

На правах рукописи

Бозоров Носиржон Содикович

**Поврежденность кристаллов при взрыве
горных пород .**

01.04.07 - физика конденсированного состояния

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Санкт - Петербург

2002 г.

Работа выполнена в Физико-Техническом институте
им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Абдуманонов А.

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор Лексовский А.М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
вед. научный сотрудник Шпейзман В.В.

доктор физико-математических наук
вед. научный сотрудник Атрошенко С.А.

Ведущая организация: НИИ Математики и Механики (СПб ГУ)

Защита диссертации состоится “18” апреля 2002г. в 16⁰⁰ часов на заседании
диссертационного Совета Д.21222908 при Санкт-Петербургском
Государственном техническом университете по адресу: 195251, г. Санкт-
Петербург, Политехническая ул., д.29, к. 2, ауд. 265

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
СПбГТУ.

Автореферат разослан “15” марта 2002г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доцент

Воробьева Т. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ проблемы обеспечения естественной сохранности кристаллов при традиционном взрывном способе их добычи свидетельствует о наличии техногенных нарушений сплошности (микротрещин) значительной части добываемого кристаллосырья, что приводит к невосполнимым потерям, особенно при гибели уникальных экземпляров.

Для разработки физических основ оптимизации технологии взрывного способа добычи и дезинтеграции горной массы становится необходимым определение не только истинных размеров зоны макроразрушения вмещаю щей породы, но и в не меньшей степени размеров зоны микроскопических нарушений сплошности, зоны поврежденности. Однако нарушения сплошности микроскопического масштаба в непрозрачных минералах и горных породах в настоящее время просто не фиксируются вследствие маскировочного эффекта рельефа даже при использовании операции шлифования поверхности. А именно дефекты такого масштаба могут иметь место во вмещающих породах как в зоне разрушения, так и в зоне предразрушения. Для горных пород вопросы накопления повреждений, вопросы управления разрушением являются чрезвычайно актуальными. Интерес к рассмотрению этого вопроса определяется необходимостью поиска физически обоснованного подхода к определению истинных размеров потенциально опасной зоны повреждаемости добываемых кристаллов, что необходимо при разработке технологии щадящего взрывания

Целью работы в связи с этим являлось изучение распределения нарушений сплошности на различном удалении от центра взрыва, поскольку оказалось, что подобных данных в литературе нет, в частности, из-за отсутствия соответствующей методики исследования.

Для решения этой задачи представлялось необходимым применить люминесцентную микроскопию с использованием эффекта диффузии специальных низкомолекулярных люминофоров с характеристическим излучением в коротковолновой части спектра под воздействием ультрафио-

летнего (УФ) облучения и в качестве способа нагружения выбран метод камуфлетного взрыва.

Научная новизна

1. Методом люминесцентной микроскопии впервые показана возможность выявления *post factum* индуцированных взрывом повреждений (микронесплошностей) в кристаллических компонентах горной породы .
2. Показано, что в областях, значительно удаленных от центра взрыва и в которых расчет и эксперимент показывает уровень напряжений при взрыве 0,2-0,4 от прочности породы на отрыв, наблюдается достаточно высокая поврежденность и при этом только в высокомодульных компонентах
3. Впервые в модельном эксперименте по ударному нагружению композитного образца показано, что вследствие совместности деформирования в первую очередь разрушается высокомодульное включение, что однако ранее в технологии взрывной отбойки не принималось во внимание.
4. Впервые показано, что переход от традиционного взрывного заряда максимальной плотности к заряду существенно меньшей плотности (с более равномерным распределением энергии во времени и примерно равной потенциальной энергией) может обеспечить большую сохранность высокомодульных включений (меньшую поврежденность), что открывает возможность разработки технологии щадящего взрывания.

Практическая значимость результатов

1. На основе метода люминесцентной микроскопии разработана методика выявления индуцированной взрывом поврежденности кристаллов в горных породах .
2. При отработке технологии щадящего взрывания необходимо учитывать не только уровень средних напряжений в кристалловмещающей породе в целом, а, в первую очередь, уровень возможной локальной деформации, что ранее не принималось во внимание при расчете параметров взрыва.

