

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ  
РЕСПУБЛИКИ  
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И.РАЗЗАКОВА  
ИНСТИТУТ ГЕОМЕХАНИКИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР НАН КР**

На правах рукописи

УДК 553.781.2:553.241/242(043.3)

**СУЛТАНАЛИЕВА РАЯ МАМАКЕЕВНА**

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

**Специальность:** 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

**Научный консультант:**

д.т.н., профессор Тажибаев К.Т.

**Бишкек - 2016**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ ПРИ ИХ ПОДГОТОВКЕ К ОБОГАЩЕНИЮ</b> ....	11
1.1. Современное состояние изученности проблемы целенаправленного изменения свойств горных пород.....	11
1.2. Методы воздействия физических полей на горные породы и минералы .....	16
1.3. Влияние электрических и магнитных свойств на механические свойства горных пород.....	21
1.4. Физические основы разупрочнения горных пород электромагнитным воздействием.....	31
1.5. Выводы .....	38
<b>ГЛАВА 2. ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ</b> .....	40
2.1. Изучение влияния высоких температур на прочностные показатели горных пород.....	40
2.2. Тепловое расширение неоднородных твердых тел.....	50
2.3. Исследование воздействия СВЧ волн на механические свойства горных пород.....	54
2.4. Выводы.....	65
<b>ГЛАВА 3. СТРУКТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	65
3.1. Параметры структурного состояния горных пород.....	65
3.2. Принципы взаимодействия рентгеновского излучения с	

минералами.....	70
3.3.Рентгенографическое определение структурных напряжений разного масштабного уровня.....	73
3.4. Влияние остаточных напряжений на характеристики механических свойств твердых материалов.....	83
3.5. Выводы.....	90
<b>ГЛАВА 4.                  ОБОСНОВАНИЕ                  ПРИНЦИПОВ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ.....</b>	<b>91</b>
4.1. Принципы управления прочностными свойствами минералов и руд .....	91
4.2. Исследование структурных напряжений на основе структурно- механической модели.....	99
4.3. Аналитические зависимости структурно - механической модели напряженно-деформированного состояния структурных элементов неоднородных твердых материалов.....	107
4.4. Выводы.....	112
<b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАЗУПРОЧНЕНИЯ РУД И МИНЕРАЛОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ СВЧ ВОЛН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ .....</b>	<b>113</b>
5.1. Методика определения удельной энергоемкости измельчения горных пород.....	113
5.2. Аналитические исследования закономерности изменения температуры руд от продолжительности времени воздействия СВЧ волн.....	131
5.3. Результаты аналитических исследований зависимости энергоемкости измельчения руд от времени воздействия СВЧ волн...	146
5.4. Результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ волн на энергоемкость измельчения горных пород.....	168
5.5. Выводы .....	181
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....</b>	<b>182</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>185</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 мини-муму 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.); Международной 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.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ ПРИ ИХ ПОДГОТОВКЕ К ОБОГАЩЕНИЮ.**

### **1.1. Современное состояние изученности проблемы целенаправленного изменения свойств горных пород.**

При переработке минерального сырья, с целью извлечение металлов и полезных компонентов, в технологические процессы дробления и измельчения вовлекаются большой объем трудноизмельчаемых руд и минералов. Использование для этих руд традиционных способов измельчения приведет к росту энергозатрат, интенсивному износу металлических частей мельниц, к значительным потерям извлекаемых металлов.

Решение проблем рационального и комплексного использования минерального сырья достигается путем целенаправленного изменения первоначальных свойств минерального сырья, обеспечивающее эффективную работу уже эксплуатируемых производственных мощностей. Исследования показывают, что такой прием начинает находить широкое применение в практике горного производства. Он реализуется с помощью различных видов физического воздействия, например, для изменения прочности пород,

способности минеральных агрегатов руд к раскрытию в процессах измельчения.

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, эффективности и экологическую чистоту производства.

Большой вклад в использование нетрадиционных и эффективных 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 др.

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. 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. Протожьяконова, А.Н. Ставрогина, И.С. Томашевской, Т.Л. Челидзе, В.С. Ямщикова, С. Кларка, Ф.Эгерера, П.Ф. Бриджмена, Ф. Барга, Н.Христиансена и др.

Большой объем экспериментальных данных свидетельствует том, что свойства горных пород, повергнутых физическому воздействию, изменяются в широком диапазоне. В общем случае изменение параметров, количественно описывающих свойства породы, происходит немонотонно; различные виды и воздействия вызывают изменения, отличающиеся по своему характеру;

изменения свойств, вызванные действием физических полей на горные породы, склонны к релаксации и зависят не только от интенсивности, но и от длительности и других параметров, характеризующих режимы физической обработки. Основы комплексного исследования физических свойств минералов и горных пород, процессов, происходящих в них при воздействии внешних полей, и методы их применения в горном деле, закладывались академиком В.В. Ржевским и его учениками в прошлом столетии.

Постановке подобной основополагающей проблеме и предшествовало глубокое изучение результатов исследований свойств горных пород и процессов, выполненных известными учеными в XIX-XX веках, в том числе В.И. Курдюмовым, П.А. Минаевым, В.М. Севергиным, М.М. Протодяконовым (старшим), П.М. Цимбаревичем, Г.Н. Кузнецовым, Н.А. Цитовичем, Л.И. Бароном, М.М. Протодяконовым (младшим), П.А. Ребиндером, К.В. Руппенейтом, Я.А. Шрейнером, А.И. Бароном, М.П. Воларовичом, Ю.А. Розановым, А.Г. Тарховым, Э.И. Пархоменко, В.Н. Кобрановой и др.

В то же время, до 60-х годов, исследования были недостаточно полными как по количеству изучаемых типов пород и полезных ископаемых, так и по числу определяемых физических параметров, в них отсутствовало обобщение данных по свойствам.

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 получили в трудах Айтматова И.Т., Мамбетова Ш.А., Кожогулова К. Ч., Тажибаева К.Т., Жумабаева Б.Ж., Ялымова Н.Г., Рогожникова О.В., Чунуева И. К. Исследованию остаточных напряжений в технических материалах и горных породах посвящены работы Казакбаевой Г.О., Ташмаматова А.С. и др.

Следует особо отметить, что горные породы при их изучении рассматриваются совокупно как генетические разности с присущими им особенностями и как объекты разработок, характеризующиеся их состоянием и комплексом физико-технических параметров. Особое внимание уделяют механической прочности горных пород как параметра, характерного для большинства процессов разрушения горных пород.

Использование современных методов (рентгенографические, высоко-температурной микроскопии, дифрактометрии в условиях механического нагружения, электронной микроскопии) позволили изучить целый ряд физических явлений и процессов, например, фазовые превращения в горных породах, напряжения на макро и микроуровнях (в том числе остаточные генетические), эффекты памяти горных пород и другие.

В области комплексного изучения свойств и состояний горных пород в натуральных условиях и при разных внешних воздействиях: систематизация и паспортизация горных пород по их свойствам, установление закономерностей изменения этих свойств, диагностирование состояний горных пород в различных физических полях применительно к задачам направленного разрушения массивов и селективной дезинтеграции минерального сырья были выполнены во второй половине XX века и по настоящее время исследованиями: П.И. Воронова, Г.Я. Новика, В.В. Ржевского, В.Б. Горяева, Л.Т. Озолина, Р.Г. Петроченкова, Л.П. Русихина, М.Г. Зильбершмидта и др.

В области механики горных пород: определение взаимосвязей параметров механических свойств, оценка теорий прочности горных пород на основании экспериментальных данных, разработка методологии использования механических свойств горных пород и их строения в технологических расчетах процессов их дробления и измельчения, бурения, рыхления, резания, обрушения, взрывания, разработка способов и средств механического воздействия на горные породы выполнялись М.Г.Зильбершмидтом, Г.Г.Каркашадзе, М.М.Протоdjяконовым (младший), В.В.Ржевским, Н.К.Вересовым, П.Н.Июдиным, С.Г.Овсепяном и др.)

В области акустических исследований горных пород: изучение прочностных параметров горных пород ультразвуковым методом, ультразвуковой виброинтенсификации механического резания и бурения горных пород проводились А.В.Римский-Корсаковым, О.П.Якобашвили, В.С.Ямщиковым, Н.С.Коробейниковым, В.И.Рехтманом, Н.В.Черкашиным, В.Л. Шкуратником, Ш.А. Мамбетовым, К.Т. Тажибаевым, З.К. Артыкбаевой и др.

В области термодинамики горных пород, разработка теории, способов и средств термического разрушения горных пород и горной массы при их бурении, дроблении, резании, измельчении, оттаивании и перемещении представлены в работах С.Г.Гончарова, Л.С.Дербенева, А.П.Дмитриева, Г.Н.Добровольского, Л.С. Кузьева.

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. Различие применяемых для воздействия источников электрической энергии при решении разнообразных технологических задач привело к разработке нескольких направлений, основанных на применении постоянного тока и промышленной частоты, электрических импульсов высокого напряжения, энергии электромагнитного поля высокой частоты (ВЧ) и сверхвысокой частоты (СВЧ), излучений инфракрасного и оптического диапазонов и др. 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, Г.Я.Новика, В.С.Ямщикова, С.А.Гончарова, Ю.М.Мисника.

