

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ
им. Н. ИСАНОВА**

Диссертационный совет Д.01.15.505

На правах рукописи
УДК 531.781.2:553.241/242(043.3)

СУЛТАНАЛИЕВА РАЯ МАМАКЕЕВНА

**ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Бишкек – 2016

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Институте геомеханики и освоения недр национальной академии наук Кыргызской Республики

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Тажобаев Кушбакали Тажибаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Назарова Лариса Алексеевна**

доктор физико-математических наук, профессор **Абдрахманов Сарбагыш Абдрахманович**

доктор технических наук, профессор **Свиденко Владимир Николаевич**

Ведущая организация: Кыргызско-Российский Славянский Университет им. Б.Н.Ельцина, 720000, г.Бишкек, ул. Киевская, 44.

Защита состоится 27 мая 2016 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.01.15.505 при Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова по адресу: 720040, г. Бишкек, пр. Мира, 66, ауд.1/314.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Манаса, 66) и Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (720020, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. А. Малдыбаева, 34б).

Автореферат разослан _____ 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф-м.н.

Мекенбаев Б.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительная часть бюджета Кыргызстана формируется за счет горного производства. Одна из главных задач горной науки - разработка новых технологий добычи и обогащения, которые позволят существенным образом уменьшить затраты и потери полезных ископаемых. Для разработки современных технологий переработки полезных ископаемых необходимо полное использование знаний о физических свойствах и процессах, происходящих в горных породах, а также умение управлять свойствами пород. При переработке минерального сырья, с целью извлечения металлов и полезных компонентов, в технологические процессы дробления и измельчения вовлекаются большой объем трудно измельчаемых руд и минералов. Известно, что руды цветных, редких и благородных металлов, в основном имеют высокую прочность. Использование для этих руд традиционных способов измельчения приводит к росту энергозатрат, интенсивному износу металлических частей мельниц, к значительным потерям извлекаемых металлов. В связи с этим необходимость разработки и внедрения способов и средств целенаправленного изменения технологических свойств трудноизмельчаемого минерального сырья, обеспечивающих их эффективную переработку является стимулом новых исследований. Целенаправленная подготовка и управление качеством руд, проводимых комплексно, с учетом строения массива и его геомеханического состояния, управление механическими свойствами горных пород имеет решающее значение в эффективном освоении месторождений руд цветных и благородных металлов. Перспективы использования целенаправленного изменения механических свойств пород в технологии извлечения металлов из руд определяются пониманием физической сущности закономерностей и механизмов процессов преобразования структурного состояния полиминерального агрегата, инициируемых внешним воздействием. Знание этих закономерностей позволяет выбрать рациональный вид и режим физической обработки минерального сырья, обеспечивающий экономическую выгоду, эффективность и экологическую чистоту производства. Традиционное рассмотрение физических процессов, происходящих в горных породах, как в однородных средах не раскрывает механизма изменения свойств при внешнем воздействии. Только новые подходы, учитывающие гетерогенность горных пород и понимание механизма и причин структурных преобразований руд и минералов, происходящих при воздействии на них физическими полями, позволяют обеспечить существенное уменьшение энергоемкости высокочрезвычайно затратного процесса измельчения. В связи с этим проблема исследования горных пород и руд как структурно-неоднородных объектов и разработка на этой основе физико-технических принципов целенаправленного изменения их механических свойств под воздействием физических полей представляется актуальной.

Связь темы диссертации с научными программами. Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ МОиН КР: «Исследование влияния времени и режимов воздействия физических полей на энергоемкость измельчения горных пород», гос. регистрац. №0004931, 2008 г.; «Исследование влияния остаточных напряжений на энергоемкость измельчения руд и минералов», гос.регистр. №0006594, 2013г.; «Инновационные технологии решения физико-технических проблем в промышленности КР», гос.регистр. №007064, 2014 г.

Цель работы: разработка физико-технических основ целенаправленного изменения свойств крепких полиминеральных руд в процессах их переработки, обеспечивающее повышение выхода полезных компонентов, уменьшение энергозатрат в процессе измельчения.

Для достижения цели предусматривается решение следующих задач:

1. Анализ современного состояния проблемы целенаправленного изменения свойств полиминеральных крепких руд при их подготовке к обогащению.
2. Оценка влияния различных физических полей на механические свойства горных пород.
3. Экспериментальное определение структурного состояния и исследование механизма изменения свойств полиминеральных руд и горных пород.
4. Обоснование принципов целенаправленного изменения свойств руд и минералов.
5. Разработка рекомендаций по целенаправленному изменению механических свойств трудно измельчаемых руд для их эффективного разупрочнения.

Идея работы состоит в использовании избирательной реакции структурных элементов полиминеральных руд и минералов на действие физических полей, путем подбора вида и режима воздействия, инициирования в отдельных структурных элементах и компонентах изменения их состояний и связей, необходимые для разупрочнения.

Методы и объекты исследования. При описании механизма изменения механических свойств и прогнозе поведения руд и минералов под воздействием различных полей использовались методы механики разрушения, экспериментальные методы, рентгеноструктурный анализ. Для целенаправленного изменения механических свойств горных пород применялось воздействие электромагнитного СВЧ поля и термическая обработка. Объектом исследования послужили горные породы, руды, отобранные из разных рудных месторождений Кыргызстана. Для определения структуры и остаточных напряжений на уровне кристаллической решетки применялся рентгеноструктурный анализ. Для определения прочностных свойств руд и минералов до и после воздействия физических полей применялись стандартные экспериментальные методы испытаний. При анализе изменения свойств пород и остаточных напряжений использовались методы лабораторных измерений и структурно-механическая модель неоднородной твердой среды.

Научная новизна заключается в следующем:

- установлено, что в горных породах вследствие их дискретно-связанной структуры, распределение напряжений на разных масштабных уровнях носит неоднородный и скачкообразный характер;
- установлены аналитические зависимости структурно-механической модели неоднородной твердой среды, которые позволяют проводить количественную оценку изменения напряжений на разных масштабных уровнях, разработать рекомендации по целенаправленному управлению механическими свойствами крепких руд;
- впервые получена зависимость удельной теплоемкости от продолжительности воздействия СВЧ волн, которая, позволяет определить температуру горной породы, при которой происходит максимальное разупрочнение;
- получена эмпирическая формула для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при воздействии СВЧ волн, с последующим охлаждением в воздухе;
- разработан способ разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий определить оптимальную продолжительность воздействия СВЧ волн для руды данного типа и размера кусков, подлежащих измельчению (Способ измельчения руд и минералов/ Патент на изобретение КР № 1503.2012).

Научное значение работы заключается в: раскрытии механизма изменения механических свойств горных пород, подвергающихся воздействию физических полей; обосновании и разработке методического подхода целенаправленного изменения механических свойств горных пород, путем воздействия на них физическими полями; установлении оптимального времени воздействия физического поля, обеспечивающего уменьшение энергоемкости измельчения крепких руд; обосновании аналитических зависимостей структурно-механической модели неоднородной твердой среды, описывающий изменение структурных напряжений горных пород.

Практическая значимость работы состоит в:

- разработке методического подхода целенаправленного изменения механических свойств горных пород путем воздействия на них физических полей, выборе рационального вида и режима внешнего воздействия, обеспечивающего формирование нового структурного состояния руд и горных пород, повышающих эффективность их измельчения;
- обосновании рекомендации по применению СВЧ электромагнитного воздействия для решения конкретных задач целенаправленного изменения свойств горных пород;
- установлении оптимального времени воздействия СВЧ волн и характерной температуры для данной руды, при которой реализуется эффективное измельчение, достигается минимальность энергоемкости;
- экспериментальном определении удельной энергоемкости измельчения горных пород от продолжительности воздействия СВЧ волн и расчетном

описании изменений энергоемкости от температуры на основе полученной зависимости;

- установлении времени воздействия СВЧ волн, соответствующего минимуму энергоемкости измельчения, которая для большинства руд составляет 3-5 минут.

Экономическая значимость полученных результатов. Разработан метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий значительно уменьшить энергоемкость измельчения и определить оптимальную продолжительность воздействия СВЧ волн. Экономия энергии при оптимальном времени воздействия СВЧ волн, по сравнению с исходным состоянием, для руд и горных пород, отобранных из разных месторождений (Кумтор, Токтозан, Сары-Джаз, Ак-Татыр) Кыргызской Республики составляет 40%.

Основные научные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости структурно-механической модели неоднородного твердого материала, которые позволяют проводить количественную оценку изменения напряжений на разных масштабных уровнях, обосновать способы по целенаправленному уменьшению энергоемкости измельчения крепких руд и минералов.

2. Метод разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий определить оптимальную продолжительность воздействия СВЧ волн для руды данного типа и размера кусков, подлежащих измельчению (Способ измельчения руд и минералов / Патент на изобретение КР № 1503.2012).

3. Аналитическая зависимость удельной теплоемкости горных пород от продолжительности воздействия СВЧ волн, которая позволяет определить температуру горной породы, при которой происходит максимальное разупрочнение.

4. Эмпирическая формула для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при тепловом воздействии СВЧ волнами с последующим охлаждением в воздухе.

5. Расчетная зависимость, которая позволяет описывать изменения удельной энергоемкости измельчения горных пород (по сравнению измельчения исходного состояния) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

6. Методика определения оптимального времени воздействия СВЧ волн, соответствующего минимуму энергоемкости измельчения, которое для большинства руд составляет 3-5 минут, а также характерной температуры воздействия для данного типа руды, при которой реализуется эффективное измельчение.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа является результатом исследований, проведенных автором в 2001-2015 годах. Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследований, выполнении теоретических и экспериментальных исследований механических свойств горных пород и руд и их структурного состояния для различных масштабных уровней,

развитии структурно-механической модели неоднородной твердой среды, метода оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- взаимным соответствием результатов экспериментального определения структурных параметров руды при физических воздействиях полей с теоретическими расчетами;
- соответствием результатов модельных исследований с экспериментальными данными, в том числе с данными других исследователей.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы докладывались на: Международной научной конференции «Современные технологии и управления качеством в образовании, науке и производстве: опыт адаптации и внедрения» (г. Бишкек, 2001г.); Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Алматы, 2005г.); Международной научной конференции «Физика и физическое образование: достижение и перспективы развития» (Бишкек, 2006г.); Международной научно-технической конференции «Инновации в образовании, науке и технике» (г. Бишкек, 2006г.); Между-народной научной конференции «Проблемы прикладной механики». (Санкт-Петербург, 2007г.); Международной научной конференции “Актуальные проблемы механики и машиностроения” (Алматы, 2009 г.); Международной конференции «Информационные технологии и математическое моделирование в науке» (Бишкек, 2011 г.); Республиканской конференции «Актуальные проблемы современной физики и технологии обучения» (Бишкек, 2012 г.); Международной конференции, посвященной памяти академика М.Я.Леонова, «Современные проблемы механики сплошной среды» (Бишкек, 2012 г.); Международной конференции «Проблемы прикладной механики» (Санкт-Петербург, 2013 г.); 4-Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Алматы, 2014 г.); XXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2015» (Москва, 2015г.).

Полнота отражения результатов исследований в публикациях. Результаты исследований, отражающие основное содержание диссертационной работы, опубликованы в 34 печатных работах, в том числе 1 монографии и получен 1 патент.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, изложенных на 192 страницах, содержит 30 рисунков, 21 таблиц, и список литературы из 86 наименований.