Положения , выносимые на защиту

1. Показано, что при взрывном нагружении помимо общеизвестной зоны трещинообразования в породе в целом имеет место более протяженная, потенциально опасная зона микроповреждений высокомодульных кристаллов.
2. Разработаны физические основы метода определения зоны микроповрежденности высокомодульных кристаллов для тестирования технологии щадящего взрывания при добыче ценного кристаллосырья.
3. Показана возможность осуществления щадящего взрыва (более мягкого распределения энергии взрыва во времени по сравнению с применением традиционного заряда высокой плотности), в частности, при сохранении равенства потенциальных энергий путем уменьшения плотности заряда, при котором размер зоны поврежденности высокомодульных компонентов может быть минимизирован.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на семинаре "Актуальные проблемы прочности" (Новгород, 1997г.), международной конференции "Практическая керамика: некоторые технологии и методы исследования (Варшава, 1998г.), на семинарах лаборатории физики прочности композиционных материалов ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН России.

Публикации и вклад автора: основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3 печатных работах, написанных в соавторстве. Личный вклад заключается в разработке методических вопросов, приготовлении образцов и проведении экспериментов, в обработке и анализе результатов, формулировании основных выводов.

Основное содержание работы.

Во введении обоснована актуальность проблемы, необходимость разработки методов анализа микроповрежденности кристаллов при взрывном способе добычи ценного кристаллосырья

Первая глава посвящена литературному обзору. Рассмотрены литературные данные о строении горных пород, их механических свойствах, особенностях развития процесса разрушения горных пород при взрыве и при статическом нагружении и другие вопросы.

Отмечено, что несмотря на указанную выше проблематичность естественной сохранности ценного кристаллосырья при существующей технологии взрывной отбойки кристалловмещающих пород, систематического изучения повреждаемости кристаллов по существу не было, в частности, и потому что изучение поврежденности традиционным способом, например, с помощью световой или растровой электронной микроскопии чрезвычайно затруднено, из-за маскировочного эффекта рельефа.

Вторая глава посвящена изложению методических вопросов препарирования образцов гранита для анализа *post factum* наведенной взрывом поврежденности кристаллических компонентов гранита с помощью люминесцентной микроскопии. Из средней и дальней (от центра взрыва) зон вырезались фрагменты пластины для анализа их поврежденности. Фрагменты в виде параллелепипедов с размером сторон $12 \times 25 \times 20$ мм помещались на дно кюветы с 0,03% раствором люминофора на основе метилфталимидов в одном из предельных углеводов, так чтобы образец был погружен на 1мм по высоте. Кювета с образцом помещалась на предметный столик люминесцентного микроскопа МЛ-3, который обеспечивает изучение объектов в свете их люминесценции, возбуждаемой синевioletовыми и ультрафиолетовыми (УФ) лучами источника света ртутной лампы ДРШ-250-3. Для выделения определенных участков спектра из общего излучения источника света применялся набор светофильтров.

Эксперимент показал, что через некоторое время после погружения нижней части образца в раствор с люминофором за счет капиллярных явлений последний поднимается по каналам несплошности, выходит на поверхность образца, декорируя дефекты несплошности. Первыми появляются наиболее крупные (наиболее раскрытые) дефекты. В растворе легкого углеводорода это

происходит за 6÷8 минут, в более тяжелом за 25÷30 мин. В более легком растворителе за это время (25÷30 мин) люминофор декорирует не только микротрещины, но и большинство границ раздела между зернами минералов кварца, полевого шпата и слюды.

Здесь же рассмотрены вопросы приготовления модельных композитных образцов для испытания в модельной ситуации - при откольном разрушении в условиях динамического нагружения.

В третьей главе рассматриваются основные экспериментальные результаты.