Л.Б.Некрасова, В.А.Хоминского, Л.Э.Рекинглаза, Н.И.Рябеца, О.Н.Шонина, В.Ж.Аренса, Г.Х.Хчяна, О.М.Гридина, И.В.Ляшенко, В.Ф.Клятченко, А.Н.Москалева, О.В.Явтушенко, В.И.Лойка, А.А.Воробьева, И.И.Каляцкого, А.Т.Чепикова, М.П.Тонконогова, Н.Е.Коваленко и др.

Обширный экспериментальный материал, обобщенный в ряде крупных монографий, а также исследования последних лет показывает, что возрастает потребности горного производства в изучении физических процессов, происходящих в массиве пород. Успешное удовлетворение этих потребностей возможно лишь при условии знаний о физических свойствах горных пород, методов прогноза и управления их свойствами, а также основных принципов воздействия на горные породы с целью эффективной разработки месторождений полезных ископаемых.

## **1.2. Методы воздействия физических полей на горные породы и минералы.**

Разрушение горных пород относится к числу основных технологических процессов горного производства и может осуществляться как направленно при воздействиях на горные породы какими-либо источниками энергии, так и вследствие изменений полей напряжений в недрах при ведении горных работ. Анализ методов воздействия на горные породы и минералы физическими полями показывает, что, в большинстве случаев потери извлекаемых металлов, полезных минералов, т.е. низкий процент их извлечения из руд, результат несоответствия возможностей используемых технологических решений и технических средств многообразием физико-технических параметров вовлекаемых в переработку руд.

В настоящее время известны механические, физико-химические, термические, термомеханические и др. способы разрушения горных пород. При механических способах в породах создаются напряжения, превышающие предел их прочности. При термических способах разрушение пород происходит за счет возникновения в них термических напряжений и различного рода



эффектов (дегидратация, диссоциация, плавление, испарение и т. д.). При термомеханических способах тепловое воздействие осуществляется целенаправленно для предварительного снижения сопротивляемости породы последующему механическому разрушению. Химические (физико-химические) способы разрушения пород предусматривают использование высокоактивного химического вещества.

Из нетрадиционных видов воздействия на руды и минералы для повышения эффективности обогащения опробывались интенсивная ультразвуковая, тепловая, ВЧ- и СВЧ-электромагнитные обработки. Однако при этом не учитывались неоднородность руд и анизотропия свойств породобразующих минералов, что не позволило выявить оптимальные параметры внешнего физического воздействия. Из рассмотренных видов воздействия высокочастотная электромагнитная обработка, благодаря большому КПД и объемному характеру воздействия, является наиболее целесообразной.

В работе [2] изучены связи между микропроцессами в твердых телах и их макроскопическими свойствами, изыскание возможностей целенаправленного изменения свойств кристаллов с дефектами путем воздействия на систему дефектов различными полями. Рассмотрены процессы возникновения и изменения дефектной структуры твердых тел под влиянием различного рода воздействий (механические нагрузки, ультразвук, электромагнитное, электрическое и магнитное поля и др.).

В методах постоянного тока используется способность пород пропускать ток, достаточный для их разогрева. Таким образом, основной предпосылкой применения этих методов является значительная первоначальная проводимость пород. Горная порода разогревается под воздействием электрического поля, в ней возникают термические напряжения и она разрушается. Таким образом, можно создать направленное электрическое поле или концентрировать его на определенных участках породы.

Характерно, что при высокочастотных контактных электротермических способах породы могут быть разрушены еще до достижения теплового пробоя — из-за термических напряжений между нагретым и холодным участками породы.

В ВК (высокочастотные контактные) методах разрушения основную роль играют электрические свойства породы и слагающих ее минералов. Энергоемкость разрушения крепких пород часто бывает меньше, чем у слабых, так, на ВК разрушение (отделение от забоя) 1 т роговиков ( $\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^8$  Па) затрачивалось 11,4 кВт·ч энергии, а на отделение 1 т песчаника ( $\sigma_{сж} = 1,1 \cdot 10^8$  Па) — 28,1 кВт·ч [62].

ВК разрушение, несмотря на эффект разрушения горной породы тепловым полем, отличается термического. Как известно, при термическом разрушении тепловой поток воздействует непосредственно на поверхность горной породы и поэтому происходит ее поверхностное шелушение.

В результате же воздействия электромагнитного поля порода прогревается на значительную глубину, которая зависит от частоты поля и от электрических свойств породы. Эффективность процесса разрушения увеличивается с увеличением частоты, а энергоемкость снижается, поскольку разрушение породы при этом происходит в большей мере от растягивающих напряжений.

Основным условием ВК электротермического разрушения пород является их способность нагреваться в электрическом поле. Другим условием, как и при термическом разрушении, является способность пород превращать накопленную тепловую энергию в механическую. При использовании электротермического ВК способа плохо разрушаются породы пористые и разлагающиеся при высоких температурах — известняки, мраморы.

Электромагнитные поля частотой более 300 МГц применяют в радиоволновых методах разрушения пород [47]. При этом не существует непосредственного контакта излучающего электрода с разрушаемой породой. Электромагнитная волна специальной антенной-излучателем направляется в

массив в виде сконцентрированного луча. Радиоволна проникает в горную породу и поглощается в ее объеме, определяемом некоторой глубиной  $h$ . За счет этого порода разогревается и появляются термические напряжения, способные разрушать породу. Изменяя частоту радиоволн, можно менять глубину проникновения и, следовательно, концентрации электромагнитной энергии. В зависимости от режима нагрева породы, ее электрических свойств, частоты и мощности электромагнитной волны разрушение может быть в виде мелкого шелушения (быстрый разогрев верхнего слоя породы — частота поля большая), либо в виде крупных кусков (менее быстрый разогрев — частота ниже).

При облучении горных пород электромагнитной волной значительная ее мощность расходуется на отражение от границы воздух — порода. Особенно большие потери энергии наблюдаются при высоких значениях электропроводности пород.

В то же время малая электропроводность пород не позволяет концентрировать электроэнергию в ограниченном объеме — она распространяется в массиве и также теряется. Поэтому необходимо выбирать частоту и режим работы генератора в соответствии с электрическими свойствами пород. Для уменьшения коэффициента отражения электромагнитной волны  $K_n$  необходимо максимально уменьшить разницу между волновыми сопротивлениями породы и среды, через которую проходит волна в породу.

Магнитные руды можно разрушать, в высокочастотном магнитном поле [37]. Индукционный виток, создающий магнитное поле, располагают на поверхности ферромагнитной породы (например, железистые кварциты). Экспериментами установлено, что в результате прогрева магнитным полем частотой 0,2 МГц и напряженностью около  $7 \cdot 10^4$  А/м в течение 2 мин. куски руды ( $\mu=3$ ,  $p_0=10 \cdot 10^4$  Ом·м) раскалывались. Глубина эффективного прогрева породы составила 6-8 см.

Одним из наиболее приемлемых для практической реализации способов снижения энергоемкости разрушения руды при измельчении является ее импульсная электромагнитная обработка (ИЭМО) перед подачей в мельницу.

При ИЭМО разупрочнению поддаются породы содержащие минералы магнитострикторы и минералы электрострикторы [31]. При этом в минералах магнитострикторах и электрострикторах соответственно возникают явления магнитострикции и электрострикции. Эти явления сопровождаются изменением формы минералов без изменения их объема. Это может быть в том случае, если размеры зерен по одним кристаллографическим осям увеличиваются, а по другим уменьшаются. Так как эти минералы жестко связаны с другими породообразующими минералами, то на межзерновых границах в породе возникают структурные напряжения, приводящие к разупрочнению межзерновых связей.

Как показали эксперименты, наибольший разупрочняющий эффект имеет место при ИЭМО руд, содержащих, минералы- ферромагнетики и электрострикторы за счет явления магнитострикции и электрострикции.

Несмотря на широкий спектр используемых для разрушения горных пород физических полей и принимая во внимание рассмотренные выше основные особенности этого процесса можно прийти к выводу о невозможности создания универсального способа разрушения, пригодного для всех типов и разновидностей горных пород. Поэтому речь может идти только о выборе оптимального для конкретной горной породы способа разрушения, обеспечивающего ресурсосбережение при последующей переработке.

Из всех известных и в какой-то мере изученных видов энергии, с точки зрения способности влиять на физико-механические свойства пород и руд, наиболее перспективна энергия электромагнитного поля высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона [34,41,44]. К преимуществам разупрочнения в СВЧ электромагнитных полях относится:

- объемный характер преобразования излученной СВЧ энергии в тепловую в пределах глубины проникновения, в зависимости от частоты электромагнитного поля;
- высокая температура нагрева, позволяющая обеспечивать скорость разупрочнения, соизмеримую с принятыми скоростями механического нагружения.