Автор выражает искреннюю признательность научному консультанту, д.т.н., Заслуженному деятелю науки и техники КР, профессору Тажибаеву К.Т., за внимание, советы и консультации, практическую помощь, а также Конушбаевой А.Т. за участие и содействие в проведении экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, определены цель и задачи, научная новизна, практическая и экономическая значимость полученных результатов, а также основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ современного состояния проблемы целенаправленного изменения свойств руд и минералов при их подготовке к обогащению. При переработке минерального сырья, с целью извлечения металлов и полезных компонентов, в технологические процессы дробления и измельчения вовлекаются большой объем трудноизмельчаемых руд и минералов. Использование для этих руд традиционных способов измельчения приводит к росту энергозатрат, интенсивному износу металлических частей мельниц, к значительным потерям извлекаемых металлов. В большинстве случаев потери полезных минералов и нарушения экологии вызываются несоответствием возможностей используемых технологических решений и технических средств многообразию физико-технических параметров вовлекаемых в переработку руд. В связи с этим необходимость разработки способов воздействия на горные породы, изменяющих их прочность в сторону уменьшения, улучшающих раскрываемость минеральных зерен, а также необходимость применения экологически чистых технологий извлечения полезных компонентов и металлов, в настоящее время стала стимулом новых исследований влияния физических полей на механические свойства горных пород.

Под управлением механических свойств минералов и руд следует понимать целенаправленное изменение их прочностных и деформационных свойств путем воздействия различных физических полей. Целенаправленная подготовка и управление качеством руд, проводимые комплексно, с учетом строения массива и его геомеханического состояния, раскрываемости минеральных зерен при их измельчении, управление механическими свойствами горных пород имеет решающее значение в эффективном освоении месторождений руд цветных и благородных металлов за счет повышения качества и увеличения извлечения конечной продукции.

Перспективы использования целенаправленного изменения механических свойств пород в технологии извлечения металлов из руд определяются пониманием сущности закономерностей и механизмов процессов преобразования структурного состояния полиминерального агрегата, инициируемых внешним воздействием. Знание этих закономерностей позволяет выбрать рациональный вид и режим физической обработки минерального сырья, обеспечивающий экономическую выгоду, эффективность и экологическую чистоту производства. Традиционное рассмотрение физических процессов, происходящих в горных породах, как в однородных средах не раскрывает механизма изменения свойств при внешнем воздействии. Только новые подходы, учитывающие гетерогенность горных пород и понимание механизма и причин структурных преобразований минералов и руд, происходящих при воздействии на них физических полей,

позволяют, в конечном счете, обеспечить существенное уменьшение энергоемкости высокочрезвычайно затратного процесса измельчения, увеличение выхода извлекаемого металла за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен. Большой вклад в использовании нетрадиционных видов и режимов воздействия на горные породы в практике горного производства внесли труды С.Д. Викторова, Л.А. Галяса, С.А. Гончарова, Л.С. Дербенева, А.П. Дмитриева, Э.И. Ефремова, В.И. Кармазина, Б.Н. Кутузова, Ю.М. Мисника, А.Н. Москалева, П.Н. Образцова, С.А. Полуянского, В.Н. Потураева, Ю.И. Протасова, Н.Я. Репина, В.В. Ржевского, М.П. Тонконогова, А.В. Чантурии, В.С. Ямщикова и других исследователей. Систематические исследования поведения горных пород при действии различных физических полей стали проводиться с начала 60-х годов, с формированием физики горных пород как самостоятельного раздела горной науки. Физика горных пород и процессов создавалась академиком В.В. Ржевским и его учениками как наука о физических свойствах минералов и горных пород, процессах, происходящих в них при воздействии внешних полей, и методах их применения в горном деле. Большой вклад в эту область исследований обеспечили труды Е.И. Баяк, М.П. Воларовича, А.Г. Дорфмана, В.Н. Кобрановой, Т.С. Лебедева, М.Ш. Магид, А.Л. Мамедова, Г.Я. Новика, Э.М. Пархоменко, М.М. Протождьяконова, А.Н. Ставрогина, И.С. Томашевской, Т.Л. Челидзе, В.С. Ямщикова, С. Кларка, Ф. Эгерера, П.Ф. Бриджмена, Н.Христиансена, В.И. Курдюмова, П.А. Минаева, В.М. Севергина, П.М. Цимбаревича, Г.Н. Кузнецова, Н.А. Цитовича, Л.И. Барона, М.М. Протождьяконова (младший), П.А. Ребиндера, К.В. Руппенейта, Я.А. Шрейнера, А.И. Барона и др.

В области исследования остаточных напряжений на разных масштабных уровнях внесли большой вклад: Давиденков Н.Н., Биргер И.А., Влох Н.П., Айтматов И.Т., Зильбершмидт М.Г., Тажибаев К.Т., Фридман М., Сашурин А.Д., Заворыкина Т.К. Развитие исследований напряженного состояния горноскладчатых областей получило в трудах Айтматова И.Т., Мамбетова Ш.А., Кожогулова К. Ч., Тажибаева К.Т., Жумабаева Б.Ж., Ялымова Н.Г., Рогожникова О.В., Артыкбаевой З.К., Чунуева И. К. Исследованию остаточных напряжений в технических материалах и горных породах посвящены работы Казакбаевой Г.О., Ташмаматова А.С. и др.

Изыскание эффективных способов разрушения крепких горных пород на основе достижений технической физики, электротехники и электроники позволило создать электрофизические способы разрушения. Эти способы основаны на поглощении подводимой к породе электрической энергии и последующих ее преобразованиях, в результате которых происходит разрушение породы или снижение ее крепости. Зарождение и развитие электрофизических способов разрушения горных пород связано с работами Г.И. Бабата, А.В. Варзина, А.В. Нетушила, В.С. Кравченко, А.П. Образцова, В.М. Семенова, В.М. Веремьева, В.В. Устинова, В.Д. Ицхакина, Ю.Н. Захарова, Л.М. Блинова, Н.В. Перова, Г.В. Лукьянова, А.С. Сироты, А.В. Долголаптева, Е.Ф. Элштейна, Э.И. Арша, Г.К. Виторта, В.В. Ржевского, А.П. Дмитриева, Ю.И. Протасова.

Во второй главе представлены результаты исследований прочностных и деформационных свойств горных пород при воздействии физических полей в зависимости от температуры. В зависимости от особенностей минералогического состава и структурных связей в породах, изменение прочностных свойств при нагреве происходит по различным законам. При этом характер температурных зависимостей для различных прочностных показателей (пределы прочности на сжатие и растяжение, твердость и др.), полученных для одной породы, как правило, совпадают. Изучение влияния высоких температур на прочностные показатели позволяет разделить все горные породы по характеру температурных зависимостей на группы: породы, в которых с увеличением температуры прочностные показатели возрастают до некоторого максимума, а затем снижаются; породы, в которых с увеличением температуры прочностные показатели сразу снижаются или до определенных температур изменяются мало, а затем уменьшаются. При этом следует заметить, что в породах первой группы в начальный период (до температуры 100-160⁰ С) обычно также наблюдается некоторое снижение прочностных показателей.

Прочность предварительно нагретых горных пород более интенсивно снижается под действием резкого охлаждения водой. При этом развивается микротрещиноватость вследствие быстрого охлаждения и, кроме этого, происходит дополнительное разрушение из-за смачивания и адсорбции. Эксперименты показывают, что при резком охлаждении предварительно нагретых до температуры 600⁰С пород водой, прочностные показатели их снижаются до двух раз.

При изменении температуры неоднородных твердых тел, какими являются горные породы, на границах минеральных зерен возникают локальные термические напряжения (структурные термические напряжения) из-за неодинакового значения коэффициентов теплового расширения и модуля упругости различных минералов. При достижении этими напряжениями предельных значений происходит разрыв междузеренных связей, что приводит к дискретному тепловому расширению горных пород. Структурные термические напряжения, возникающие на границах минеральных зерен, можно оценить, учитывая коэффициенты линейного теплового расширения двух контактирующих минеральных зерен, у одного из которых эта характеристика больше, а другого меньше. Естественно предположить, что микроразрывы междузеренных связей происходят не одновременно на всех контактах минеральных зерен горной породы. При некоторой температуре микроразрыв произойдет там, где связь минеральных зерен наиболее слабая, а структурные термические напряжения наибольшие. При дальнейшем изменении температуры происходят микроразрывы на других границах минеральных зерен. Разрыв междузеренных связей структурными термическими напряжениями - необратимый процесс, и поэтому многократный нагрев и охлаждение неоднородных по минеральному составу горных пород могут привести к существенному их разупрочнению. Это хорошо подтверждается экспериментально. Коэффициент объемного

теплового расширения неоднородных горных пород обусловлен микро-разрывами на границах смежных минеральных зерен. Одновременно с дискретным тепловым расширением неоднородной горной породы каждое отдельное минеральное зерно будет расширяться монотонно.

В этой главе приводится выбор и обоснование СВЧ воздействия, как эффективного способа разупрочнения крепких руд и минералов. В процессе рудоподготовки механическое измельчение руды до размера частиц порядка десятков микрометров, необходимое для дальнейшей флотации, является наиболее энергоемким и дорогостоящим процессом в технологической цепи извлечения полезных компонентов, требующим $25 \div 40$ кВт·ч электроэнергии на тонну переработанной руды. При этом КПД процесса механического измельчения составляет всего $5 \div 10$ %, остальная часть энергии переходит в тепло, рассеивается в виде диссипативных потерь. При мировом объеме переработки руды 41 млрд. т. в год (в РФ около 4 млрд. т.) на измельчение затрачивается порядка 2 млрд. \$ (в РФ – 6 млрд. рублей). Этим объясняется большой интерес к разработкам новых методов разрушения или разупрочнения рудных материалов, новых энерго- и ресурсосберегающих технологий измельчения руд. Поэтому, для уменьшения энергоемкости разрушения крепких руд предлагаются способы разупрочнения руд с помощью воздействия более эффективных и универсальных в этом смысле физических полей, например тепловых полей (термическая обработка) и СВЧ облучение и т.д.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования структурного состояния и механизма изменения свойств горных пород, рентгенографического определения структурных параметров и напряжений. При этом для количественной характеристики структурного состояния горной породы (минерала) необходимо использовать специальные параметры. Если горную породу условно разбить на традиционные структурные составляющие: минеральные агрегаты и минеральные зерна, то для характеристики их напряженного состояния следует использовать следующие величины: 1) макронапряжения - средние напряжения в представительном объеме горной породы; 2) текстурные напряжения - средние напряжения в минеральном агрегате породы; 3) структурные напряжения - средние напряжения в зернах минерального агрегата. Еще имеются локальные напряжения от дефектов атомной структуры. Параметры структурного состояния первого рода характеризуют состояние представительных образцов, размеры которых велики по сравнению с размерами элементов структуры (зерен), а свойства определяют поведение горной породы в целом. Параметры второго рода относятся к таким структурным элементам, как мономинеральные агрегаты в породе (слои, включения и т.п.), отдельные минеральные зерна. Параметры третьего рода описывают состояние объемов, размеры которых малы по сравнению с размерами составляющих микроструктуры. К ним относятся блоки мозаики, участки межзеренных границ, включений и т.д. Для изучения природы физических процессов, протекающих в горной породе, подвергающейся

воздействию внешних полей, определения деформаций и напряжений на разных структурных уровнях применяется рентгенографический метод.