На рис.1 показаны микрофотографии из 2-х разноудаленных мест от центра

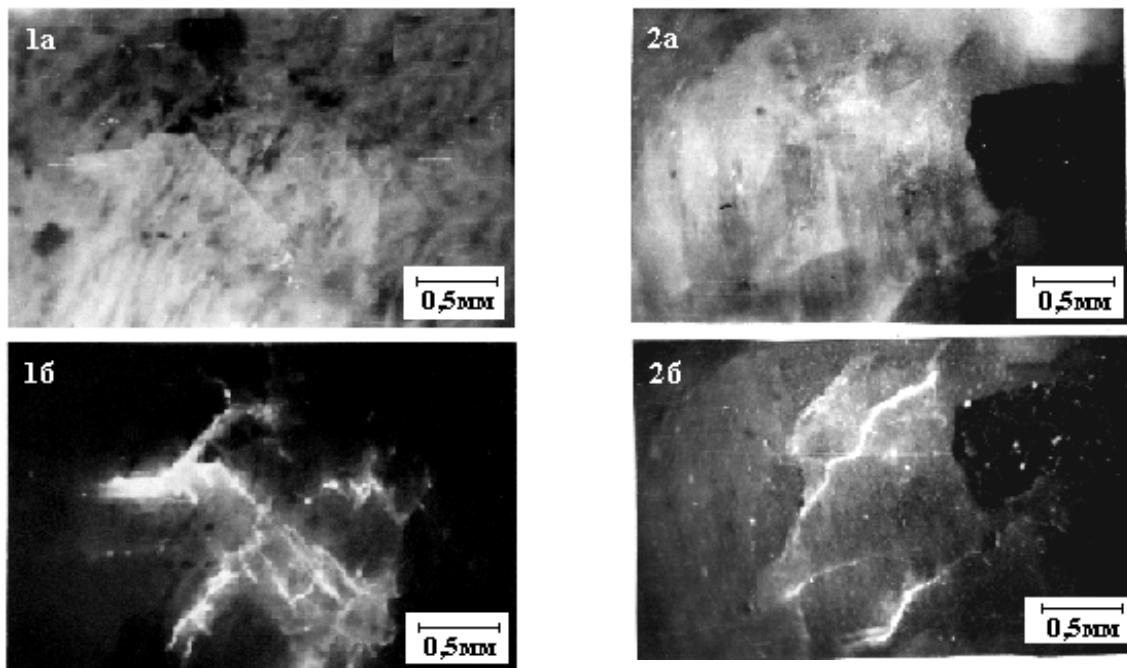


Рис.1. Микрофотографии поверхности гранитных образцов в белом свете (а) и УФ облучении (б) на разном удалении от центра взрыва: 1 - $r \geq 15R_{03}$; 2 - $r \geq 40R_{03}$;

камуфлетного взрыва (который был произведен совместно с проф. В. А. Боровиковым) сосредоточенного заряда тэна плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ в гранитном блоке с размером сторон $15 \times 25 \times 25 \text{ см.}$. Каждое место фотографировалось два раза: один раз при обычном освещении дневном светом, второй раз при УФ освещении. При УФ освещении хорошо видны декорированные каналы

несплошности, а при белом освещении рельеф не позволяет выявить эти дефекты несплошности.

На этих фотографиях самыми темными являются зерна слюды, самые светлые - зерна кварца, промежуточные по цвету - зерна полевого шпата. Эти три минерала являются основными компонентами гранита. Можно видеть, что в ближней зоне плотность трещиноподобных каналов несплошности гораздо больше, чем в дальней зоне. В дальней зоне наблюдается как правило единичные, изолированные трещины. На рис.2 для начала дальней зоны (r / R_{03})=30,

