижение выхода крупных классов (+400 мм) в 1,5 раза и уменьшение диаметра среднего куска на 35 %.

#### **Выводы.**

1. Установлено, что предварительное нагружение даже при небольших затратах энергии, по сравнению с энергией дробления, повторяемое многократно, создает усталостные микротрещины в массиве, что способствует улучшению качества взрывного дробления основными зарядами.

2. Установлено, что влияние взрывной усталости на качество дробления носит экстремальный характер в отличие от предела прочности, который с увеличением числа циклов асимптотически убывает.

3. Доказано, что в отличие от усталости при механических нагрузках, проявляющихся при количестве сотен и тысяч циклов, взрывная усталость заметно проявляется при единицах циклов, что дает возможность использования этого эффекта при взрывном разрушении.

4. Разработанные методы реализации явления усталости при промышленной взрывной отбойке обеспечивают повышение качества дробления на 35%, а при неизменном качестве дробления позволяют существенно уменьшают расход ВВ.

#### *Список литературы*

1. Миндели Э.О., Мохначев М.П., Громова Н.В. Исследование прочностных и деформационных свойств горных пород при статических многократных и пульсирующих динамических нагрузках / Э.О. Миндели, М.П. Мохначев, Н.В. Громова // М.: изд. ИГД им. А.А.Скочинского, 1970.
2. Мохначев М.П. Усталость горных пород. М.: Недра, 1979.
3. Нисимацу Ю., Херосево Р. Влияние среднего напряжения и амплитуды напряжения на постоянные скорости усталостного разрушения горных пород / Ю.Нисимацу, Р. Херосево // Дзайре, 1971. - Т. 20. - № 209.
4. Киркхоф Ф. Модуляция хрупкой трещины упругими волнами, 1997. - М.: Мир. - С. 56-72.
5. Черепанов Г.П. О распространении трещин в сложной среде / Г.П. Черепанов // Журнал Прикладная математика и механика, 1987. -Т.31. - № 3. - С.17-23.
6. Федоренко П.Й., Подойніцина Т.О., Переметчик А.В. Визначення фізичних параметрів гірських порід / П.Й. Федоренко, Т.О.Подойніцина, А.В. Переметчик // Мінерал, Кривий Ріг, 2008. - 101 с.
7. Федоренко П.Й., Сидоренко В.Д., Шолох М.В. Фізика гірських порід. Видавничий центр КТУ, Кривий Ріг, 2009. - 147 с.
8. Миндели Э.О., Мохначев М.П. Сопротивление горных пород разрушению при динамической нагрузке / Э.О. Миндели, М.П. Мохначев // Горный журнал, 1971. - № 5.
9. Шемякин Е.И., Ревнивцев В.И., Фаддеенков Н.Н., Петров А.С. О подходе к оценке энергозатрат на дезинтеграцию руды // Обогащение руд, 1981. - № 6.
10. Фаддеенков Н.Н., Труфакин Н.Е., Шемякин Е.И. О математическом описании дезинтеграции пород иерархической дефектной структуры / Н.Н. Фаддеенков, Н.Е.Труфакин, Е.И. Шемякин // ФТПРПИ, 1980. - № 6.

Рукопись поступила в редакцию 05.04.2019