### **1.3. Влияние электрических и магнитных свойств на механические свойства горных пород.**

Для электромагнитного воздействия на породу необходимо знать, как и насколько можно изменить то или иное внешнее воздействие. Наиболее сильное воздействие на электрические и магнитные свойства минералов и горных пород оказывает температура. Изменяя температуру породы, можно изменить ее электрические и магнитные свойства до определенной величины [10].

Электрические и магнитные свойства используются при контроле состояния массива горных пород, определении содержания полезного компонента в породе, разделении породы на компоненты, для подвода электромагнитной энергии к породе и т.д. Для исследования электрических и магнитных свойств горных пород в зависимости от температуры используются в основном известные методы с некоторыми изменениями, учитывающими структуру и текстуру породы, а также стандартные приборы со специально изготовленными приспособлениями для установки образцов [60].

Минералы, как известно, представляют собой ионные соединения, в которых ионы связаны в основном силами электростатического притяжения. На величину электростатического поля, удерживающего ионы в кристаллической решетке, влияет любое внешнее воздействие. Это влечет за собой изменение электрических свойств минералов. Таким образом, зная изменение электрических свойств минералов, количественно можно определить внешнее воздействие на них. Следовательно, по изменению

электрических свойств минералов и пород, в которых входят данные минералы, можно получить информацию о состоянии пород и минералов в массиве. Следовательно, если минералы удерживаются в кристаллическом состоянии электрическими силами, то свойства минералов можно изменить этими же силами. Взаимодействие электромагнитного поля с веществом, в частности с минералами, описывается уравнениями Максвелла. Для решения задач по уравнениям Максвелла необходимо знать следующие показатели электрических и магнитных свойств минералов:

$g(ом·см)^{-1}$  — удельную электропроводность или  $\rho(ом·см)$ - удельное электрическое сопротивление, величину, обратную  $g$ ;  $\varepsilon$  - относительную диэлектрическую проницаемость (действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости);  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}$ , где  $\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость,  $\Phi/м$ ;  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная  $\varepsilon_0 = 8,885 \cdot 10^{-12}, \Phi/м$ ,  $\mu$ -относительную магнитную проницаемость.

Под диэлектрической проницаемостью понимается коэффициент пропорциональности между электрическим смещением  $\bar{D}$  и напряженностью электрического поля  $\bar{E}$ ;  $\bar{D} = \varepsilon' \varepsilon_0 \bar{E}$ .

Величина  $\varepsilon'$  безразмерная, а значение диэлектрической постоянной вакуума  $\varepsilon_0 = 8,885 \cdot 10^{-12}, \Phi/м$ .

Минералы представляют собой проводники I и II рода - полупроводники и диэлектрики. Проводники I рода — электронные проводники, перенос заряда, в которых осуществляется электронами без заметного переноса массы. В проводниках II рода заряды переносятся в основном ионами с заметным переносом массы.

Проводники II рода лишь при высоких температурах имеют высокую проводимость, а при низких и средних температурах — это диэлектрики, так как характеризуются весьма малой проводимостью.

Полупроводниковые и диэлектрические минералы обладают смешанной ионно-электронной проводимостью, т. е. заряды в них переносятся как ионами, так и электронами, однако в полупроводящих минералах даже при высоких температурах заряды переносятся в основном электронами. Чтобы знать, относится ли данный минерал к диэлектрикам или полупроводникам, необходимо определить род носителей заряда (ионы или электроны), их подвижность и число в единице объема (плотность), а также величину запрещенной зоны.

Горные породы, состоящие из одних только полупроводниковых минералов, называются полупроводящими, а породы, которые состоят только из диэлектрических минералов, — диэлектрическими. Электрические свойства пород, состоящих из диэлектрических полупроводящих и проводниковых минералов, неоднородны. Последняя группа пород довольно многочисленная, а первая встречается сравнительно редко. Группа диэлектрических пород распространена весьма широко.

Диэлектрические минералы и породы имеют сравнительно невысокую относительную диэлектрическую проницаемость (5—10); полупроводниковые минералы и породы имеют высокую относительную диэлектрическую проницаемость (более 10). Неоднородные породы имеют более высокую диэлектрическую проницаемость, причем величина ее зависит от содержания в ней проводниковых и полупроводниковых минералов [45].

Поэтому наибольшие значения диэлектрической проницаемости присущи породам, в состав которых входят рудные минералы.

Диэлектрическая проницаемость на низких частотах всегда увеличивается при переходе от монокристалла к поликристаллу и от чистого поликристалла к более разнородному (табл. 1.3.1.)

Таблица 1.3.1- Сравнение  $\epsilon_r$  монокристаллов и поликристаллов[45].

Моно-кристалл	$\epsilon_r$	Поли-кристалл	$\epsilon_r$	Поликрис-талл разнородный	$\epsilon_r$
Кварц	4,96–5,06	Кварцит	6,6–7,0	Чистый песчаник	9,0–11,0
Кальцит	7,5–7,7	Мрамор	8,3	Известняк	8,0–12,0

М.П.Воларович и Э.И.Пархоменко открыли явление пьезоэффекта в горных породах, содержащих минералы - пьезоэлектрики - в гранитах, гнейсах, кварцитах, жильном кварце, нефелиновых породах и т. д.

Величина поляризации  $P_3$  пьезоэлектрика прямо пропорциональна механическим напряжениям  $\sigma$ :  $P_3 = \zeta \sigma$ ,

где  $\zeta$  - коэффициент, характеризующий пьезоэлектрический эффект породы и называемый пьезоэлектрическим модулем.

Для характеристики пьезоэффекта пород пользуются отношением пьезомодуля породы к величине  $\zeta$ , монокристалла кварца. Так, наиболее сильным пьезоэффектом обладает жильный кварц (10% от модуля монокристалла): у кварцитов пьезомодуль составляет 1%, у гнейсов и гранитов 0,2—0,5%.

У некоторых пьезоэлектриков направление самопроизвольной поляризации можно изменить, воздействуя на них внешним электрическим полем. Эта группа минералов носит название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрические свойства могут проявлять минералы кубической, тетрагональной, ромбической и моноклинной сингоний, например пирохлор, колеманит, борацит, пиролюзит и др.

Так как сегнетоэлектрики спонтанно поляризованы, даже при ничтожно малой напряженности поля поляризация их значительна. Поэтому они обладают исключительно большой диэлектрической проницаемостью (20 000 и более), которая сильно зависит от температуры и имеет



аномальные значения в определенных температурных интервалах. Существует температура, выше которой сегнетоэлектрики теряют свою поляризацию, дегополяризуются. Эта температура называется точкой Кюри. Каждый минерал имеет свою точку Кюри (до 840К). В этой точке происходит перестройка кристаллической решетки, называемая фазовым переходом [45].

Подобно тому, как диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства диэлектриков, удельная электропроводность является электрическим параметром проводников.

Под электропроводностью  $g$  подразумевается коэффициент пропорциональности между током  $I$  и напряжением  $U$  в законе Ома

$$I = gU \frac{S}{l}.$$

Горные породы в большинстве случаев входят в группу полупроводников, характеризующуюся свойствами как диэлектриков ( $\epsilon_r \ll \infty$ ), так и проводников (породам присущи некоторые значения удельной электропроводности  $\sigma_3 > 0$ ).

По величине электропроводности все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Разная электропроводность веществ с позиций квантовой теории объясняется различиями в энергетической схеме их кристаллов.

Кроме того, наличие примесей в проводниках всегда снижает их электропроводность, а наличие примесей в диэлектриках повышает их электропроводность. Эти различия указывают, что почти все минералы и горные породы относятся к классу проводников с разной электропроводностью.

Главнейшие породообразующие минералы (слюда, галит, сильвин, кальцит, полевые шпаты, кварц) обладают низкой проводимостью ( $\sigma_3 = 10^{-12} \div 10^{-20}$  См/м).

Если в породе имеются рудные минералы, расположенные

в виде прожилков или соединяющихся между собой в токопроводящий канал зерен, то присутствие даже незначительного количества этих минералов резко повышает величину  $\sigma$ , пород. Это характерно для пород, содержащих пирит, халькопирит, пирротин, которые имеют полосчатое расположение, в отличие, например, от галенита, располагающегося изолированными включениями.

Удельная электропроводность  $\sigma$ , пород значительно выше, чем у породообразующих минералов. Причиной этого являются примеси и искажения кристаллической решетки в агрегатах. В сцементированных осадочных породах электропроводность понижается, так как обычно цементирующими веществами бывают слабопроводящие минералы - кварц, гипс, кальцит и др.

В песках, рыхлых песчаниках, выветрелых коренных породах, глинах и обломочных породах удельное сопротивление почти не зависит от формы порового пространства.

В плотных песчаниках, известняках, доломитах, ангидритах и т. д., поровое пространство которых представлено пустотами, каналами и трещинами, удельное сопротивление в значительной степени зависит от формы этого пространства

Магнитное поле характеризуется двумя показателями: напряженностью  $H$  и индукцией  $B$ . Между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в веществе существует прямо пропорциональная зависимость  $B = \mu_a H$ .