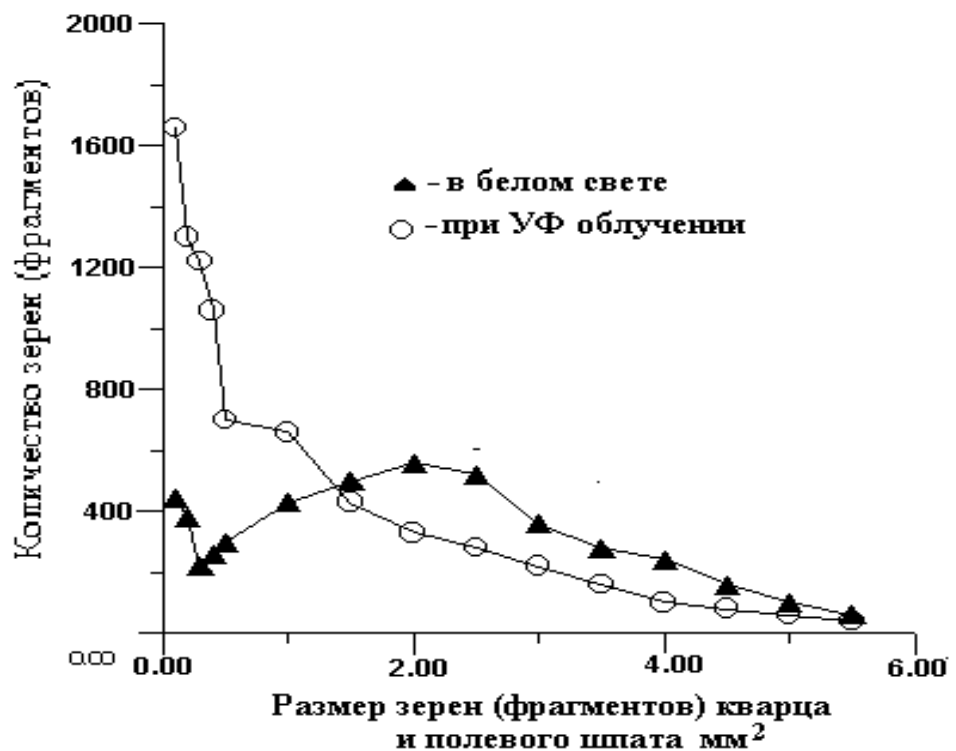


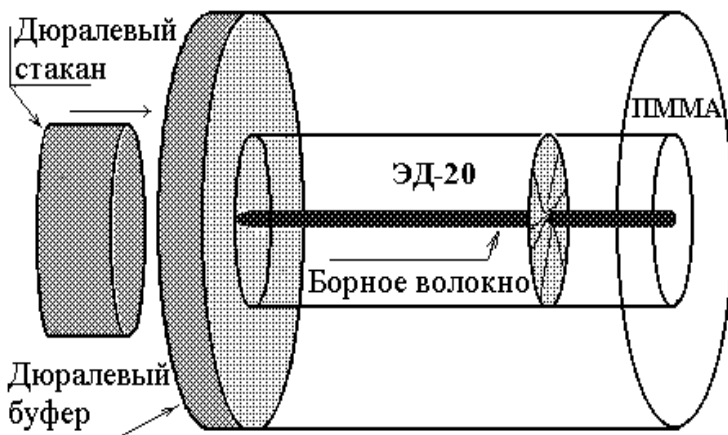
Рис.2.

где поврежденность кристаллов по общепринятому мнению не должна была иметь место, показано распределение зерен по размерам в условиях освещения белым светом и при УФ облучении, которое выявляет наличие большего количества фрагментов т.е. раздробленность зерен. Можно видеть, что имеет место достаточно сильное (более 3÷4 раз) увеличение числа фрагментов малого размера. При белом освещении эти "тонкие" границы (\equiv микротрещины) просто не выявляются. А при УФ освещении люминофор, проникавший в эти "тонкие" микротрещины их проявляет. При этом оказалось, что разрушаются

преимущественно зерна кварца. Если на расстоянии 20- 30 R_{03} разрушаются зерна и полевого шпата и кварца, то на большом удалении ($\geq 40 R_{03}$) разрушаются преимущественно зерна кварца. Зерна слюды в наших образцах оставались неразрушенными.

Т.е. эксперимент показал, что разрушаются в первую очередь высокомодульные кристаллы. Это обстоятельство никем раньше не отмечалось. С позиции физики прочности композиционных материалов это обстоятельство не является удивительным, поскольку в условиях совместности деформации именно в высокомодульных кристаллах могут быть достигнуты критические напряжения при одной и той же общей деформации конгломерата разномодульных зерен.

На модельном образце и в модельной ситуации представлялось интересным проверить справедливость такого предположения. Модельный



композиционный образец из органического стекла ПММА (полиметилакрилата) имел вид шайбы диаметром 50 мм и толщиной 10 мм со сквозным каналом диаметром 1,5 мм в центре, заполненным эпоксидной смолой. Одна группа образцов содержала в этом канале

высокопрочное и, главное, высокомодульное борное волокно ($E=400\text{ГПа}$) диаметром 100 мкм. В другой группе образцов вместо борного волокна было вклеено высокопрочное, но с существенно меньшим

модулем ($E = 70\div 90 \text{ Гпа}$) стеклянное волокно также диаметром 100 мкм. На рис. 3а и 3б схематически показаны вид такого композиционного образца, схема нагружения и эпюра напряжения. Образец нагружался ударом с помощью легкогазово вой пушки дюралевым стаканом по дюралевому буферу (опыты проводились совместно с А. Б. Синани и Ю. А. Емельяновым). Эксперимент

показал, что динамическая откольная прочность образца из чистого оргстекла

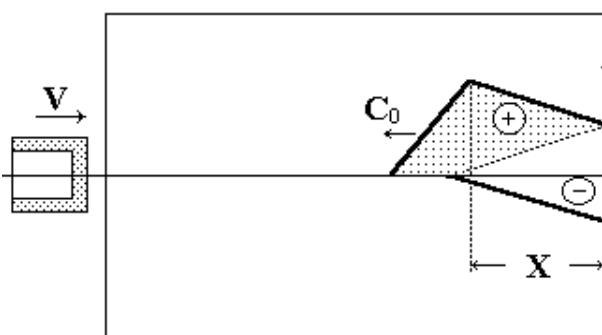


Рис.3б Схема эпюры напряжений

составляет $\approx 160-180$ МПа. При этом скорость соударения была на уровне 220 м/с, длительность импульса составляла $2\div 3$ мкс, геометрическая длина импульса 6 мм. Опытным путем было установлено что динамическая откольная прочность образца при создании в нем инородного

канала только с эпоксидной смолой не изменилась (160-180 МПа).