Рентгенографическое определение микродеформации основано на следующем подходе. Небольшие изменения углов рентгеновских отражений позволяют получать существенную информацию о средней величине структурных напряжений и микронапряжениях в горной породе. Метод основывается на том, что относительное изменение межплоскостного расстояния Δd семейства атомных плоскостей в минеральном зерне при его изменении определяется соотношением:

$$\Delta d/d = \sigma/E$$

где σ - величина приложенного напряжения, МПа; E - модуль упругости, МПа; d - межплоскостное расстояние.

С учетом поперечной деформации

$$\Delta d_2/d_2 = -\mu(\Delta d_1/d_1) = -\mu(\sigma/E)$$

где μ - коэффициент Пуассона породы.

Если на образец, после внешнего воздействия, перпендикулярно направить пучок монохроматических рентгеновских лучей, то, анализируя дифракционные пики под большими углами, можно определить изменение межплоскостного расстояния на величину Δd , который вызывает сдвиг брэгговского отражения на величину угла $\Delta\theta$ в соответствии с уравнением:

$$\Delta\theta = \Delta d/d \cdot \operatorname{tg}\theta$$

Подставляя полученное выше выражение $\Delta d/d$, имеем:

$$\Delta\theta = -\mu(\sigma/E) \cdot \operatorname{tg}\theta$$

Определяя смещение линий на рентгенограмме, обусловленное изменениями Δd , и рассчитав по этому смещению изменение угла $\Delta\theta$, напряжение σ вычисляют по формуле:

$$\sigma = -E\Delta\theta/\mu\operatorname{tg}\theta$$

Наблюдаемое в случае остаточных напряжений изменение положения дифракционного пика, выражаемое через величину $\Delta\theta$, связано с относительной деформацией следующим образом:

$$\Delta d/d = -\operatorname{ctg}\theta \Delta\theta/2,$$

отсюда

$$\sigma = E/\mu \cdot \operatorname{ctg}\theta \Delta\theta.$$

Для оценки изменения параметров структуры и остаточных напряжений от воздействия теплового поля, нами исследовались несколько разновидностей горных пород. Для изучения изменений параметров структурного состояния исследованию подверглись образцы, представляющие исходные (генетические) состояния и образцы после термической обработки. Исследования проводились с использованием рентгеновского дифрактометра типа ДРОН-2. Применяя, специальные гониометрические приставки к дифрактометру ДРОН-2 исследовались структурные изменения, имеющие место в горных породах при воздействии теплового поля. Гониометры могут

быть снабжены приставками для вращения или колебания крупнозернистых образцов и исследования горных пород в особых условиях. Максимальная напряженность электростатического поля 10 кВ/см. При последовательном перемещении детектора, регистрирующего рассеянное излучение, на движущейся диаграммной ленте рисуется дифракционная картина.

На основе анализа положения и формы профилей рентгеновских линий основанный на регистрации и расчета рентгеновских дифракционных картин рассеивания получены данные о среднем размере блока мозаики D , величине остаточной деформации кристаллической решетки ε , плотности дислокации на границе блока мозаики ρ_{ε} , средней плотности дислокации ρ_{cp} , напряжения внутри зерна $\sigma_{в.з.}$, напряжения на границе зерна $\sigma_{г.з.}$, вероятности дефектов упаковки α и двойниковых дефектов γ , расстояния между дислокациями на границе блока r_D , расстояния между дислокациями внутри блока r_{ε} . Результаты измерения этих параметров приведены в табл.1.

В четвертой главе дается обоснование принципов целенаправленного изменения свойств руд и минералов. Как известно, для решения определенных технических задач могут быть искусственно созданы материалы с заданными свойствами. В частности, строительные или композитные материалы могут быть созданы с заданной (нужной) прочностью, теплопроводностью и т.д. При необходимости также можно изменить свойства природных твердых сред. Решать такую проблему не менее трудно, чем создавать материалы с заданными свойствами. Для решения этой проблемы требуется, в первую очередь, обоснование принципов управления свойствами.

В нашем случае под управлением механическими свойствами горных пород и минералов понимается целенаправленное изменение их прочностных и деформационных свойств путем предварительного физического воздействия. Изменение свойств горных пород требуется для решения разного рода горнотехнических задач. Например, для повышения эффективности измельчения горных пород и руд, при извлечении из них полезных металлов или минералов требуется их разупрочнение, а для обеспечения устойчивости подземных горных выработок в некоторых трещиноватых, обводненных породах необходимо их искусственно упрочнять. В зависимости от решаемых задач осуществляется целенаправленное изменение механических свойств горных пород теми или иными методами. Как правило, руды цветных, благородных металлов трудно измельчаемы и применение для таких руд, традиционных способов подготовки сырья, приведет к удорожанию процесса измельчения. В связи с этим решение проблемы управления механическими свойствами руд и минералов приобретает большое прикладное значение. В общем случае изменение параметров, количественно описывающих свойства породы, происходит немонотонно; различные виды воздействия вызывают изменения, отличающиеся по своему характеру.

Таблица 1. - Параметры структуры и остаточных напряжений минералов горных пород

Название и место отбора породы	Название минерала	Состояние и номер образца	$D, \text{Å}$	$\rho_D \cdot 10^{-1}$	$r_D, \text{Å}$	$r_c, \text{Å}$	$\varepsilon, 10^{-5}, \text{с.о.д.}$	$\rho_\varepsilon \cdot 10^1$	$\rho_{cp} \cdot 10$	$\alpha \cdot 10^4$	$\gamma \cdot 10^5$	$\sigma_{в.з} \cdot 1$	$\sigma_{г.з} \cdot 1$
Гранит Кыртабылга	кварц	Исходный, 10 после термической обработки, 7	254	47			-880	1,23	0,76	0,27	0,51	40	1,64
			398	19			-360	0,18	0,18	0,16	0,074	10,3	0,61
Мрамор Новороссийск	кальцит	исходный, 12 после терм. обраб., 7	566	9,4			920	1,75	0,13	20	30	11	0,80
			324	29			-820	1,71	0,22	20	30	4,8	0,26
Песчаник Рогун	кальцит	исходный, 2 после терм. обработки, 4	784	5,0			890	0,15	0,0085	20	30	1,4	6,46
			239	52,0			-130	0,47	0,5	20	29	8,6	1,95
	кварц	исходный, 2 после терм. обработки, 4	651	7,1			-68	0,0057	0,002	0,028	0,033	0,61	5,5
			594	8,5			-140	0,0235	0,0045	0,083	0,094	2,2	1,9
	кварц	исходный, 2 ¹ после терм. обработки, 1	385	20,2	223	78	-397						
			376	21,2	217	76	-342						
			535	10,5	309	73	411						
Кварц Вост.Коунрад	кварц	исходный, 2	458	14,3	264	150	-293						
			511	11,5	295	320	-148						
Гранит Вост.Коунрад	кварц	исходный, 2	554	9,8	320	171	-199						
			688	6,3	397	116	-3л02						

Изменения свойств, вызванные действием физических полей на горные породы склонны к изменению (релаксации) во времени и зависят не только от интенсивности, но и от длительности, цикличности и других параметров, характеризующих режимы физической обработки. С другой стороны, гетерогенность, многокомпонентность, анизотропия свойств, слагающих минералов, генетическая нарушенность, наличие текстуры представляют далеко неполный перечень особенностей горной породы. Генерируемые напряжения переводят отдельные структурные элементы породы в неустойчивое состояние, следствием которого является изменение дефектной структуры.

Физическое воздействие способно сконцентрировать избыточную энергию в каком-либо компоненте породы, а затем высвободить за счет соответствующей структурной перестройки, следствием которой будет изменение нарушенности сплошности породы. В результате анализа закономерностей изменения свойств горных пород и породообразующих минералов сделан вывод об определяющем влиянии на механизм процесса изменения свойств исходного состояния и особенностей взаимодействия разномасштабных элементов строения.

Рассмотрение структурных уровней позволило сформулировать базовые положения целенаправленного изменения свойств горных пород:

- реакция горной породы на внешнее воздействие в общем случае является многостадийным процессом, инициируемым сначала на уровне кристаллической решетки и переходящим затем на другие уровни (минерального зерна, агрегата, элемента текстуры, представительного объема);

- реакция горной породы на внешнее воздействие является детерминированным процессом, определяемым ее составом, строением, исходным структурным состоянием и свойствами элементов строения, а также видом действующего поля и режимом воздействия.

Главная идея управления механическими свойствами руд и минералов заключается в целенаправленном изменении свойств путем изменения дефектности и остаточных напряжений на разных структурных уровнях. В связи с этим возникает необходимость определения и исследования параметров структуры и остаточных напряжений, а также их изменения на разных масштабных уровнях и структурных элементах в зависимости от видов и режимов физического воздействия. Только при наличии достаточно глубоких знаний процессов проявления остаточных напряжений на разных масштабных уровнях (на границах и внутри зерен, в пределах кристаллической решетки) и детальнейших сведений о дефектах и параметрах структуры горных пород и минералов можно добиться целенаправленного изменения состояния горной породы.

В гетерогенных твердых материалах, как горные породы, остаточные напряжения неоднородны, и поэтому в них наблюдается сложная картина напряженного состояния. Для анализа структурных напряжений, имеющих

место на разных масштабных уровнях, совместно с К.Т. Тажибаевым, разработана структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды (рис.1).

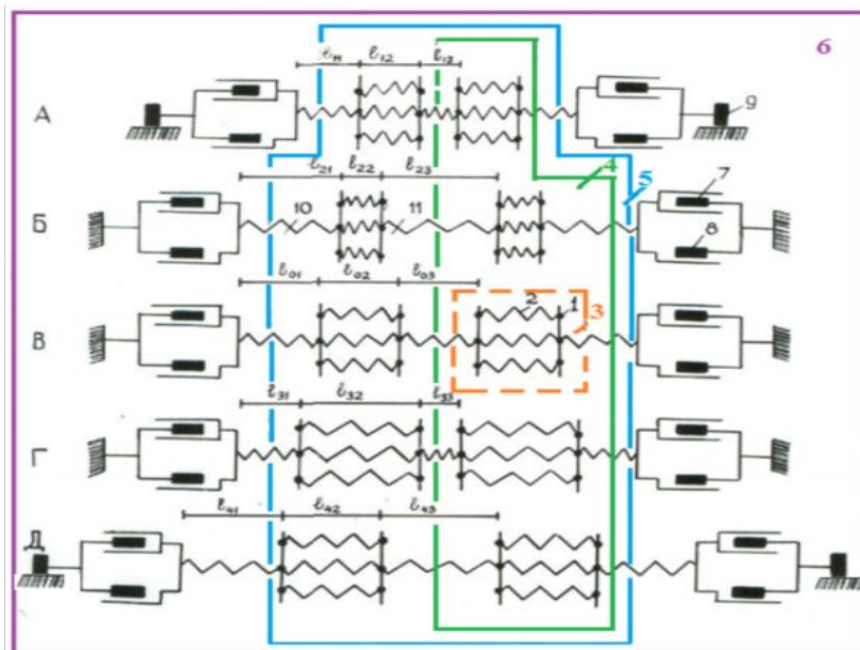


Рис.1. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала: 1-атом; 2-межатомный упругий элемент; 3-ячейка кристаллической решетки; 4-кристаллическая отдельность (блок мозаики); 5-зерно; 6-блок 2-го уровня; 7-вязкий элемент; 8-пластический элемент; 9-неустойчивый элемент (неуравновешенные частицы поверхности раздела фаз); 10-упругий элемент границы зерна; 11-упругий элемент границы кристаллической отдельности (блок 1-го уровня); **А**-сжатая цепочка частиц неустойчивого равновесия 2-го порядка; **Б**-неоднородно-деформированная цепочка частиц неустойчивого равновесия 1-го порядка; **В**- цепочка частиц (нейтральная) устойчивого равновесия; **Г**-неоднородно деформированная цепочка частиц неустойчивого равновесия 1-го порядка; **Д** - растянутая цепочка частиц неустойчивого равновесия 2-го порядка; l_{01}, l_{02}, l_{03} - параметры нейтральной цепочки частиц; $l_{11} \dots, l_{43}$ - параметры деформированных цепочек частиц.