В этой зависимости коэффициент пропорциональности,  $\mu_a$  равен абсолютной магнитной проницаемости вещества. В вакууме,  $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Эта константа называется магнитной постоянной.

Для оценки магнитных свойств вещества (или породы) чаще используют показатель относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , равный отношению:

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$$

В зависимости от магнитных свойств минералы бывают диамагнитными ( $\mu < 1$ ) и парамагнитными ( $\mu > 1$ ). Магнитная проницаемость парамагнитных минералов приблизительно равна единице. Эти минералы, а также породы, состоящие из них, по магнитным свойствам почти не отличаются от вакуума. Магнитная проницаемость ферромагнитных минералов  $\mu \gg 1$ , но их число невелико. Наиболее известные магнетит, титаномагнетит и пирротин. Горные породы, в которые входят ферромагнитные минералы в достаточном количестве, имеют магнитную проницаемость  $\mu \gg 1$ , причем величина  $\mu$  зависит от содержания ферромагнетика в породе.

Магнитная проницаемость диамагнетиков и парамагнетиков не зависит от напряженности магнитного поля при изменении его вплоть до  $8 \cdot 10^5$  А/м.

Следует подчеркнуть, что намагниченность, обусловленная диамагнитными явлениями, присуща всем горным породам и минералам, однако, так как она незначительна по величине, и направлена противоположно намагниченности, вызванной парамагнитными явлениями, последняя преобладает и становится решающей.

Горные породы, у которых целые объемы (домены) обладают магнитными моментами при отсутствии внешнего поля, называются ферромагнитными. Благодаря доменам магнитная проницаемость ферромагнитных пород значительно больше, чем у парамагнитных. Намагниченность ферромагнитных пород достигается воздействием не только внешнего поля, но и намагничивающим действием дополнительного внутреннего молекулярного поля. Намагниченность ферромагнитных пород зависит от напряженности магнитного поля, причем при определенном значении  $H$  эта зависимость исчезает - наступает насыщение. При снижении напряженности магнитного поля до нуля породы полностью не размагничиваются. Это явление носит название остаточной намагниченности  $J_{\text{ост}}$  (рис.1.3.2.)

Для того чтобы породу размагнитить, необходимо воздействие на нее

некоторого обратно направленного магнитного поля. Напряженность поля, при которой происходит полное размагничивание, характеризует породу и называется коэрцитивной силой  $H_c$ . Для ферромагнитных пород характерна петля гистерезиса (рис. 1.3.2.) [45].

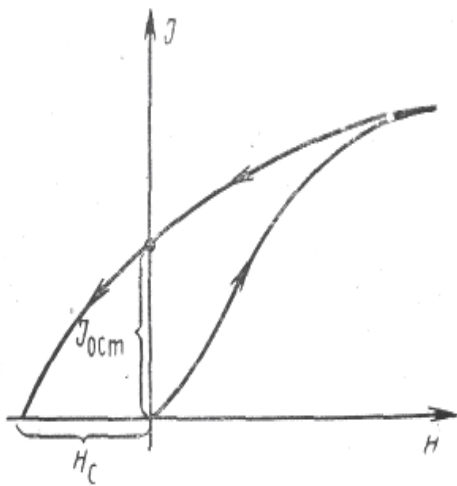


Рис.1.3.1. Зависимость намагниченности  $J$  ферромагнитных пород от напряженности поля  $H$

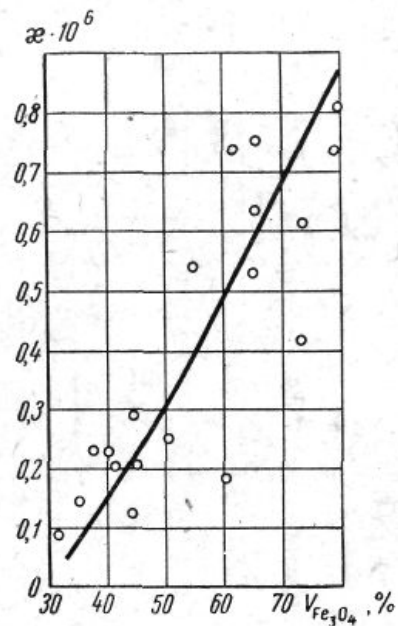


Рис.1.3.2. Зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  от объемного содержания магнетита  $V$

Магнитная проницаемость диамагнитных минералов колеблется в пределах 0,999836 – 1,0, парамагнитных - в пределах 1 – 1,0064. Ферромагнитных минералов в природе значительно меньше, магнитная проницаемость их превышает 1,0064.

Изменение в породе процентного соотношения диамагнитных и парамагнитных минералов составляющих породу, имеющих  $\mu \approx 1$ , не вызывает существенных изменений магнитной проницаемости породы. Наибольшее

значение  $\mu$  имеют ферромагнитные минералы, в основном магнетит, у которого магнитная восприимчивость достигает 3–4. Это обуславливает четкую связь между объемным содержанием магнетита в рудах и их магнитной восприимчивостью (рис. 1.3.2.)

Магнитная проницаемость  $\mu$ , следовательно, магнитная восприимчивость горных пород зависит от напряженности магнитного поля: для ферромагнетиков (например, титаномагнетита) она с ростом напряженности  $H$  постепенно увеличивается до определенного максимума, а затем убывает, для парамагнетиков (например, хлорит) – уменьшается. В переменных магнитных полях возникают потери магнитной энергии – переход ее в тепловую энергию.

Некоторые ферромагнетики обладают ярко выраженными магнитострикционными свойствами. При намагничивании таких пород происходит их относительное удлинение (например, магнетит, железо) или укорачивание (например, никель). Эти деформационные изменения приводят к изменению существующих остаточных напряжений или их формированию, которые в свою очередь приводят к изменению прочности материала.

Результаты измерений магнитной проницаемости горных пород и минералов приведены в табл. 1.3.2. Как видно из данных таблицы, магнетит и пирротин, а также породы, в которые входят эти минералы, имеют магнитную проницаемость, отличную от единицы. Магнитная проницаемость возрастает и становится постоянной, если магнитный минерал или порода намагничиваются при насыщении данного минерала.

Магнитная проницаемость пород, в которые входят магнитные минералы, возрастает с увеличением содержания магнитного минерала в горной породе. При увеличении температуры магнитная индукция уменьшается и, следовательно, уменьшается магнитная проницаемость ферромагнетика. Это объясняется тем, что магнитное поле стремится установить все домены и магнитные моменты атомов по направлению магнитного поля, а тепловое движение стремится разрушить этот порядок.

Таблица 1.3.2- Значения относительной магнитной проницаемости некоторых минералов и пород [45]

№ образца	Минерал, порода	Относительная магнитная проницаемость
1	Железистый кварцит	1,05
2	Магнетит	1,755
3	Пирротин	1,027
4	Сфалерит	0,9998
5	Кварц	1,0001
6	Кварцит безрудный	0,9999
7	Железистый кварцит	1,00022
8	Гранит	1,000
9	Железистый кварцит обожженный	1,3876
10	Железистый кварцит намагниченный	1,4417

При некоторой температуре (точка Кюри) магнитная проницаемость приближается к единице. Интересно заметить, что под действием магнитного поля земли ферромагнитные минералы после нагрева снова намагничиваются. Окислы железа, например FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, после нагревания намагничиваются и их магнитная проницаемость увеличивается. Происходит, по-видимому, их восстановление до магнетита с соответствующей перестройкой структуры. При такой перестройке значительно увеличивается электропроводность железосодержащих минералов и пород.

Таким образом, намагничивая данную породу или минерал, можно достигнуть увеличения их магнитной проницаемости или нагреванием

минералов и пород можно добиться уменьшения величины их магнитной проницаемости.

Изменение магнитных свойств минералов и горных пород, особенно железосодержащих руд приводит к изменению их механических свойств и структурного состояния. Поэтому для исследования показателей разрушения горных пород необходимы знания характеристик их магнитных свойств и закономерностей изменения этих характеристик.

#### 1.4. Физические основы разупрочнения горных пород электромагнитным воздействием

Одним из способов разупрочнения крепких горных пород и руд, является электротермический способ. Электротермическими называют способы разупрочнения или разрушения горных пород, в которых энергией электромагнитных волн или электрического поля нагревают определенный объем породы. Нагретая горная порода при расширении приводит к растрескиванию окружающей породы. Электротермические способы применяют в различных технологических операциях: для разрушения кусков породы, для отбойки блоков и кусков породы от массива, для ослабления прочности породы в массиве и для различных других целей; эти способы комбинируют с другими, например, с механическими [12].

Электротермическое разрушение включает в себе ряд процессов, протекающих в определенной последовательности и приводящих, в конечном счете, к разрушению породы: в породу вводят электромагнитную или электрическую энергию и концентрируют ее в заданном объеме.