В эксперименте с образцами третьего типа высокомодульное борное волокно разрушается, как оказалось уже при скорости соударения 109–120 м/с. В этом случае динамическая нагрузка на оргстекле была на уровне 80-90 МПа и основное тело образца (ПММА) при этом оставалось неразрушенным, т.е. традиционного откольного разрушения не происходило. Анализ поверхности разрушения извлеченного борного волокна с помощью растрового электронного микроскопа показал, что разрушение волокна инициировалось изнутри, т.е. происходило так, как если бы волокно растягивали за два конца, поэтому разрыв волокна не был следствием развития трещины с границы раздела оргстекло - эпоксидная смола. В случае образца со стеклянным волокном его разрушение происходит при заметно большей динамической нагрузке на уровне 120-130 МПа, т.е. при большей деформации системы в целом, но меньшей, чем в случае исходного образца из оргстекла.

Таким образом, в прямом эксперименте показано, что в гетерогенном материале не только в условиях статического нагружения, что давно и хорошо известно исследователям, но и при динамическом (в том числе и при взрывном) нагружении реализуется принцип совместного деформирования.

Поэтому высокомодульные кристаллы (включения) даже на большом удалении от центра взрыва могут получить повреждения (в них могут

рождаться микротрещины) и при незначительных напряжениях в кристалловмещающей породе в целом.

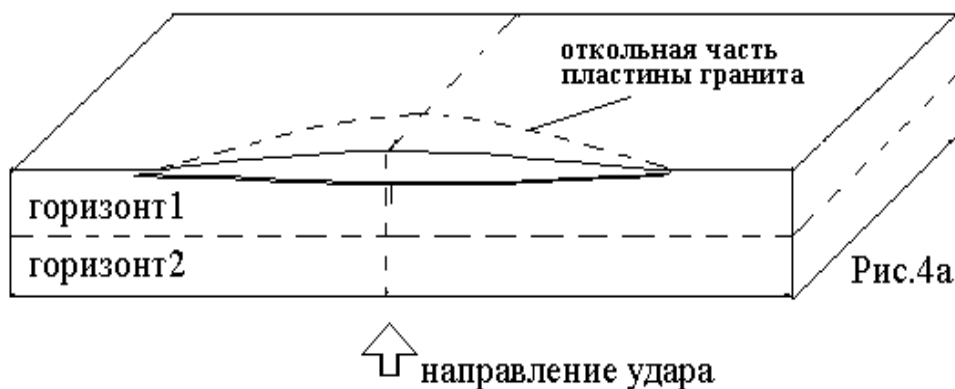
Рассмотрим теперь вопрос об объемном повреждении кристаллов, поскольку до сих пор обсуждались результаты изучения повреждений кристаллов в горной породе только на поверхности образцов.

Путем взвешивания на электронных весах ER-180A (с точностью до 0,1 мг) образцов на воздухе в исходном состоянии (после вакуумной сушки) и после пропитки в “легком” смачивающем растворителе оказалось возможным определить в некотором приближении “истинный” объем, занятый микротрещинами (мктр) и тем самым определить наведенную интегральную поврежденность.

Представляется, однако, целесообразным вначале рассмотреть наиболее простой по сравнению со взрывом случай, а именно так называемый тыльный откол, при котором максимальные повреждения следует ожидать в узком и определенно локализованном объеме в полном соответствии с эпюрой напряжений.

Интегральная поврежденность гранита при тыльном отколе. Этот вариант разрушения при динамическом нагружении изучен давно и основательно и распределение напряжений по объему образца мишени хорошо известно, что схематически уже приводилось выше.

На рис.4а приведено схематическое изображение половины пластины



гранита толщиной ~ 20 мм, в которой произошло явление тыльного откола вследствие удара по методу электродинамического нагружения, и схема первичной распиловки на 2 горизонта.