Модель содержит в себе такие структурные элементы как атом, ячейка кристаллической решетки, кристаллическая отдельность (блок мозаики), зерно, блок-2 уровня, и состоит из пяти разных цепочек (**А**, **Б**, **В**, **Г**, **Д**) содержащих упругие, пластические, вязкие и неустойчивые элементы. Каждая цепочка отражает напряженно-деформированное состояние структурных элементов. Например, цепочка **В** отражает нейтральное (не напряженное) состояние и характеризуется равновесием. Цепочки **А** и **Д** весьма неустойчивы, равновесие таких цепочек обеспечивается только силами сцепления и трения частиц.

Цепочки типа **Б** и **Г** также неустойчивы, в них напряжения на разных структурных элементах могут быть разного знака. Для проверки правомерности предложенной модели было проведено сравнение экспериментально измеренных структурных напряжений с изменениями этих напряжений в модели для минералов шести разновидностей горных пород. Сравнения изменений остаточных напряжений на разных структурных уровнях, до и после термической обработки, определяемые рентгенографическим методом, показали соответствие изменений напряжений в модели.

Проверка правомерности структурно-механической модели была проведена также и по экспериментальным данным Т.К.Заворыкиной. В частности, при воздействии электромагнитным СВЧ полем продолжительностью 50, 180, 600 с. напряжения, по сравнению с исходным состоянием, на кристаллической решетке магнетита изменяется как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, чему соответствует изменения напряжений на границе и внутри зерна. Все эти взаимосогласованные изменения, установленные экспериментально, хорошо описываются структурно-механической моделью. Например, исходное состояние (установленное экспериментально Т.К. Заворыкиной) гематита в модели соответствует цепочке **Б** (см.рис.1), где переход сжимающих остаточных напряжений в кристаллической решетке приведет к уменьшению растягивающих остаточных напряжений на границе кристаллической отдельности (блока мозаики) и на границе зерна. При переходе сжимающих остаточных напряжений кристаллической решетки гематита в растягивающее напряжение от СВЧ облучения (в течение 600с.), растягивающие остаточные напряжения на границе кристаллической отдельности и на границе зерна уменьшились, то есть имеется соответствие фактических экспериментальных изменений с изменениями в модели. Изменение сжимающего напряжения кристаллической решетки магнетита от СВЧ-облучения в течение 180с и уменьшение при этом растягивающих напряжений на границах кристаллической отдельности и зерна также соответствует согласованным изменениям напряжений в структурных элементах модели. Имеются соответствия возможных изменений разномасштабных остаточных напряжений структурно-механической модели с изменениями соответствующих напряжений и по нашим экспериментальным данным (см. табл.1).

Из анализа представленной модели вытекают следующие положения:

1. Остаточные напряжения 1-го, 2-го и 3-го рода изменяются в соответствии с их знаками взаимосогласованно: в одном направлении напряженных (всюду сжатых – отрицательные знаки, или всюду растянутых – положительные знаки) структурных элементах разного масштабного уровня (цепочки **А** и **Д**), увеличение напряжения 3-го рода приводит к уменьшению напряжений 1-го и 2-го рода, а уменьшение напряжений 3-го рода к увеличению напряжений 1-го и 2-го рода.

2. В разнонаправленных напряженных структурных элементах (цепочки **Б** и **Г**), увеличение напряжения 3-го рода приводит к увеличению напряжений 1-го и 2-го рода, а уменьшение напряжения 3-го рода до смены знака и к уменьшению напряжений 1-го и 2-го рода.

3. В разнонаправленных напряженных структурных элементах (цепочки **Б** и **Г**), уменьшение напряжения 3-го рода и смена знака приводит к уменьшению абсолютной величины напряжений 1-го и 2-го рода и смене их знака.

4. В не напряженных структурных элементах (цепочка **В**), формирование сжимающих напряжений 3-го рода приводит к формированию растягивающих напряжений 1-го и 2-го рода, формирование растягивающих напряжений 3-го рода - к формированию сжимающих напряжений 1-го и 2-го рода.

Аналитические зависимости структурно - механической модели напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала для направлений X,Y,Z представлены следующими формулами: для цепочки **А**

по направлению **X** $\varepsilon_{XA} = -\varepsilon_{1AX} - \varepsilon_{2AX} - \varepsilon_{3AX}$ или

$$\varepsilon_{XA} = -\frac{\sigma_{1AX}}{E_{1X}} - \frac{\sigma_{2AX}}{E_{2X}} - \frac{\sigma_{3AX}}{E_{3X}} \quad (1)$$

для цепочки **Б** по направлению **X** $\varepsilon_{XB} = \varepsilon_{1BX} + \varepsilon_{2BX} - \varepsilon_{3BX}$ или

$$\varepsilon_{XB} = \frac{\sigma_{1BX}}{E_{1X}} + \frac{\sigma_{2BX}}{E_{2X}} - \frac{\sigma_{3BX}}{E_{3X}} \quad (2)$$

Для цепочки **В** по направлению **X** $\varepsilon_{XB} = 0$

Для цепочки **Г** по направлению **X** $\varepsilon_{XG} = -\varepsilon_{1GX} - \varepsilon_{2GX} + \varepsilon_{3GX}$ или

$$\varepsilon_{XG} = -\frac{\sigma_{1GX}}{E_{1X}} - \frac{\sigma_{2GX}}{E_{2X}} + \frac{\sigma_{3GX}}{E_{3X}} \quad (3)$$

Для цепочки **Д** по направлению **X** $\varepsilon_{XD} = \varepsilon_{1DX} + \varepsilon_{2DX} + \varepsilon_{3DX}$ или

$$\varepsilon_{XD} = \frac{\sigma_{1DX}}{E_{1X}} + \frac{\sigma_{2DX}}{E_{2X}} + \frac{\sigma_{3DX}}{E_{3X}} \quad (4)$$

где $\varepsilon_{1AX}, \varepsilon_{2AX}, \varepsilon_{3AX}, \varepsilon_{1BX}, \varepsilon_{2BX}, \varepsilon_{3BX}, \varepsilon_{1GX}, \varepsilon_{2GX}, \varepsilon_{3GX}, \varepsilon_{1DX}, \varepsilon_{2DX}, \varepsilon_{3DX}$ - относительные деформации (от остаточных напряжений) 1-го, 2-го, 3-го рода соответственно цепочек **А, Б, Г, Д** по направлению X;

$\varepsilon_{XA}, \varepsilon_{XB}, \varepsilon_{XB}, \varepsilon_{XG}, \varepsilon_{XD}$ - результирующие относительные деформации для цепочек **А, Б, В, Г, Д** по направлению X;

$\sigma_{1AX}, \sigma_{2AX}, \sigma_{3AX}, \sigma_{1BX}, \sigma_{2BX}, \sigma_{3BX}, \sigma_{1GX}, \sigma_{2GX}, \sigma_{3GX}, \sigma_{1DX}, \sigma_{2DX},$

σ_{3DX} - остаточные напряжения 1-го, 2-го, 3-го рода соответственно цепочек **А, Б, Г, Д** по направлению X;

E_{1X} , E_{2X} , E_{3X} - модули упругости 1-го, 2-го, 3-го рода соответственно по направлению X;

Для направлений Y и Z соответственно получаем:

$$\varepsilon_{YA} = -\frac{\sigma_{1AY}}{E_{1Y}} - \frac{\sigma_{2AY}}{E_{2Y}} - \frac{\sigma_{3AY}}{E_{3Y}} \quad \varepsilon_{YB} = \frac{\sigma_{1BY}}{E_{1Y}} + \frac{\sigma_{2BY}}{E_{2Y}} - \frac{\sigma_{3BY}}{E_{3Y}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{YB} = 0$$

$$\varepsilon_{YГ} = -\frac{\sigma_{1ГY}}{E_{1Y}} - \frac{\sigma_{2ГY}}{E_{2Y}} + \frac{\sigma_{3ГY}}{E_{3Y}} \quad \varepsilon_{YД} = \frac{\sigma_{1ДY}}{E_{1Y}} + \frac{\sigma_{2ДY}}{E_{2Y}} + \frac{\sigma_{3ДY}}{E_{3Y}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ZA} = -\frac{\sigma_{1AZ}}{E_{1Z}} - \frac{\sigma_{2AZ}}{E_{2Z}} - \frac{\sigma_{3AZ}}{E_{3Z}} \quad \varepsilon_{ZB} = \frac{\sigma_{1BZ}}{E_{1Z}} + \frac{\sigma_{2BZ}}{E_{2Z}} - \frac{\sigma_{3BZ}}{E_{3Z}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ZB} = 0$$

$$\varepsilon_{ZГ} = -\frac{\sigma_{1ГZ}}{E_{1Z}} - \frac{\sigma_{2ГZ}}{E_{2Z}} + \frac{\sigma_{3ГZ}}{E_{3Z}} \quad \varepsilon_{ZД} = \frac{\sigma_{1ДZ}}{E_{1Z}} + \frac{\sigma_{2ДZ}}{E_{2Z}} + \frac{\sigma_{3ДZ}}{E_{3Z}} \quad (8)$$

Для изотропных материалов

$$E_{1X} = E_{1Y} = E_{1Z}; \quad E_{2X} = E_{2Y} = E_{2Z}; \quad E_{3X} = E_{3Y} = E_{3Z}.$$

Проводилась качественная и количественная проверка сопоставимости экспериментальных данных напряжений 1-го, 2-го, 3-го рода, полученных рентгенографическим методом с данными предложенных расчетных формул структурно - механической модели напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала (формулы 1-8). Полученные экспериментальные данные по изменению остаточных напряжений хорошо согласуются и описываются данной моделью. Например (см.табл.1), для исходного состояния кварца гранита (Кыртабылга) остаточное напряжение 3-го рода сжимающее (отрицательное), а остаточное напряжение 1-го и 2-го рода растягивающее (положительное). Такое состояние соответствует в модели цепочке **Б** и описывается формулой (2). Согласно модели и формуле, для указанного состояния, снижение сжимающих остаточных напряжений 3-го рода приводит к снижению растягивающих остаточных напряжений 1-го и 2-го рода. Экспериментально это полностью подтверждается данными рентгеноструктурного анализа (см.табл.1).