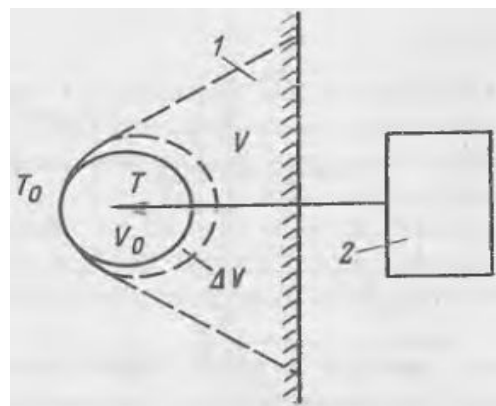


Рис.1.4.1. Схема электротермического разрушения горных пород: 1-массив породы; 2-генератор электромагнитной энергии;  $V_0$  -рабочее тело;  $T$ -температура рабочего тела;  $\Delta V$  -объем расширения рабочего тела;  $V$ -отбитый (разрушенный) объем породы) [12]

Электромагнитная энергия преобразуется породой в

тепло, в результате чего упомянутый объем породы расширяется и разрушает окружающую его породу (рис. 1.4.1.) В электротермических способах разрушения горная порода выступает в качестве преобразователя энергии – электромагнитной в тепловую, а тепловой – в механическую, а также–инструмента, производящего разрушение.

Горные породы занимают широкий диапазон на шкале электропроводности твердых тел: от минералов и пород с удельной электропроводностью  $g_n \sim 10^3 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , близких к проводникам, например магнетит, халькопирит и т.п., до минералов и пород, приближающихся к диэлектрикам с электропроводностью  $g_{II} \sim 10^{-12} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ , - мрамор, безрудный кварцит и т.п. Поглощение электромагнитной энергии породой определяется ее электропроводностью: для низких частот электромагнитного поля и для электрического поля количество выделившейся в породе тепловой энергии определяется законом Джоуля Ленца[12]:

$$W = \int_0^{t_k} g_{II} E^2 V_1 dt \quad (1.3.1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;  $V_1$  - объем породы, занятый полем;  $t_k$  - время действия электрического поля в породе.

На высоких частотах заметную роль играют механизмы поляризации и релаксации, что учитывается в следующей формуле

$$W = \int_0^{t_k} \epsilon_a \omega E^2 V_1 \text{tg} \delta dt, \quad (1.3.2)$$

где  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость породы);  $\omega$  - круговая частота электромагнитного поля;  $\text{tg} \delta$  - коэффициент потерь.

Формула (1.3.2) является аналогом уравнения (1.3.1), но в выражении (1.3.2) учитывается, что электропроводность породы при увеличении частоты



электромагнитного поля увеличивается, точнее – увеличивается поглощение породой электромагнитной энергии.

Диэлектрическая проницаемость породы частично связана с ее электропроводностью: у пород с высокой электропроводностью диэлектрическая проницаемость достигает  $10^2 - 10^3$  относительных единиц, а у диэлектрических пород – не превышает 5-7.

Значительные вариации электрических свойств горных пород требуют применения электромагнитного поля в широком диапазоне частот – от 50 до  $10^{13}$  Гц, что позволяет для каждого типа пород подобрать частоту, обеспечивающую концентрацию энергии в заданном объеме породы.

Закон сохранения энергии электромагнитного поля в породе (закон Умова-Пойнтинга) для случая разрушения породы записывается в следующем виде

$$-t \int_S [EH] ds = \int_V \left( \frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV + t \int_V g_{II} E^2 dV, \quad (1.3.3)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля электромагнитной волны;  $S$  – поверхность, через которую электромагнитная волна вводится в породу;  $V$  – объем породы, в котором поглощается электромагнитная волна, вошедшая в породу.

Рассмотрим волну, введенную в породу. В уравнении (1.3.3) составляющая  $t \int_S [EH] ds$  равна энергии, отдаваемой генератором, поэтому перед данным выражением стоит знак минус.

Выражение

$$\frac{1}{2} \int_V (\epsilon_a E^2 + \mu_a H^2) dV$$

содержит энергию электрического  $\epsilon_a E^2 dV / 2$  и магнитного  $\mu_a H^2 dV / 2$  поля в породе, расходуемую на деформацию вещества в электромагнитном поле, т.е. это по существу механическая энергия деформации. Первую величину

называют энергией электрострикции, вторую – магнитоэлектрики. Отметим, что электромагнитоэлектрика не зависит от времени ввода электромагнитной волны в породу. При длительном времени ввода энергии в породу, что характерно для электротермических способов разрушения, этим слагаемым можно пренебречь по сравнению со вторым, увеличивающимся пропорционально времени ввода энергии в породу, тем более, что численное значение этой величины даже при значении электрической напряженности, приближающейся к величине электрической прочности породы, имеет значение порядка  $5 \times 10^3 \text{ Дж/м}^3$ , а этой энергии достаточно лишь для разрушения объема породы не более  $10^{-3} \text{ м}^3$ .

Выражение  $t \int_V g_i E^2 dV$  представляет собой тепло Джоуля – Ленца, т.е. аналог формулы (1.3.1). Это тепло выделяется при поглощении породой энергии электромагнитной волны. В общем, из уравнения (1.3.3) следует, что электромагнитная энергия преобразуется породой в тепловую и механическую, причем, последней при длительном времени действия генератора, излучающего электромагнитную энергию в породу, можно пренебречь, поэтому вместо уравнения (1.3.3) можно записать:

$$-N = t \int_V g_i E^2 dV, \quad (1.3.4)$$

где  $\int_S [EH] dS = N$  – мощность генератора излучения.

Вся электромагнитная энергия, введенная в породу, переходит в тепловую. Нагретый объем породы расширяется, создавая в породе растягивающие напряжения, которые развивают критические трещины, что, в конечном счете, может привести к разрушению породы. Для того, чтобы процесс разрушения был успешным, необходимо выполнить ряд условий, указанных ниже.

Нагретый объем породы  $V_0$  при расширении испытывает реакцию  $P$  со стороны окружающей его породы, причем окружающая порода препятствует расширению объема  $V_0$ , создавая на его поверхности сжимающую нагрузку.

При расширении под нагрузкой  $P$  объем породы  $V_0$  производит работу  $A$ . Поэтому указанный объем называют “рабочим телом”. Работа  $A$  расходуется на разрыв связей в породе, на прорастание трещин; в конечном счете – на разрушение породы. Работа рабочего тела определяется по формуле [46].

$$A = \beta p V_0 T - p^2 V_0 / (2Y_0), \quad (1.3.5)$$

где  $\beta$  - коэффициент объемного теплового расширения породы;  $T$  - среднее значение прироста (разности между температурой в объеме  $V_0$  и температурой окружающей породы) температуры в объеме  $V_0$ ;  $Y_0$  - объемный модуль упругости породы.

Положив температуру окружающей породы  $T_0$  за начало отсчета, будем для простоты записи вместо  $T - T_0$  записывать эту разницу как  $T$ . Объемный модуль упругости породы

$$Y_0 = Y / [3(1 - 2\mu)] \quad (1.3.6)$$

где  $Y$  - модуль Юнга. Среднюю разность температуры в объеме  $V_0$ , для краткости – среднюю температуру рабочего тела, определяют как

$$T = Nt / (cm V_0). \quad (1.3.7)$$

Величина объема рабочего тела определяется режимом ввода энергии в породу. В выражении (1.3.5) слагаемое  $\beta p V_0 T$  определяет работу, производимую рабочим телом при его полном расширении. Полному расширению рабочего тела препятствует нагрузка  $P$  на него от окружающей породы, поэтому  $V_0$  расширяется лишь частично. Слагаемое  $p^2 V_0 / (2Y_0)$  в уравнении (1.3.5) определяет работу, идущую на деформацию объема  $V_0$ , при его расширении под нагрузкой  $p$ . Из выражения (1.3.5) следует, что при  $p = 0$   $A = 0$ .

При

$$p_0 = 2\beta TY_0 \quad (1.3.8)$$

$A = 0$ , т.е. при перегрузке, когда  $p \geq p_0$ , рабочее тело работы не производит и вся энергия расходуется на деформацию самого рабочего тела  $V_0$ .

Из выражения (1.3.5) вычислив

$$\partial A / \partial p = \beta V_0 T - p V_0 / Y_0 = 0 \quad (1.3.9)$$

получим оптимальное значение нагрузки на рабочее тело:

$$p_{\text{опт}} = \beta T Y_0$$

При оптимальной нагрузке на рабочее тело, равной  $p_{\text{опт}}$ , оно производит максимальную работу  $A_{\text{max}}$ , которая определяется из уравнения (1.3.5) после подстановки значения  $p_{\text{опт}}$  в уравнение (1.3.5):

$$A_{\text{max}} = \beta^2 T^2 V_0 Y_0 / 2 \quad (1.3.10)$$

Из сказанного понятно, что нагретый объем породы преобразует тепловую энергию в механическую. К.п.д. такого преобразования энергии

$$\eta = A / W \quad (1.3.11)$$

Поскольку работа, производимая рабочим телом, изменяется от нуля до максимальной величины  $A_{\text{max}}$ , то соответственно меняется и  $\eta$ . Максимальное значение  $\eta$  достигает при  $A_{\text{max}}$ . Для определения максимальной величины  $\eta_{\text{max}}$ , используют  $A_{\text{max}}$  из выражения (1.3.10), а энергия  $W$ , затраченная на нагревание рабочего тела  $V_0$  до температуры  $T$  определяется формулой

$$W = cmV_0T$$

Подставляя значения  $A_{\text{max}}$  и  $W$  в формулу (1.3.11), получаем:

$$\eta_{\max} = \beta^2 T Y_0 / (2cm) \quad (1.3.12)$$

Из формулы (1.3.12) следует, что для увеличения  $\eta_{\max}$  целесообразно увеличивать температуру рабочего тела  $T$ , т.е. следует увеличивать концентрацию энергии в рабочем теле.  $\eta_{\max}$  получается большим для упругих, плотных пород, у которых  $\beta$  и  $Y_0$  имеют высокие значения.