Последующее препарирование этой части пластины на фрагменты размером $\sim (8 \times 6 \times 5)$ мм было произведено по схеме, изображенной на рис.4б

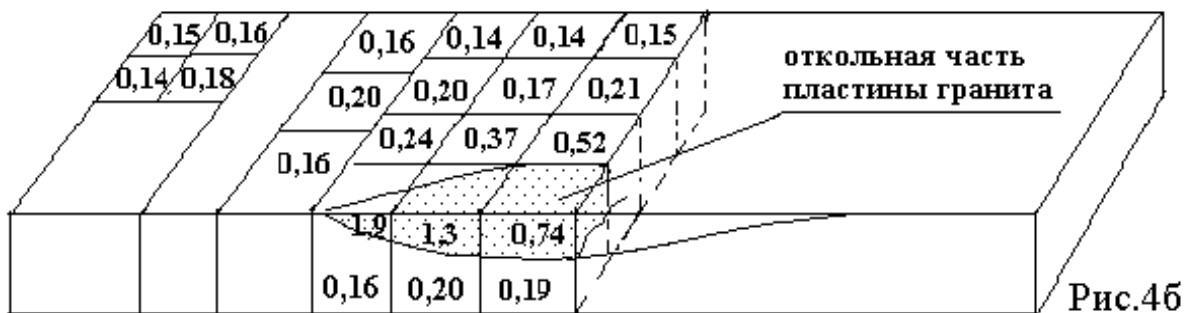


Рис.4б

Размер фрагментов выбирался из соображений статистически надежной представительности всех компонентов гранита в каждом исследуемом фрагменте. В итоге получилось по 19 "элементарных" фрагментов ("кубиков") в каждом горизонте. При этом 3 центральных "кубика" в первом горизонте оказались расщепленными на неравные доли вследствие прохождения трещины откола.

Определение объема микронесплошностей, появившихся в локальных областях вследствие ударного нагружения и тыльного откола показывает, как и следовало ожидать, что максимальная поврежденность приходится на относительно тонкую откольную пластину и в целом хорошо следует эпюре напряжений с учетом дискретного размера исследуемых фрагментов. Величина поврежденности в разных местах криволинейной откольной пластины при выбранной дискретности препарирования, как можно видеть, существенно различается (1,9% и 0,74%), но это происходит вследствие того, что доля объема в каждом фрагменте с максимальными напряжениями в центральной и периферийной областях каждого из 3-х "кубиков" заметно разная. Вероятнее всего, в достаточно узкой зоне с максимальными напряжениями (при величине

анализируемого объема в $250 \div 300 \text{ мм}^3$) поврежденность может достигать 2÷5 процентов.

Интегральная поврежденность при камуфлетном взрыве заряда ВВ высокой плотности. На рис.5 приведены схема “разделки” одной из вырезанных плит гранита

после проведения камуфлетного взрыва и график изменения объема нарушений сплошности (объема микротрещин) в образце гранита на разном расстоянии (r/R_{03}) от центра взрыва сосредоточенного заряда высокой плотности в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Можно видеть, что даже на расстоянии $40 \div 60 R_{03}$

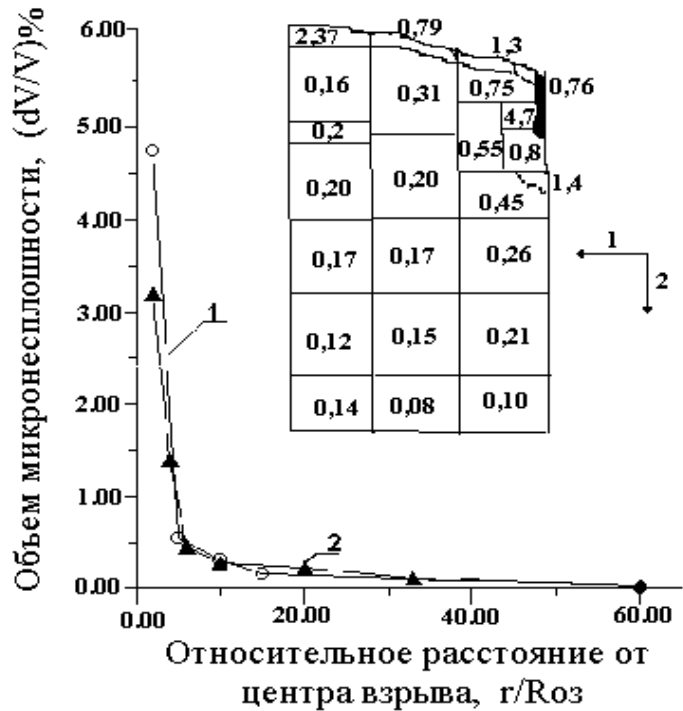


Рис.5.