Для кальцита Новороссийского мрамора согласно модели исходное состояние соответствует цепочке **Д**, т.е. цепочке частиц неустойчивого равновесия, где изменения начинаются вблизи свободной поверхности, при этом уменьшение растягивающих напряжений 1-го рода вблизи поверхности влечет за собой уменьшение напряжений 2-го рода и это может привести к переходу растягивающих напряжений 3-го рода к сжимающему напряжению (к смене знака). Результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений в кальците указанного мрамора подтвердили такие взаимосогласованные изменения напряжений 1-го, 2-го и 3-го рода

(см.табл.1). При наличии в исходном состоянии сжимающих остаточных напряжений на всех рассматриваемых структурных уровнях, т.е. когда остаточные напряжения всех родов, все сжимающие, согласно модели (цепочка А) и формуле (1), уменьшение сжимающих остаточных напряжений 3-го рода приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений 1-го и 2-го рода.

Важно показать также и количественное соответствие экспериментальных данных с результатами, получаемыми на основе расчетной формулы. Для этого необходимо иметь данные о величине модуля упругости 2-го и 3-го порядка, а модуль упругости 1-го порядка обычно легко определяется экспериментально. Подобно тому, как теоретическая прочность всегда превышает «реальную» (измеренную на практике) прочность, из-за ошибки определения площади истинного эффективного сечения, передающего нагрузку по границам зерен и кристаллических отдельностей как сплошная конструкция, модуль упругости 3-го рода в несколько раз превышает модуль упругости 2-го и 1-го рода, так как данный показатель зависит от плотности. Следует отметить, что остаточное напряжение 3-го рода значительно превышает остаточное напряжение 1-го рода. На этой основе для кварца $E_1 < E_2 < E_3$, предположительно принимаем $E_3 = 25E_1$; $E_2 = 5E_1$. Для кварца гранита (Кыртабылга) экспериментально установленная величина $E_1 = 0.75 \cdot 10^5$ МПа. По формуле (1) определяем остаточные напряжения 1-го рода и сравним расчетное значение со значением, установленным экспериментально на основе рентгеноструктурного анализа. Подставляя значения модулей упругости и напряжений 2-го и 3-го рода для кварца термообработанного гранита (Кыртабылга) из табл.1 в формулу (1) получим значение остаточного напряжения 1-го рода $\sigma_1 = 64,9$ МПа. Экспериментально установленное рентгенографическим методом значение остаточного напряжения 1-го рода для кварца гранита после термической обработки $\sigma_1 = 61$ МПа. Таким образом, можно отметить, что структурно-механическая модель, и соответствующие расчетные формулы позволяют анализировать остаточные напряжения на разных структурных и масштабных уровнях, проводить расчеты остаточных напряжений и, в конечном итоге, разработать способы по целенаправленному изменению механических свойств руд.

В пятой главе представлены результаты исследований влияния воздействия СВЧ волн на характеристики разрушения и дано научное обоснование по разработке эффективного способа снижения энергоемкости измельчения горных пород.

В настоящее время признано, что для эффективного разупрочнения и уменьшения энергоемкости измельчения, крепких руд наиболее перспективны способы, основанные на воздействии на них электромагнитным полем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.

Сущность предлагаемого нами способа измельчения руд заключается в определении оптимального значения продолжительности времени воздействия СВЧ волн, соответствующего минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды. Перед воздействием СВЧ волн определяется удельная энергоемкость измельчения для исходного состояния (не подвергнутых воздействию), затем - для разной длительности СВЧ воздействия.

Источником СВЧ волн служила микроволновая печь. В печи электричество преобразуется для генерации микроволновой энергии. Используемая микроволновая печь позволяла выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Нами использовался уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м³. Образцы руд навесками по 200–250 г и средними размерами 20-25 мм помещались вовнутрь печи и облучались СВЧ - импульсами. Продолжительность воздействия СВЧ волн составляла от 1 до 12 минут. В зависимости от руды и минерала исследуемые навески подвергались облучению СВЧ волнами по следующим продолжительностям: 1, 3, 5, 7, 9 и 12 минут. Для каждой продолжительности времени СВЧ воздействия определялась удельная энергоемкость измельчения руды или минерала и построены графики их зависимости.

Известно, что разупрочнение горных пород (руд) при воздействии на них СВЧ волнами связано, прежде всего, с их нагревом, так как энергия СВЧ поля поглощается породой и превращается в тепловую энергию. В зависимости от свойств породы при СВЧ облучении ее температура повышается на dT , при этом

$$dT = Pt/c\rho \quad (9)$$

где P – мощность СВЧ поля, поглощаемая единицей объема породы; t - время воздействие СВЧ поля; c - удельная теплоемкость породы; ρ – плотность породы.

Подставляя $dT = T_2 - T_1$ и $P=N/V$ в формулу (13) получим

$$T_2 - T_1 = Nt/c\rho V \quad (10)$$

где V - объем навески породы; T_1 - первоначальная температура, K ; T_2 - температура при исследуемой длительности нагрева в K ; N - мощность СВЧ установки.

В поле воздействия СВЧ волн электропроводящие и полупроводящие минералы значительно нагреваются тогда, как диэлектрические практически не нагреваются. Для нагрева диэлектриков можно использовать более высокие частоты, но этому препятствует уменьшение глубины проникновения СВЧ – поля. Поэтому максимальной разрешенной частотой, используемой в СВЧ - энергетике, является частота 2,45 ГГц. Для навески (пробы) диорита месторождения Токтозан, с размерами $(2 \times 2 \times 2,5) \text{ см}^3$; $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$; $V = (2 \times 2 \times 2,5) \text{ см}^3$; $n = 50$, где n – количество кусков с удельной теплоемкостью $c=0,65 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Определим температуру нагрева для разных продолжительностей времени воздействия СВЧ волн, например, для $t = 40\text{с}$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho Vn} = \frac{700 \cdot 40}{650 \cdot 2700 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 319\text{K},$$

отсюда, $T_2 = \Delta T + T_1 = 319 + 20 = 339\text{ K}$; или $T_2 = 339 - 273 = 66^\circ\text{C}$;

Известно, что при повышении температуры повышается и удельная теплоемкость горных пород. Считают, что при температуре от 273 до 773К (от 0 до 500⁰ С) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону. Для определения удельной теплоемкости горных пород для соответствующей температуры запишем

$$c_T = c_0 + c_0 T_K \quad (11)$$

где c_T – удельная теплоемкость для соответствующей температуры; c_0 – удельная теплоемкость исходного состояния (начальная, для комнатной температуры); T_K – коэффициент пропорциональности.

Чтобы определить переломную температуру, где происходит максимальное разупрочнение на основе экспериментальных исследований (совместно с Тажибаевым К.Т.) получена следующая зависимость удельной теплоемкости горных пород от продолжительности СВЧ воздействия.

$$c_T = c_0 + c_0 \frac{t_m R_m}{4} \quad (12)$$

где t_m – продолжительность СВЧ воздействия в минутах; R_m – коэффициент размерности (1/мин). Зависимость (12) справедлива для температур от 0 до 1000⁰ С, так как выше этой температуры в горных породах возможны процессы разложения. Определим теплоемкость данной руды для продолжительности времени воздействия СВЧ волн равной 1- минуте

$$c_T = c_0 \left(1 + \frac{t_m R_m}{4} \right) = 0,65 \left(1 + \frac{1}{4} \right) = 0,81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где $c_0 = 0,65 \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

С учетом теплоемкости для данного времени данной руды определяем температуру нагрева $\Delta T = 381\text{K}$; $T_2 = \Delta T + T_1 = 381 + 20 = 401\text{ K}$; или $T_2 = 401 - 273 = 128^\circ\text{C}$.

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн равной 2 минуте

$$c_T = 0,65 \left(1 + \frac{2}{4} \right) = 0,975 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

тогда $\Delta T = 636\text{K}$; $T_2 = \Delta T + T_1 = 636 + 20 = 656\text{ K}$; или $T_2 = 656 - 273 = 383^\circ\text{C}$.

В такой же последовательности определяются температуры и для других продолжительностей времени воздействия СВЧ волн и руд.

Результаты определения температур и удельной теплоемкости для четырех разновидностей руд и горных пород приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Результаты определения удельной теплоемкости и температуры горных пород для разной продолжительности СВЧ воздействия

Порода	Продолжительность действия СВЧ волн, минут	C_T , удельная теплоемкость для соответствующей температуры, кДж/(кг·К)	ΔT , К	T_2 , температура при исследуемой длительности СВЧ воздействия, °С
Диорит (Токтозан)	1	0,81	381	128
	2	0,975	636	383
	3	1,14	819	566
	5	1,462	1066	813
	7	1,788	1220	967
	9	2,11	1347	1074
	10	2,275	1368	1115
	12	2,6	1436	1183
Темносерый филлит (Кумтор)	1	0,99	284	31
	2	1,18	475	222
	3	1,38	609	356
	5	1,78	786	533
	6	1,975	851	598
	7	2,17	902	649
	9	2,57	979	726
	Кварц (Восточный Коунрад)	1	1,665	344
2		1,11	573	484
3		1,295	737	484
4		1,48	860	607
5		1,665	955	702
6		1,85	1032	779
7		2,035	1094	841
Известняк (Ак-Татыр)		1	0,968	331
	2	1,16	560	307
	3	1,356	708	455
	5	1,74	921	668
	7	2,13	1052	799
	9	2,519	1186	933

На рис.2 представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для диорита месторождения Токтозан. Как видно из графика, переломное время воздействия СВЧ волн – 3 минуты,

соответствующая температура 566°C , а далее температура растет не по линейной зависимости.

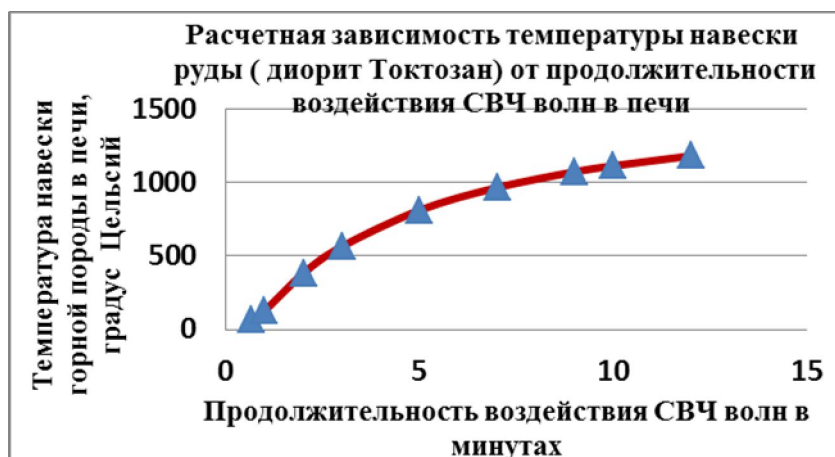


Рис.2. График изменения температуры навески руды (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

Данная температура может служить характеристической температурой, при которой реализуется эффективное измельчение данной горной породы. Ниже, на рис.3, приведена зависимость удельной энергоемкости измельчения диорита от времени воздействия, подтверждает переломность данной температуры, соответствующую 3-м минутам воздействия, при котором удельная энергоемкость измельчения минимальная.