В общем виде производительность разрушения породы определяется из закона сохранения энергии - работа, совершаемая рабочим телом, расходуется на преодоление связей (прочности) породы:

$$\beta_p V_0 T - V_0 p^2 / (2Y_0) = \sigma^2 k V / Y \quad (1.3.13)$$

$$J_c = \sigma^2 k V / Y \quad (1.3.14)$$

где  $J_c$  - энергия связи в объеме породы  $V$ ;  $\sigma$  - предел прочности породы на растяжение;  $k$  - коэффициент пластичности породы. Из уравнения (1.3.13) определяют величину отбиваемого объема породы

$$V = \frac{Y}{\sigma^2 k} \left[ \beta p V_0 T - \frac{V_0 p^2}{2Y_0} \right] \quad (1.3.15)$$

Из выражения следует, что максимальный отбитый объем может быть получен только при максимальной работе  $A_{\max}$ , определяемой по уравнению (1.3.10). Поэтому подставив величину  $A_{\max}$  в выражение (1.3.15) получим значение максимального отбитого объема породы:

$$V_{\max} = \beta^2 T^2 V_0 Y^2 / [6 \sigma^2 k (1 - 2\mu)] \quad (1.3.16)$$

Удельной энергоемкостью разрушения породы (или короче - энергоемкостью) называют удельный расход энергии на разрушение единичного объема породы:

$$q = W / V \quad (1.3.17)$$

Очевидно, что минимальная энергоемкость разрушения породы достигается при максимальной производительности, когда  $V = V_{\max}$ . Введя в уравнение (1.3.17) значение  $W$  и  $V_{\max}$  соответственно, из (1.3.11) и (1.3.16), получим общее выражение для минимальной энергоемкости разрушения породы:

$$q_{\min} = 6ct \sigma^2 k(1-2\mu) / (\beta^2 TY^2) \quad (1.3.18)$$

Для получения конкретных значений  $V_{\max}$  и  $q_{\min}$  необходимо выразить величины  $V_0$  и  $T$  как функцию мощности источника энергии, времени ввода энергии, учитывая ее распределение в породе. Такую конкретизацию можно выполнить для конкретного процесса разрушения. Анализируя выражения для  $V_{\max}$  и  $q_{\min}$  можно сделать следующие выводы: рост концентрации энергии в рабочем теле приводит к увеличению производительности разрушения и уменьшению энергоемкости разрушения породы; поскольку для более прочных пород отношение  $Y/\sigma$  больше, чем для менее прочных, то из формул (1.3.16) и (1.3.18) следует, что эффективность электротермического разрушения выше для более прочных пород, в отличие от механического разрушения, для которого эффективность уменьшается при увеличении прочности породы.

## 1.5. Выводы

1. Наиболее сильное воздействие на электрические и магнитные свойства минералов и горных пород оказывает температура. Изменяя температуру породы, можно изменить ее электрические и магнитные свойства до определенной величины.

2. Наибольшие значения диэлектрической проницаемости присущи породам, в состав которых входят рудные минералы. Диэлектрическая проницаемость на низких частотах всегда увеличивается при переходе от монокристалла к поликристаллу и от чистого поликристалла к более разнородному.

3. При некоторой температуре, под действием магнитного поля, ферромагнитные минералы после нагрева снова намагничиваются и их магнитная проницаемость увеличивается, при этом происходит перестройка структуры магнетита, и увеличивается электропроводность железосодержащих минералов и пород.

4. Изменение магнитных свойств минералов и горных пород, особенно железосодержащих руд приводит к изменению их механических свойств и структурного состояния, что необходимо учитывать при воздействиях физических полей.

Анализ результатов выполненных исследований влияния физических полей на механические свойства горных пород показали не достаточную изученность неоднородности руд и анизотропии свойств породобразующих минералов, что не позволило выявить оптимальные виды и режимы внешнего физического воздействия для целенаправленного изменения свойств.

В связи с этим для решения данной проблемы в работе, с целью разработки физико-технических основ целенаправленного изменения свойств крепких полиминеральных руд в процессах их переработки, обеспечивающее повышение выхода полезных компонентов, уменьшение энергозатрат в процессе измельчения, предусматривается решения следующих задач:

- Анализ современного состояния проблемы целенаправленного изменения свойств полиминеральных крепких руд при их подготовке к обогащению;
- Оценка влияния воздействия различных физических полей на механические свойства горных пород;

- Экспериментальное определение структурного состояния и исследование механизма изменения свойств полиминеральных руд и горных пород;
- Обоснование принципов целенаправленного изменения свойств руд и минералов;
- Разработка рекомендаций по целенаправленному изменению механических свойств трудно измельчаемых руд для их эффективного разупрочнения.

## **ГЛАВА 2. ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ.**

### **2.1. Изучение влияния высоких температур на прочностные показатели горных пород.**

Эффективность в области рационального применения электрофизических, термических и термомеханических способов разрушения горных пород во многом определяются физико-механическими свойствами последних и в первую очередь прочностными, упругими и вязко-упругими свойствами. При этом в расчетах участвуют наряду с абсолютными значениями свойств также и их температурные зависимости [10].

Сопrotивляемость горных пород разрушению под действием различных силовых полей, характеризуется прочностью при одноосном сжатии, растяжении, сдвиге, изгибе.

Способность горных пород деформироваться под воздействием нагрузки определяется через количественные характеристики- параметры упругости: модуль упругости  $E$ , модуль сдвига  $G$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Значения прочностных показателей зависят от пористости, микро и макротрещиноватости, прочности составляющих горные породы минералов и связей между ними. Эти же факторы определяют и прочностные свойства горных пород в зависимости от температуры.

В работе [3], приведены результаты исследования изменения механических свойств (прочности) некоторых рудных материалов после



воздействия на них мощных полей сверхвысоких частот (СВЧ). В качестве объектов изучения были взяты образцы сульфидных медно-никелевых руд Норильского месторождения.

В процессе испытания образцов горных пород при высоких температурах, важным вопросом, является выбор рационального времени выдерживания нагретого до определенной температуры образца в печи, с целью создания равномерного распределения температуры внутри него. [10] Проведенные экспериментальные исследования показали, что временная зависимость прочности на сжатие, нагретых до определенной температуры образцов пород, изменяется резко (до 30-50%) в начальный период нагрева (до 20-30 мин); при дальнейшем нагревании величина прочности почти не изменяется. Результаты экспериментов показывают, что характер изменения прочностных свойств горных пород не является общим для всех типов пород. 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, совпадает.

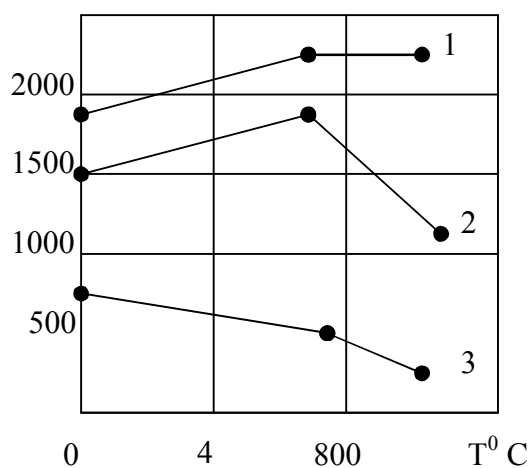
Изучение влияния высоких температур на прочностные показатели позволяет разделить все горные породы по характеру температурных зависимостей на группы: породы, в которых с увеличением температуры прочностные показатели возрастают до некоторого максимума, а затем снижаются; породы, в которых с увеличением 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 100-160<sup>0</sup> С) обычно также наблюдается некоторое снижение прочностных показателей.

К первой группе, например, относятся кварцит, песчаник, серпентинит; ко второй – известняк, осерненные руды, апатитовая руда и др. Испытания пород на твердость при изменении температуры от 20 до 400-600<sup>0</sup>С показали,

что твердость кварцита, кварцевого песчаника, микроклинового гранита несколько возрастает, а твердость микрогаббро почти не изменяется. Было установлено также, что относительное увеличение твердости мономинеральных пород (Шокшинский кварцит) несколько выше по сравнению с полиминеральными [10]. Из рис 2.1.1. видно, что для пород первой группы, характерна «критическая» температурная область, в которой прочностные показатели достигают наибольшего значения. Так, для песчаников предел прочности на растяжение при изменении температуры до  $800^{\circ}\text{C}$  возрастает примерно в 1,5 раза по сравнению с комнатной, а затем снижается. Причем резкое возрастание прочности наблюдается при температуре  $600-800^{\circ}\text{C}$ .