высокомодульные компоненты гранита в результате взрыва имеют повреждения, которые на первый взгляд могут казаться незначительными, по крайней мере по сравнению с поврежденностью в ближней зоне. Если раскрытие микротрещин принять равным $0,1 \div 1 \text{ мкм}$, то в таком образце окажется от 5 до 100 (или более) пустых “пластин”, равных по площади поперечнику этого “элементарного” образца. Т.е., “внутренняя” поверхность разрушения при взрыве горных пород может почти в десять раз (в зависимости от расстояния до центра взрыва) превышать суммарную “внешнюю” поверхность образовавшихся фрагментов породы, которая, как правило, только и принимается во внимание. Уровень поврежденности на расстоянии $\geq 60 r/R_{03}$ является исходным для наших образцов. “Исходная” поврежденность была приобретена на предшествующей стадии добычи гранита в промышленном карьере.

Необходимо отметить, что для гетерогенного материала с постоянным составом компонентов график объемной поврежденности может рассматриваться как распределение истинных локальных деформаций при взрыве блока гранита, а разрушенные высокомодульные кристаллы кварца являются детекторами, индикаторами локальных деформаций.

Данные этих измерений позволяют оценить радиус зоны поврежденности высокомодульных кристаллов кварца в граните при взрыве сосредоточенного заряда тэна плотностью $\sim 1,6 \text{ г/см}^3$ на уровне $\leq 60 \text{ г/R}_{03}$, что в 3÷4 раза больше, чем то принято считать в практике взрывной отбойки.

Рассмотренные выше результаты дают основание считать, что примененный способ анализа поврежденности может выполнять роль эффективного инструмента при отработке технологии щадящего взрывания.

Интегральная поврежденность при использовании ВВ малой плотности (один из вариантов щадящего взрывания, когда формируется