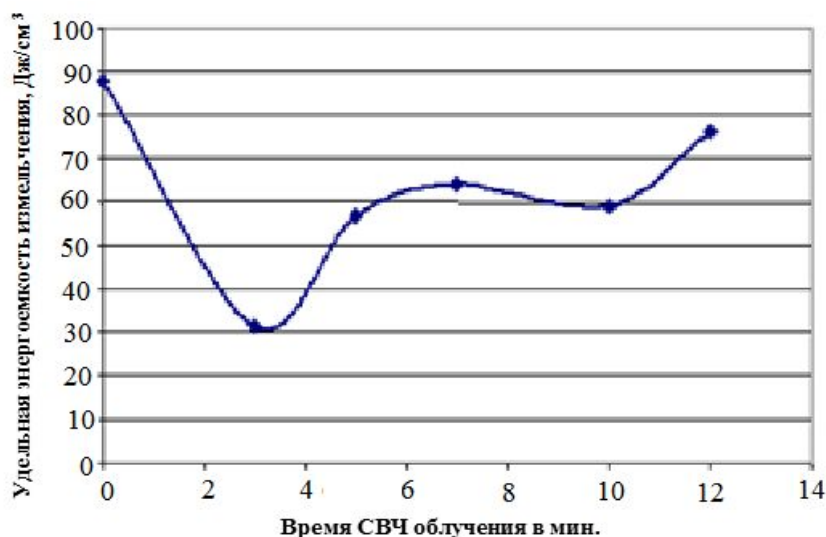


Рис. 3. График изменения удельной энергоемкости измельчения (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

Для другой породы, темно-серого филлита месторождения Кумтор, зависимость изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия приведена на рис. 4. В данном случае, температура 350°C

соответствует 3-х минутному СВЧ воздействию, и при этой продолжительности времени воздействия волн, удельная энергоемкость измельчения минимальная (рис. 5). Следовательно температура 350⁰С может служить характеристикой для темно-серого филлита месторождения Кумтор, так как при этой температуре, реализуется эффективное измельчение данной руды.

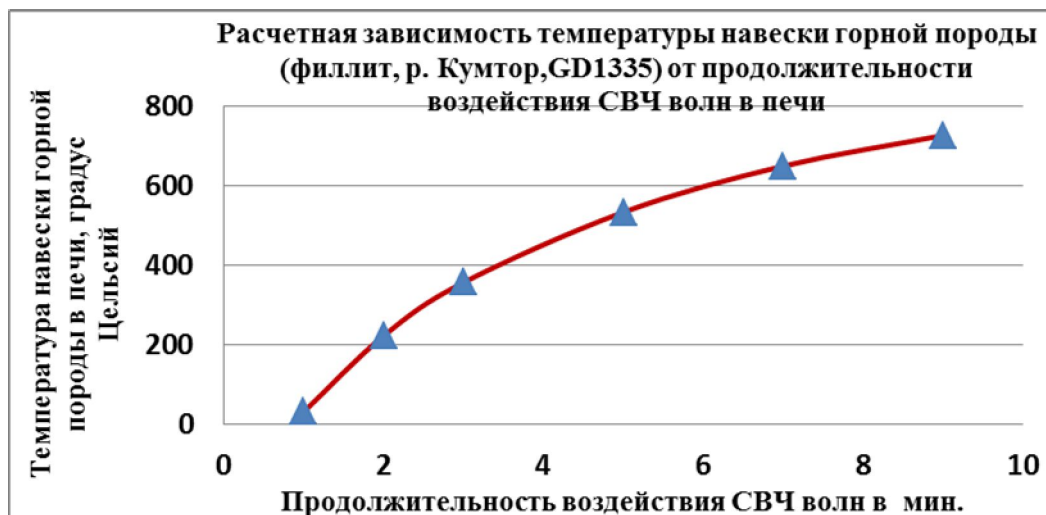


Рис. 4. График изменения температуры темно-серого филлита (Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ волн.



Рис.5. График изменения удельной энергоемкости измельчения темно-серого филлита (Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

Согласованность результатов определения температуры с учетом формул (10,12) с экспериментальными результатами определения энергоемкости измельчения свидетельствует о правомерности формулы (12). При этом эффективность разупрочнения крепких руд и минералов с помощью СВЧ волн заключается в интенсивности передачи энергии электромагнитных волн в виде неоднородного теплового воздействия на указанные твердые среды за относительно короткое время (минуты), что обуславливает существенное изменение при этом структурного состояния и показателей прочности указанных сред. Разрушение твердых сред осуществляется двумя путями: отрывом (разрыв, растяжение) или сдвигом.

Для горных пород характерно неравенство прочностей при различных видах нагружения:

$$\sigma_0 > \sigma_{сж} > \tau_c > \sigma_p \quad (13)$$

где σ_0 - прочность при объемном (трехосном) сжатии; $\sigma_{сж}$ - прочность при одноосном сжатии; τ_c - прочность при срезе (сдвиг); σ_p - прочность при одноосном растяжении.

Хрупкость и пластичность (вязкость) горных пород существенно влияют на энергоемкость их разрушения. В качестве показателя - коэффициента хрупкости - $K_{хр}$ горной породы предложено отношение прочности при одноосном сжатии к прочности при одноосном растяжении $K_{хр} = \sigma_{сж} / \sigma_p$. Обратную к показателю хрупкости величину назовем коэффициентом сопротивляемости разрушению горной породы $K_c = \sigma_p / \sigma_{сж}$.

Для определения изменений удельной энергоемкости измельчения (по сравнению с удельной энергоемкостью измельчения исходного состояния) от продолжительности СВЧ воздействия на горные породы (руды) запишем

$$E_V = E_{V0} + E_{V0} \cdot K_p \quad (14)$$

где E_V - удельная энергоемкость измельчения после СВЧ облучения; E_{V0} -

удельная энергоемкость измельчения до СВЧ облучения (исходного состояния); K_p - коэффициент энергоемкости разрушения горной породы,

зависящий от разности коэффициента сопротивляемости разрушению K_c и

показателя напряженности K_σ , то есть $K_p = K_c - K_\sigma$.

Показатель напряженности K_σ , представим в виде

$$K_\sigma = K_T \cdot |\sigma_0| / \sigma_{сж} \quad (15)$$

где $|\sigma_0|$ - абсолютное среднее значение остаточного напряжения; K_T - неизвестный эмпирический коэффициент напряженности.

С учетом равенства (15)

$$K_p = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \quad (16)$$

тогда из равенства (14)

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) \quad (17)$$

Известно, что при неравномерном температурном воздействии изменяется структурное состояние, в том числе остаточные (структурные) напряжения горных пород и минералов. При этом остаточные напряжения в зависимости от их знака, т.е. направленности влияют на прочность по-разному - в первом случае как разупрочняющий, а во втором случае как упрочняющий фактор. Для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при тепловом воздействии СВЧ волнами с последующим охлаждением в воздухе получена (совместно с Тажибаевым К.Т.) следующая формула

$$\sigma_0 = \left(\frac{T_m}{T_p} \pm \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \quad (18)$$

где σ_0 - среднее остаточное напряжение в объеме горной породы; T_m - температура при котором минимальна удельная энергоемкость измельчения горной породы, т.е. температура перехода знака остаточных напряжений, например, растягивающие напряжения, переходят в сжимающие; T_2 - температура для соответствующей продолжительности воздействия СВЧ волн; T_p - температура разложения (деструкции) основного минерала или горной породы; σ_p - прочность горной породы при одноосном растяжении.

В формуле (18) знак плюс (+) при $T_m \geq T_2$, при этом формируются преимущественно растягивающие остаточные напряжения, знак минус (-) при $T_m < T_2$, при этом формируются преимущественно сжимающие остаточные напряжения.

Используя выше приведенные данные определяем удельную энергоемкость измельчения темно-серого филлита месторождения Кумтор с учетом времени воздействия. Определяем остаточное напряжение для температуры, соответствующей для 1-й минуты СВЧ облучения, подставляя взятые из справочника значения температуры разложения основного породообразующего минерала кальцита $T_p = 900^{\circ}C$, прочности при одноосном растяжении филлита $\sigma_p = 5,6 МПа$. Экспериментально установленное значение минимальной удельной энергоемкости измельчения филлита при 3-х минут облучения соответствует температуре $T_m = 356^{\circ}C$, и $T_2 = 31^{\circ}C$ (рис.5), тогда, согласно формуле (18) $\sigma_0 = 5,4 МПа$. Таким образом, в уравнении (17) все показатели, кроме эмпирического коэффициента напряженности K_T известны. Имеется несколько способов определения

эмпирических коэффициентов по результатам соответствующих экспериментальных наблюдений (способ о среднем, наименьших квадратов). В нашем случае коэффициент напряженности K_T определялся способом о среднем (Гутер Р.С., Овчинский В.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М., «Наука», 1970, с. 432) , как наиболее простым и не требующим сложных математических преобразований. Значение K_T по данным способа о среднем 2,6 (из 300 опытов).

Тогда формулу (17) представим в виде

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) \quad (19)$$

Таким образом, совместно с Тажибаевым К.Т. получена расчетная формула, позволяющая описывать изменения удельной энергоемкости измельчения горных пород, минералов, руд в зависимости от их прочностных свойств, остаточных напряжений, зависящих от температуры, продолжительности СВЧ воздействия.

По формуле (19) аналитически определяем удельную энергоемкость измельчения темно-серого филлита месторождения Кумтор для продолжительности воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Для данного филлита удельная энергоемкость измельчения исходного (начального) состояния $E_{VO} = 97 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$, прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 111,2 \text{ МПа}$; растяжении $\sigma_p = 5,6 \text{ МПа}$, для 1-ой минуты $\sigma_0 = 5,4 \text{ МПа}$, тогда $E_V = 89,6 \text{ МДж / м}^3$.

В такой же последовательности определяем значения удельной энергоемкости измельчения при разных продолжительностях СВЧ воздействия для разных горных пород. Результаты расчетного определения данного параметра и сопоставления с экспериментальными данными приведены в табл. 3. По результатам экспериментальных и аналитических исследований видно, что данные хорошо согласуются между собой (табл. 3 и рис. 3-7) и при оптимальном времени воздействия СВЧ волн 3-5 минут происходит существенное уменьшение энергоемкости измельчения руд. Это обеспечивает значительную экономию энергозатрат. Однако, возникает закономерный вопрос о том, сколько дополнительной энергии расходуется при СВЧ облучении, и не превысит ли суммарная энергоемкость, с учетом энергии расходуемой при СВЧ воздействии, величину энергоемкости исходного, т.е. необлученного состояния?

Для определения суммарной энергоемкости измельчения руд необходимо определить удельную тепловую энергию в СВЧ печи. Тепловую энергию СВЧ печи можно определить по формуле

$$E_T = N \cdot t,$$

где E_T – тепловая энергия печи; N – мощность печи, Дж/с; t – время действия печи, с.

Например, при продолжительности работы печи равной 1-й минуте

$$E_T = N \cdot t = 700 \text{ Дж / с} \cdot 60 \text{ с} = 42000 \text{ Дж}.$$

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные значения удельной энергоёмкости измельчения для разных продолжительностей времени воздействия СВЧ волн

Название и место отбора горной породы, минерала	Продолжительность возд. СВЧ волн, минут	Удельная энергоёмкость измельчения, Дж / м ³ · 10 ⁶		Отклонение расчетных значений от экспериментальных, %
		Экспериментальные значения	Расчетные значения	
Филлит темно-серый, Кумтор	0 (исходн.)	97	97	0
	1	85	89,6	5,1
	2	72	75,9	5,1
	3	63	66,4	5,1
	4	69	79,2	9,1
	5	74	73,5	0,7
	6	68	69	1,4
	7	67	65,4	2,4
	8	67	62,3	7,5
Кварц, Восточный Коунрад	0 (исходн.)	69	69	0
	1	66,7	63,9	4,4
	2	64,1	57	12,4
	3	61,9	57,1	8,4
	4	59,3	54,8	8,2
	5	58,2	53,2	9,4
	6	61,8	63,5	2,7
	7	66,3	62,5	6,1
Известняк, Ак-Татыр	0	118	118	0
	1	84	102,6	18,1
	2	76	81,2	6,4
	3	74,6	76,4	2,4
	4	88	102,1	13,8
	5	104,5	85,6	22,1
	6	98	91,1	7,6
	7	93,8	87,7	6,9

	8	95	86,9	9,3
	9	96,9	80,6	20,2

Удельная объемная энергия определяется как

$$E_{TV} = E_T / V_{\text{э}},$$

где $V_{\text{э}} = V_{\text{п}} \cdot K_3$ - эффективный объем печи; $V_{\text{п}}$ -полезный объем печи ($0,03\text{м}^3$); K_3 - коэффициент заполнения объема ($K_3 = 0,7$).