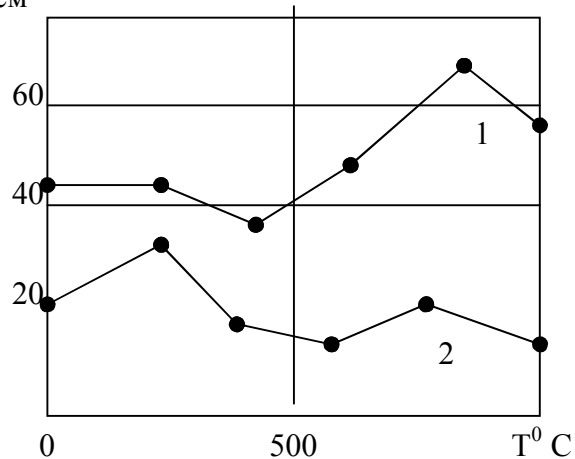
При еще более высоких температурах в породах возникают пластические деформации, приводящие к разрушению. Одним из факторов, указывающим на пластический характер разрушения, является отсутствие при разрушении характерного треска и отскакивания кусков.

$\sigma_{сж}, \text{кГ/см}^2$



а)

$\sigma_{р}, \text{кГ/см}^2$



б)

Рис.2.1.1 Графики температурных зависимостей изменения пределов прочности на сжатие (а) и растяжение (б): 1- песчаник; 2- габбро; 3- мрамор [10].

У второй группы пород снижение прочности при нагреве может быть частично объяснено химическими превращениями или наличием слабоустойчивых к нагреву примесей. Так, например, известняк, состоящий в

основном из  $\text{CaCO}_3$ , теряет прочность вследствие разложения и выделения  $\text{CO}_2$ , т.е.  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ .

Наличие примесей серы в известняках приводит к снижению прочности даже при нагревании до 130-150 °С (табл. 2.1.1).

Таблица 2.1.1 - Изменение значения предела прочности известняка на сжатие при нагреве [10]

Порода	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Пористость%	Предел прочности (кГ/см <sup>2</sup> ) при температуре 150°	
			Сжатие $\sigma_{сж}$	Растяжение $\sigma_p$
Известняк осерненный крепкий	2,49	5,36	270	90
Известняк неосерненный крепкий	2,72	4,0	796	461
Известняк серый крепкий неосерненный полосчатый, // слоистости	2,51	5,95	357	>20
Известняк серый крепкий осерненный полосчатый,	2,38	8,41	248	>20

// слоистости				
---------------	--	--	--	--

Большую роль в снижении прочностных показателей пород при нагреве играет также естественная пластичность пород, препятствующая возрастанию пределов прочности и развивающаяся под действием высоких температур. Установлено, что характер развития пластических деформаций в мраморе при нагреве соответствует характеру изменения упругости в этом же интервале температур.

На характер изменения прочностных характеристик горных пород при высоких температурах влияют внешние и внутренние факторы, среди которых определяющими являются минералогический состав, свойства структурных связей и условия залегания. Выделить же какой-то один определяющий фактор в большинстве случаев даже для пород одного типа невозможно. Природа изменения прочности пород с повышением температуры зависит от их структурных особенностей, термостойкости минералов и цементов, составляющих породу, и других признаков.

Для поликристаллических пород механизм уменьшения прочности при нагреве можно объяснить изменением роли различных факторов в структуре при повышении температуры. Считая, что при нагреве горных пород прочность их изменяется в зависимости от упрочнения или разупрочнения минералов и их границ, весь цикл нагрева можно разделить на три области с граничными начальными температурами  $T_0$ ,  $T_1$  и  $T_2$ . Согласно результатам многочисленных опытов каждая из областей может быть охарактеризована следующим образом:

первая температурная область ( $T_0$ - $T_1$ ) – температурная зависимость прочности пород определяется термостойкостью минералов;

вторая температурная область ( $T_1$ - $T_2$ ) – температурная зависимость прочности пород определяется состоянием границ между минералами;

третья температурная область ( $T_2 \rightarrow \infty$ ) – характер изменения прочности пород определяется изменением прочности минералов.

На основе этой классификации можно предположить о возможном характере изменений прочностных показателей различных типов горных пород.

Если изменение прочности породы при нагреве рассматривать с учетом этой гипотезы, то породы, в которых прочность составляющих минералов резко падает в первой температурной области, должны разрушаться уже при относительно небольшой температуре нагрева, при этом границы между минералами оказывают очень слабое сопротивление. Подобным механизмом можно, например, объяснить уменьшение прочности при нагреве известняков, в которых при сравнительно небольших температурах нагрева происходит разложение минералов.

Если же прочность пород при нагреве до температур, соответствующих границе первой температурной области, не уменьшилась, а составляющие минералы обладают высокой термостойкостью, то при дальнейшем повышении температуры, т.е. во второй температурной области, характер изменения прочности будет определяться в основном состоянием границ между минералами. Для пород, прочность которых в поле высоких температур определяется факторами, соответствующими второй температурной области, характерны следующие явления. При увеличении температуры происходит тепловое расширение минералов, имеющих по различным кристаллографическим направлениям неодинаковые значения коэффициента линейного теплового расширения. Объемное расширение минералов приводит к уменьшению расстояния между границами отдельных минералов и к увеличению их взаимодействия. Прочность связей в этом случае возрастает, поэтому прочностные свойства горных пород также увеличиваются до определенного предела. Одновременно с этим анизотропия минералов приводит к постепенному развитию релаксационных явлений на границе между минералами. Неравномерно возрастая с увеличением температуры, эти явления на определенном этапе становятся основными и приводят породу к разрушению. Влияние же теплового колебания атомов при этих температурах еще мало, чтобы нарушить связи внутри минералов.

Подобный механизм определяет характер изменения прочности, например, для гранитов и кварцитов. Для цементированных же пород механизм, объясняющий характер изменения температурной зависимости, гораздо сложнее.

Влияние охлаждения на прочность предварительно нагретых пород представляет большой практический интерес, так как характерен для термомеханических способов разрушения.

Различают следующие случаи изменения прочности предварительно нагретых пород при последующем их охлаждении: 1) охлаждение на воздухе; 2) охлаждение в воде.

Установлено, что медленное охлаждение на воздухе предварительно нагретой породы заметно не снижает достигнутого ею в процессе нагрева увеличения прочности. Это можно объяснить тем, что возросшая при нагреве связь между минералами частично сохраняется и в постепенно охлажденной породе.

При быстром охлаждении пород, и особенно при охлаждении в воде происходит следующее явление. Резкое охлаждение нагретой породы, находящейся в напряженном состоянии, приводит к мгновенному («динамическому») сжатию минералов в поверхностных слоях. При этом неоднородность напряженного поля усиливается, следствием чего является разрыв межкристаллических связей, т.е. появляется микротрещиноватость, снижающая прочностные свойства пород.

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.

Адсорбционная жидкость (вода) проникает через слабо развившиеся микротрещины на поверхностном слое вглубь породы и производит расклинивающее действие, тем самым ослабляя межмолекулярные связи между поверхностями раздела. Образовавшиеся, при резком охлаждении,

микротрещины, в совокупности с расклинивающим и адсорбционным действием воды, приводят к значительному снижению прочности пород.

Эксперименты показывают [55], что при резком охлаждении предварительно нагретых до температуры  $600^{\circ}\text{C}$  пород водой прочностные показатели их снижаются до двух раз и более.

Следует отметить, что во время взаимодействия воды с нагретой породой наряду с физическим процессом ослабления прочности происходит химический процесс, приводящий к образованию щелочных растворов. С увеличением температуры нагрева различных пород (мрамор, гранит, гранодиорит и др.) образование растворов происходит быстрее.

К свойствам, характеризующим деформируемость горных пород, относятся упругость, текучесть, ползучесть и т.д. Упругость горных пород характеризуется: модулем упругости (модуль Юнга)  $E$ , представляющим собой коэффициент пропорциональности между действующим продольным напряжением и соответствующей ему относительной деформацией; модулем сдвига  $G$ , связующим касательные напряжения с деформацией сдвига; модулем всестороннего сжатия  $K$ , который является коэффициентом пропорциональности между величиной всестороннего сжатия и относительным уменьшением объема; коэффициентом Пуассона  $\mu$ , который пропорционален относительному удлинению и сокращению образца.

Показатели упругости горных пород связаны между собой следующими соотношениями:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (2.1.1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.1.2)$$

Упругость горных пород зависит в основном от упругости слагающих минералов, плотности, пористости и других факторов.