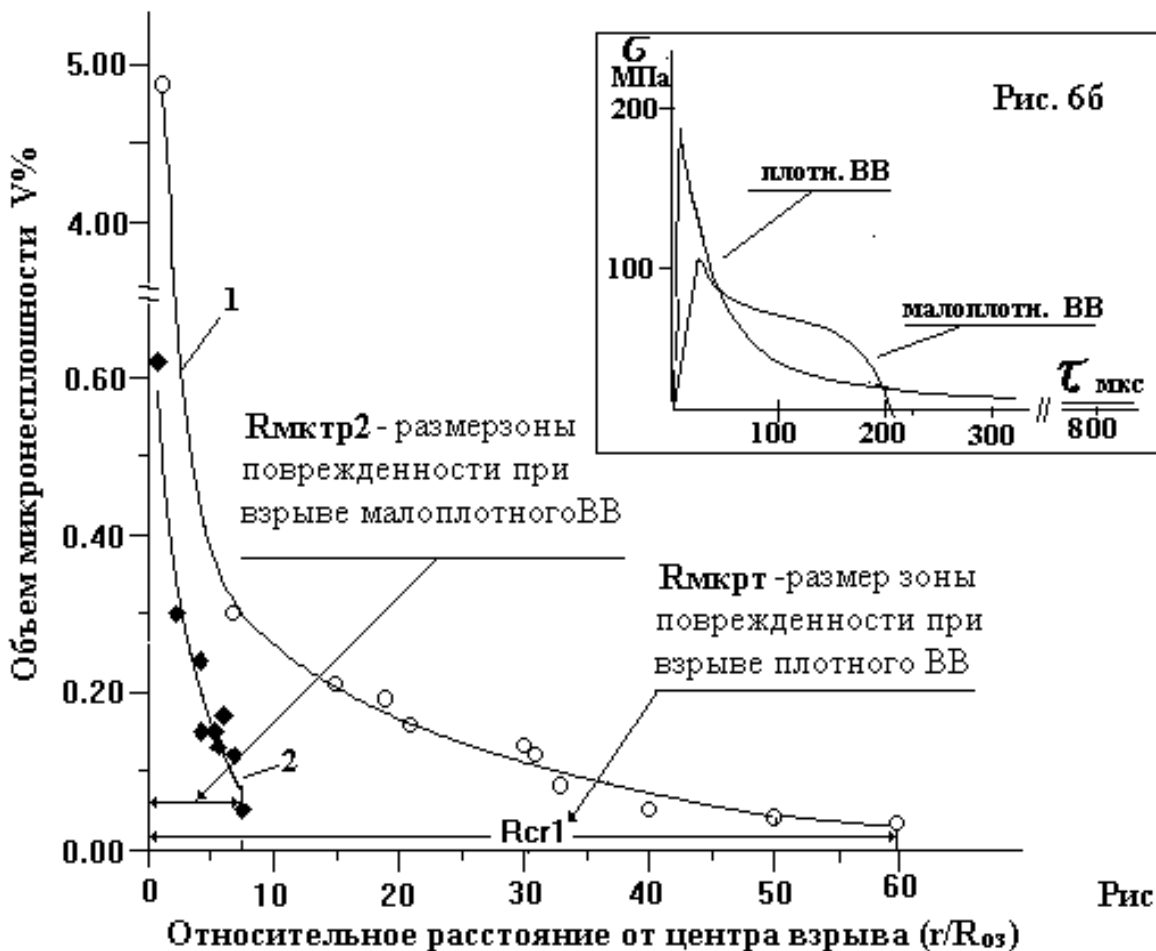


Рис. 6а

особый профиль волны с более равномерным распределением энергии рис.6б), отображена на графике рис.6а (см. кр. 2) в дополнение к графику интегральной поврежденности при взрыве сосредоточенного заряда ВВ

высокой плотностью (см.кр.1). Как можно видеть из этих данных, радиус зоны микроповреждений в этом случае уменьшился в несколько раз.

Таким образом, этим методом удастся определить очень важную для практики характеристику – радиус зоны микроповреждений, т.е. радиус зоны, где с большей вероятностью будут наблюдаться повреждения (микротрещины) в высокомодульных кристаллах ценных минералов, которые и представляют как правило цель многих взрывных работ. Сравнение разных технологий – взрыва с помощью традиционного, плотного ВВ ($\sim 1.6 \text{ г/см}^3$) и взрыва с помощью малоплотного ВВ ($0,5 \text{ г/см}^3$) показывает, что радиус зоны микроповреждений в последнем случае в 5 – 6 раз меньше.

Основные результаты и выводы .

В результате проведенного исследования с помощью разработанной оригинальной методики на основе люминесцентной микроскопии и эффекта диффузии раствора люминофора показано, что вне традиционной зоны трещинообразования, вне области большой амплитуды волны напряжений имеет место в несколько раз более протяжения микроповреждений кристаллов и при этом преимущественно высокомодульных .

Микроповрежденность обусловлена тем, что при совместном деформировании композиционной системы как единого целого именно высокомодульные кристаллы подвергаются большим напряжениям даже при низком значении напряжений в горной породе, как едином целом.

Предложена методика определения зоны микроповрежденности кристаллов и экспериментально показано, что она может быть использована в качестве эффективного инструмента при разработке вариантов технологии щадящего взрывания кристалловмещающих пород .

Применение технологии использования малоплотного ВВ может рассматриваться как один из оптимальных вариантов взрывной отбойки в промышленных карьерах, поскольку эксперимент показал, что радиус зоны микроповреждений по сравнению с традиционным применением высокоплотных ВВ в этом случае в 5÷6 раз меньше, что может увеличить полезный выход ценных кристаллов при взрывном способе их добычи по крайней мере в несколько раз.

Основной вывод по результатам работы может быть сформулирован следующим образом: в результате проведенного исследования разработаны физические основы метода определения зоны микроповрежденности высококомодульных кристаллов для тестирования технологии щадящего взрывания при добыче ценного кристаллосырья.

Основные результаты опубликованы :

1. Лексовский А.М., Боровиков В.А., Бозоров Н.С., Абдуманонов А. Обнаружение микротрещин в образцах горных пород с помощью люминесцентной микроскопии. // Письма в ЖТФ, т.22, вып.3,(2), 1996, с.6-8.
2. Лексовский А.М., Абдуманонов А., Бозоров Н.С., Боровиков В.А., Емельянов Ю.А. Синани А.Б. Некоторые аспекты микромеханики разрушения горных пород при взрыве. // Тр. Международный семинар "Актуальные проблемы прочности им В.А. Лихачева, Новгород, 1997, т.2, ч.2 с.397-401.
3. Лексовский А.М., Абдуманонов А., Бозоров Н.С. и др., К вопросу о микромеханике повреждений горных пород при взрыве. // Wspolczesna ceramika wybrane technologie i metody badan, Warszawa, 1998, 189-195.