В нашем случае при продолжительности работы печи равной 1-ой минуте $E_{TV} = E_T / V_{\text{п}} = 42 \cdot 10^3 / 0,03 \cdot 0,7 = 2 \text{ МДж/м}^3$; при 2 мин.- 4 МДж/м^3 ; 3 мин. - 6 МДж/м^3 ; 4 мин.- 8 МДж/м^3 ; 5 мин.- 10 МДж/м^3 ; 6 мин.- 12 МДж/м^3 ; 7 мин.- 14 МДж/м^3 ; 8 минут 16 МДж/м^3 ; 9 минут 18 МДж/м^3 ; 10 мин.- 20 МДж/м^3 .

С учетом дополнительной удельной энергии СВЧ облучения можно определить суммарную энергоемкость измельчения руд для разной продолжительности СВЧ воздействия и сравнить с величиной энергоемкости измельчения исходного, необлученного состояния. На рис. 7 представлены графики экспериментальной и суммарной энергоемкости измельчения известняка месторождения Ак-Татыр.

Как видно из рис. 7, суммарная удельная энергоемкость измельчения руд не превышает величину удельной энергоемкости измельчения исходного, необлученного СВЧ волнами состояния. Таким образом, можно отметить, что при оптимальной продолжительности СВЧ облучения перед измельчением крепких руд и минералов обеспечивается экономия энергоресурсов порядка 40%.



Рис. 6. Графики экспериментального -1 и аналитического -2 определения удельной энергоемкости измельчения филлита Кумторского месторождения.

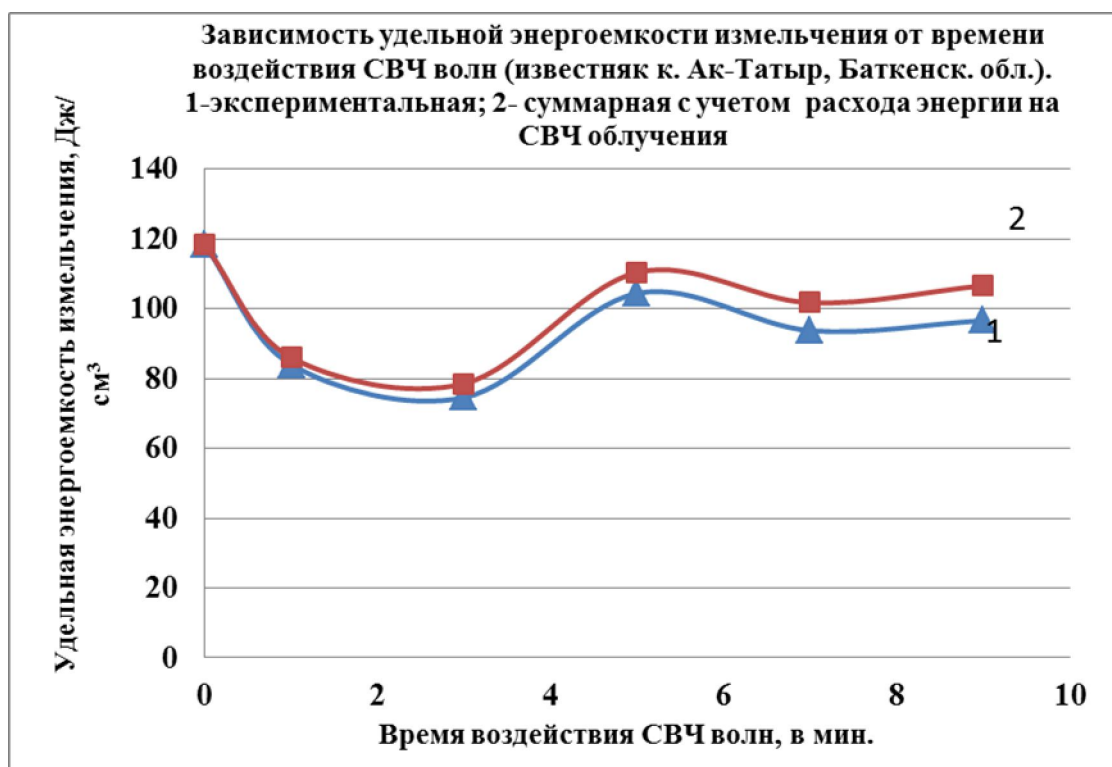


Рис. 7. Графики удельной энергоемкости измельчения (известняк, Ак-Татыр, 1- экспериментальный, 2-суммарный).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе дано решение актуальной проблемы - обоснование физико-технических принципов целенаправленного изменения механических свойств в процессах переработки крепких руд, заключающееся в разработке эффективного метода их разупрочнения, обеспечивающего уменьшение энергозатрат в процессе измельчения, которое можно квалифицировать как новое достижение в развитии перспективного направления в физике разрушения полиминеральных горных пород. Наиболее существенные научные и практические результаты, а также основные выводы диссертации заключаются в следующем:

1. Определены параметры, характеризующие напряжение и деформацию структурных элементов горной породы, рассматриваемых объемов по масштабному принципу, необходимые для построения моделей и для описания физических процессов, протекающих в породе при различных видах внешнего воздействия.
2. Установлено, что структурные остаточные напряжения образуют самоуравновешенную систему напряжений, вызванную неравномерными

начальными упруго-пластическими деформациями, влияние этих напряжений на прочность зависит от характера напряженного состояния, взаимодействия с внешней нагрузкой и характеристик упругости материала.

3. Установлено, что тепловое воздействие приводит к существенным изменениям структурного состояния горных пород. В кварце содержащих горных породах в основном сжимающие остаточные напряжения на уровне кристаллической решетки снижаются, и при дальнейшем увеличении температуры преобразуются в растягивающие напряжения.

4. В мономинеральных породах, содержащих кальцит, преобладающие растягивающие напряжения преобразуются в сжимающие остаточные напряжения. При преобладании сжимающих остаточных напряжений прочность горных пород увеличивается, а при увеличении растягивающих остаточных напряжений, наоборот, происходит разупрочнение.

5. Установлено, что при тепловом воздействии в кварцах гранита существующие первоначальные сжимающие остаточные напряжения на уровне кристаллической решетки уменьшаются в два раза, исходные растягивающие напряжения внутри и на границах зерен также снижаются существенно. В кальцитах разных горных пород имеется тенденция к уменьшению исходных сжимающих напряжений кристаллической решетки и переходу от сжимающих к растягивающим напряжениям.

6. Обоснованы принципы изменения механических свойств горных пород, заключающиеся в использовании избирательной реакции структурных элементов полиминеральных руд и минералов на действие физических полей, при разных видах и режимах воздействия, инициированных в отдельных структурных элементах, необходимые для разупрочнения.

7. Получены аналитические зависимости структурно-механической модели неоднородной твердой среды, которые позволяют проводить количественную оценку изменения напряжений на разных масштабных уровнях, разработать рекомендации по целенаправленному управлению механических свойств крепких руд.

8. Впервые получена зависимость удельной теплоемкости от продолжительности воздействия СВЧ волн, которая, позволяет определить температуру горной породы, при которой происходит максимальное разупрочнение. Обоснована расчетная зависимость удельной энергоемкости измельчения крепких руд и минералов от температуры, данные, которой согласуются с экспериментальными результатами.

9. Получена эмпирическая зависимость, для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при воздействии СВЧ волн, с последующим охлаждением в воздухе. Установлено переломное время воздействия СВЧ волн и характерная температура для данной руды, при которой реализуется эффективное измельчение, достигается минимальность энергоемкости.

10. Установлено, что для исследованных горных пород и руд, время СВЧ облучения 3-5 минут приводит к уменьшению до минимума коэффициента

крепости и удельной энергоемкости измельчения, а дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ волн, наоборот, может привести к упрочнению горной породы.

11. Разработан способ оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий определить оптимальную продолжительность воздействия СВЧ волн для руды данного типа и размера кусков, подлежащих измельчению (Способ измельчения руд и минералов/ Патент на изобретение КР № 1503.2012). Экономия энергоресурсов составляет порядка 40%.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. **Султаналиева Р.М.** Целенаправленное изменение механических свойств горных пород. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Ташмаматов А.С. // Сборник трудов Международной научной конференции “Современные технологии и управление качеством в образовании, науке и производстве: опыт адаптации и внедрения”. г.Бишкек, 2001.-с.42-44.
2. **Султаналиева Р.М.** Оценка влияния остаточных напряжений на характеристики механических свойств горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М., Тажибаев К.Т., Ташмаматов А.С. // Вестник КТУ им.И.Раззакова №5, Бишкек, 2002.- С.136-141.
3. **Султаналиева Р.М.** Метод определения действующих и остаточных напряжений в сейсмоактивных регионах. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы международного научно-технического симпозиума “Образование через науку”, Бишкек, 2004. - С.152-156.
4. **Султаналиева Р.М.** Изменение структурно-механического состояния горных пород при воздействии физических полей. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Известия КНТУ №7, 2005. –С.112-117.
5. **Султаналиева Р.М.** Влияние воздействия физических полей на структурно-механического состояния горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы международной научной конференции “Актуальные проблемы механики и машиностроения”, Т.1, Алматы, 2005, С.313-317.
6. **Султаналиева Р.М.** Исследование влияния СВЧ-облучения на эффективность измельчения руд и минералов. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Ташмаматов А.С., Конушбаева А.Т. // Материалы международной научно-технической конференции “Инновации в образовании, науке и технике”, Т.2., Бишкек, 2006.-С. 144-151.
7. **Султаналиева Р.М.** Изучение прочностных свойств горных пород при высоких температурах. [Текст] / Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т., Бекджигитова Т. // 49-я научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Бишкек, 2007.- С.305-308.
8. **Султаналиева Р.М.** Исследование прочностных свойств горных пород при воздействии физических полей. [Текст] / Султаналиева Р.М., Тажибаев К.Т., Ташмаматов А.С., Конушбаева А.Т. // Известия КГТУ им.И.Раззакова №12, Бишкек, 2007. – С.182-185.

9. **Султаналиева Р.М.** Оценка влияния СВЧ-облучения на разупрочнения горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. // Материалы 3-Международной научной конференции “Актуальные проблемы механики и машиностроения”. Т.3., Алматы, 2009. - С. 132-136.
10. **Султаналиева Р.М.** Влияние остаточных напряжений на акустические характеристики и прочность твердых деформируемых сред. [Текст] / Тажибаев К.Т., Казакбаева Г.О., Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С. // Известия КГТУ им.И.Раззакова №17, Бишкек, 2009.- С. 358-364.
11. **Султаналиева Р.М.** Влияния воздействия СВЧ волн на энергоемкость измельчения горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. // Материалы международной конференции” Информационные технологии и математическое моделирование в науке”, Известия КГТУ, №22, Бишкек, 2011. – С.82-86.
12. **Султаналиева Р.М.** Остаточные напряжения разных масштабнo-структурных уровней и анализ их изменения на основе структурно-механической модели неоднородного твердого материала. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Известия НАН КР №2, Бишкек, 2011. – С.110-115.
13. **Султаналиева Р.М.** Способ измельчения руд и минералов. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С. // Патент на изобретение КР № 1503, 31.10.2012.
14. **Султаналиева Р.М.** Остаточные напряжения и их влияния на энергоемкость измельчения горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы международной научной конференции, посвященной памяти академика М.Я.Леонова “ Современные проблемы механики сплошной среды”, Бишкек, 2012.- С.352-359.
15. **Султаналиева Р.М.** Исследование влияния СВЧ-волн на механические свойства горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы Республиканской научной конференции “Актуальные проблемы современной физики и технологии обучения”. Вестник КНУ им.Ж.Баласагына, Спецвыпуск, серия 3, естественно-технические науки, Бишкек, 2013. – С.56- 59.
16. **Султаналиева Р.М.** Метод оптимального разупрочнения измельчения крепких руд и минералов. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Тажибаев Д.К., Акматалиева М.С. //Известия КГТУ им.И.Раззакова, №29, Бишкек, 2013. - С. 303-310.
17. **Султаналиева Р.М.** Поверхностная энергия минералов и горных пород. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. // Известия КГТУ им.И.Раззакова, №29, Бишкек, 2013.- С.310-315.
18. **Султаналиева Р.М.** О влиянии СВЧ-волн на энергоемкость измельчения горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Вестник Казахского Национального Технического Университета им.К.И.Сатпаева, Алматы, 2013.- С.19-25.

19. **Султаналиева Р.М.** Modeling of rocks hardening and softening [Текст] / Shapovalova A.A., Sultanalieva R.M. // Advanced Problems in Mechanics. Proceedins of XLI International Summer school-Conference, Saint Petersburg, 2013. –С. 521-528.
20. **Султаналиева Р.М.** Метод разупрочнения руд и минералов. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М // Вестник Ошского Государственного Университета. №2, 2-издание, г.Ош, 2013. –С. 153-157.
21. **Султаналиева Р.М.** Разупрочнение горных пород под воздействием СВЧ-волн. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы 4- Международной научной конференции “Актуальные проблемы механики и машиностроения”. Т.1., Алматы, 2014.- С. 404-410.
22. **Султаналиева Р.М.** Принципы целенаправленного изменения механических свойств руд и минералов. [Текст] / Султаналиева Р.М. // , Бишкек, 2014, - С.153.
23. **Султаналиева Р.М.** Способ подготовки к обогащению высокопрочных руд. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. // Материалы Международной конференции «Современное состояние и перспективы развития горнодобывающей отрасли» посв. К 80-летию академика У.Асаналиева. Известия КГТУ им. И.Раззакова №33, Бишкек, 2014.- С.336-341.
24. **Султаналиева Р.М.** Результаты аналитических исследований изменения энергоемкости измельчения руд от длительности воздействия на них СВЧ волнами [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета им.Б.Ельцина, т.15, №5, г.Бишкек, 2015.-С.129-135.
25. **Султаналиева Р.М.** Результаты исследования закономерности изменения температуры руд от продолжительности времени воздействия на них СВЧ волнами. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского Университета им.Б.Ельцина, т.15, №5, г.Бишкек, 2015. –С. 135-141.
26. **Султаналиева Р.М.** Метод определения оптимального времени разупрочнения крепких руд и минералов. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Материалы Международной научно-технической конференции “Минеральные ресурсы, подготовка инженерных кадров и проблемы освоения недр Кыргызской Республики” посв.к 80-летию академика Инженерной Академии КР Осмонбетова К.О., Инженер. Научно-образоват. и производственный журнал. №9, г. Бишкек, 2015. –с. 465-470.
27. **Султаналиева Р.М.** Рентгенографический метод исследования остаточных напряжений в горных породах.[Текст] /Султаналиева Р.М.// Международный научный журнал« Символ науки», №9,г.Уфа,2015.- с. 20-24.
28. **Султаналиева Р.М.** Остаточные напряжения в горных породах и методы их исследования. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Материалы VII межд.научно-практической конференции «Результаты научных исследований», г, Екатеринбург РФ, 2015, -с.59-63.

29. **Султаналиева Р.М.** О способе измельчения крепких руд. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Вестник №5(111) КазНТУ им. К.И.Сатпаева, г.Алматы, 2015. –с.336-342.
30. **Султаналиева Р.М.** Аналитическое описание изменения энергоемкости измельчения руд от длительности воздействия СВЧ волн. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Международный научный журнал «Инновационная наука», г.Уфа, Россия, 10/2015 с.-244-247.
31. **Султаналиева Р.М.** Определение удельной энергоемкости и оптимальной температуры крепких руд после воздействия СВЧ волн. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Научно-технический журнал ГИАБ №11, изд. «Горная книга», г.Москва, 2015. –с. 148-152.
32. **Султаналиева Р.М.** Анализ разномасштабных остаточных напряжений на основе структурно-механической модели напряженно-деформированного состояния. [Текст] / Султаналиева Р.М. // Журнал «Машиностроитель», вып.11, Машиздат, Москва, 2015.-с.14-18.
33. **Султаналиева Р.М.** Определение параметров структурного состояния горных пород. [Текст] / Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. //Материалы международной научно-практической конференции «Эволюция современной науки», научно-изд.центр Аэтерна, г.Казань, 2015.-с.159-163.
34. **Султаналиева Р.М.** Энергосберегающий способ измельчения крепких руд. [Текст] / Тажибаев К.Т., Султаналиева Р.М. // Труды Международного научного симпозиума «Неделя горняка-2015», ГИАБ, №12, Изд. «Горная книга», Москва, 2015.-с.76-83.

01.02.04-«Деформацияланган катуу телолордун механикасы» адистиги боюнча физика-математика илимдеринин доктору илимий даражасын изденүү үчүн жазылган **Султаналиева Рая Мамакеевнанын «Рудалардын жана минералдардын механикалык касиеттерин физикалык талаалардын таасири менен багыттуу түрдө өзгөртүү»** темадагы диссертациясынын

КОРУТУНДУСУ

Негизги сөздөр: *тоо тектери, калдыктуу чыңалуулар, жумиартуу, майдалоо ,бекемдик коэффициенти, салыштырма энергосыйымдуулук, өтө чоң жыштыктагы толкундар, структуралык абал, механикалык касиеттер, рентгенография ыкмасы.*

Диссертацияда, тоо - кен тектерин кайра иштетүүдө, майдалоого кеткен энергияны азайтуу үчүн, алардын касиеттерин багыттуу түрдө өзгөртүү боюнча физикалык-техникалык негиздерге таянган актуалдуу проблеманы чечүү каралат.

Жумушта, тоо тектериндеги ар түрдүү масштабдагы структуралык чыңалууларды жана майдалоого кеткен энергиянын салыштырма чоңдугун ӨЖЖ толкундардын таасири менен өзгөртүүдөгү эксперименталдык жыйынтыктар берилген. Рудалардын жана минералдардын бекемдигин азайтууга негизделген принцип, алардын ар кандай бөлүктөрүндөгү, ал тургай кристаллдык торчонун денгээлине чейинки чыңалуулардын өзгөрүшүнө негизделген. Өтө чоң жыштыктагы толкундар менен тоо-кендерин нурдантуудан кийинки абалдарынын структуралык түзүлүштөрүнүн өзгөрүшүнүн негизинде рудалардын механикалык касиеттерин башкаруу боюнча технологиялык аракеттер сунушталат.

Эксперименталдык жана аналитикалык жол менен нурдануунун убактысына байланышкан салыштырма жылуулук сыйымдуулугу аныкталды. Биринчи жолу, салыштырма майдалоо энергиясынын азайышынын , ӨЖЖ толкундар менен нурдантуу убактысынан болгон көз карандылыгы алынган. Анын жардамы менен тоо тектеринин бекемдигин азайтууга болгон максималдуу температура аныкталат.

Берилген руданын убакыттын кандай маанисинде майдалоо оптималдуу боло тургандыгын аныктаган ыкма сунушталат.

РЕЗЮМЕ

диссертации Султаналиевой Раи Мамакеевны на тему: «Целенаправленное изменение механических свойств руд и минералов под воздействием физических полей» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04. - Механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: *горная порода, руда, остаточное напряжение, разупрочнение, измельчение, коэффициент прочности, удельная энергоемкость, СВЧ волны, механические свойства, структурное состояние, рентгенографический метод.*

В диссертационной работе решена актуальная проблема, посвященная разработке физико-технических основ целенаправленного изменения свойств крепких полиминеральных руд в процессах их переработки, обеспечивающее уменьшение энергозатрат в процессе измельчения.

Приведены результаты экспериментальных исследований разномасштабных структурных напряжений минералов, энергоемкости измельчения руд при разных режимах воздействия теплового поля и СВЧ волн.

Обоснованный принцип разупрочнения руд и минералов заключается в целенаправленном изменении структурных напряжений на границах и внутри зерна, включая уровень кристаллической решетки. Предложены зависимости позволяющие анализировать структурные остаточные напряжения на разных масштабных уровнях до и после воздействия физических полей и разработать технологические меры по целенаправленному управлению механических свойств крепких руд.

Экспериментально и аналитически определена удельная энергоемкость измельчения горных пород от продолжительности воздействия СВЧ волн. Впервые получена зависимость удельной теплоемкости от продолжительности воздействия СВЧ волн, которая, позволяет определить температуру горной породы, при которой происходит максимальное разупрочнение.

Предложен метод разупрочнения крепких руд и минералов основанной на установлении оптимальной продолжительности воздействия СВЧ волн на руду данного типа и размера кусков, подлежащих к измельчению.

RESUME

dissertation Sultanalieva Raia Mamakeevna on "Targeted changes in the mechanical properties of ores and minerals under the influence of physical fields" for the degree of doctor of physical and mathematical sciences on a specialty 01.02.04. - Mechanics of deformable solids

Keywords: *rock, ore, residual stress, loss of strength, refinement, safety factor, energy density, the microwave, the mechanical properties, structural condition, X-ray method.*

The thesis is solved an actual problem, dedicated to the development of physical and technical bases of purposeful changes in the properties of strong multiminerale ore in the process, provides a reduction in energy consumption during the grinding process.

The results of experimental studies multiscale structural stress minerals, ores crushing energy consumption at different exposure modes of the thermal field and microwaves.

Sound principles softening of ores and minerals is changing the targeted structural tensions on the border and inside the grain, including the level of the crystal lattice. Dependences allow you to analyze the structural residual stresses at different scale levels before and after the physical fields and to develop technological measures targeted management of the mechanical properties of hard ore.

Experimentally and analytically determined by the specific energy of grinding rocks on the duration of exposure to microwaves. For the first time the dependence of the specific heat on the duration of exposure to microwaves, which allows to determine the temperature of the rock at which the maximum softening.

A method for the optimum softening of hard ores and minerals determines the optimal duration of effect of microwaves on the ore type and size of pieces to be milled.