Упругость горных пород оказывает большое влияние на их разрушаемость, которая при термическом или электрофизическом воздействии

определяется величиной возникающих термоупругих напряжений. Эти напряжения в любой точке разрушаемого объема зависят от распределения температуры, формы тела и физических констант: модуля упругости  $E$ , коэффициента линейного расширения  $\beta$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ . При этом наибольший интерес, кроме теплопроводности, представляют собой модуль упругости и коэффициент линейного расширения. Обычно при расчете термоупругих напряжений считают, что физические свойства пород не зависят от температуры. В действительности это допущение можно считать справедливым при сравнительно небольшом интервале изменения температуры и то не для всех пород. Поэтому изучение упругих свойств горных пород при высоких температурах (и особенно в температурной динамике) имеет большое практическое и теоретическое значение [55].

Установлено, что изменение свойств упругости твердых поликристаллических тел связано с релаксационными явлениями внутри тела [32]. При этом считается, что на изменение упругих свойств поликристаллических тел, в частности модуля упругости  $E$ , влияют:

- изменение упругости собственно кристаллов, слагающих тело;
- релаксационные процессы на границе между кристаллами.

Теоретические исследования показывают, что при отсутствии в поликристаллическом теле каких-либо релаксационных явлений и других процессов на границе между кристаллами и в самих кристаллах изменение модуля упругости  $E$ , с повышением температуры будет носить линейный характер. Причем такое изменение модуля упругости предполагается до температур плавления. В связи с этим можно считать, что линейная зависимость изменения модуля упругости каждого минерала породы с повышением температуры должна вызывать также линейное изменение модуля упругости всей породы. Линейный характер зависимости модуля упругости от температуры для породообразующих минералов подтверждается экспериментами. В табл. (2.1.2.) приведены данные по изменению модуля



упругости для кварца (жильного) и микроклина в интервале температур от 20 до 500<sup>0</sup>С [10].

Следует отметить, что снижение модуля упругости в определенном диапазоне изменения температур (от 0 до 500<sup>0</sup> С) для одних пород носит линейный характер, а для других отклоняется от линейной зависимости.

Опыты показали, что начало релаксационных явлений в породах относится к определенной температуре нагрева. В экспериментах температура начала релаксационных явлений у большинства горных пород составляла 200-300<sup>0</sup>С. Одной из причин, обуславливающих появление релаксационных явлений в горных породах, может быть вязкое скольжение на границе между минералами. Механизм этого явления можно объяснить следующим. На границах между минералами поликристаллической породы существует переходный слой, расположение атомов в котором отличается от расположения их в двух граничащих минералах. Это позволяет считать горную породу, находящуюся в условиях нагревания, состоящей из двух компонентов, один из которых имеет истинно упругую природу, а другой ведет себя как вязкая среда. О поведении границ между минералами можно судить только на основании количественных наблюдений за изменениями модуля упругости и затухания ультразвука при повышении температуры.

Вязкое скольжение на границе между минералами при повышенных температурах приводит к уменьшению модуля упругости  $E$  до какого-то значения  $E_x$ . При охлаждении образцов многих пород это значение изменяется незначительно и обычно не возвращается к первоначальному. Значение модуля упругости  $E$  при последующем нагревании часто не меняется, что свидетельствует о переходе положения границ между минералами при вязком скольжении к равновесному состоянию. Ниже, в таблице показаны изменение модуля упругости минералов от температуры.

Таблица 2.1.2- Изменение модуля упругости минералов от температуры[10]

Температура нагрева, град, С	Микроклин $\rho=2,53 \text{ г/см}^3$		Кварц $\rho=2,65 \text{ г/см}^3$	
	$V_p$ , м/сек	$E \cdot 10^{-5}$ , кГ/см <sup>2</sup>	$V_p$ , м/сек	$E \cdot 10^{-5}$ , кГ/см <sup>2</sup>
20	5280	7,18	4920	6,41
200	4670	5,52	4880	6,30
300	4040	4,12	4470	5,30
400	3510	3,15	4030	4,25
500	3120	2,47	3530	3,31

На основании экспериментальных исследований по выявлению причин, вызывающих изменение модуля упругости горных пород при нагревании, можно заключить, что: линейная зависимость модуля упругости (минерал, мономинеральные породы) от температуры объясняется только изменениями температуры внутри минерала. Отклонение зависимости от линейной связано с появлением релаксационных процессов, которые приводят к пластическим изменениям на границе между минералами (полиминеральные породы).

## 2.2. Тепловое расширение неоднородных твердых тел.

При повышении температуры горных пород, на границах зерен возникают структурные термические напряжения вследствие различий коэффициентов теплового расширения и модуля Юнга различных минералов. Когда эти напряжения достигают максимальных значений, происходит разрыв междוזеренных связей, что приводит к тепловому деформацию расширения горных пород.

Термические структурные напряжения на границах зерен, можно определить при рассмотрении плоского контакта двух минеральных зерен [11].

$$\sigma_{c.m.} = (\beta_1 + \beta_2)\Delta T / (1/E_1 + 1/E_2), \quad (2.2.1)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициенты теплового расширения двух минеральных зерен, у одного из которых эта характеристика больше, а у другого – меньше,  $K^{-1}$ ;  $E_1$  и  $E_2$  – соответственно модули их упругости, Па;  $\Delta T$  – изменение температуры, К.

Напряжения, возникающие при повышении температуры увеличиваются только до определенного значения. Наибольшее их значение может достигать до предела прочности соответствующих горных пород (пределу прочности на растяжение или на сжатие).

В неоднородных горных породах описать теоретически напряженное состояние с учетом деформации теплового расширения сложно. При этом имеется возможность объяснить изменения напряжений лишь качественно.

Для объяснения теплового расширения гетерогенных горных пород, рассмотрим некоторый объем породы, который имеет возможность свободно расширяться во все стороны. Вследствие малости коэффициента теплового расширения минералов (порядка  $10^{-5} K^{-1}$ ), можно полагать, что изменение температуры не приводит к изменению объема породы, т.е. имеет место изохорный процесс и при этом внешняя работа не совершается.

Для термодинамической системы, где объем горной породы остается постоянной, уменьшение энергии считается равной полной работе. Поскольку, при постоянстве объема горной породы внешняя работа не совершается, и имеет место уменьшение свободной энергии, то можно предположить, что при этом совершаемая работа происходит внутри термодинамической системы.

Рассмотрим изохорно-изотермический процесс с точки зрения объединенного закона термодинамики, который имеет следующий вид:

$$TdS = dU$$

Для выше указанных процессов имеет место

$$dU = dF + d(TS) \quad (2.2.2.)$$

и закон термодинамики можно представить как

$$TdS = dF + TdS + SdT,$$

$$\text{отсюда} \quad dF = -SdT \quad dF = -\bar{s}V\gamma dT \quad (2.2.3.)$$

где  $F$ - свободная энергия, Дж;  $V$ -объем породы, м<sup>3</sup>;  $\gamma$ - плотность породы, кг/м<sup>3</sup>.

При изменении температуры системы часть свободной энергии расходуется на работу, совершаемую внутри горной породы. Это можно выразить в виде

$$dF = -VdA^* \quad (2.2.4.),$$

где  $A^*$  - работа, совершаемая в единице объема породы при повышении температуры, связанная с разрывами межзеренных связей за счет термических напряжений, Дж/м<sup>3</sup>.

Из выражения (2.2.3.), подставляя в (2.2.4.), получим

$$dF = -V\sigma_{cik}\omega_1 dT, \quad (2.2.5.),$$

где  $\sigma_{cik}$  - тензор структурных термических напряжений, Н/м<sup>2</sup>;

$\omega_1$ - коэффициент объемного теплового расширения породы, обусловленный разрывами в ней межзеренных связей структурными термическими напряжениями, К<sup>-1</sup>.

Приравнивая правые части выражений (2.2.2.) и (2.2.5), получим

$$\bar{s}\gamma = \sigma_{cik}\omega_1, \quad \omega_1 = \overline{s\gamma} / \sigma_{cik}, \quad \text{откуда} \quad (2.2.6.)$$

Из выражения (2.2.6.), следует, что показатель теплового расширения полиминеральных горных пород имеет определенное значение. Данный термодинамический показатель имеет качественный характер, т.е. при повышении температуры и когда отсутствуют фазовые переходы, энтропия изменяется монотонно. Плотность породы остается постоянной при изохорных процессах, тензор структурных термических напряжений меняется от нуля до предела прочности на растяжение или сжатие. Рассмотрев характер изменения величин  $s$ ,  $\gamma$  и  $\sigma_{cik}$  от температуры и в соответствии с (2.2.6.) следует, что при повышении температуры

коэффициент теплового расширения полиминеральных горных пород изменяется до некоторых значений при  $\sigma_{cik} < [\sigma_{np}]$  (где  $\sigma_{np}$  — предельное значение прочности), если  $\sigma_{cik} = [\sigma_{np}]$ . В случае, когда  $\sigma_{cik} = [\sigma_{np}]$ , происходит нарушение межзеренных связей, что приводит к скачкообразному уменьшению напряжений. Можно полагать, что микротрещины образуются одновременно на всех границах минеральных зерен. Где связи минеральных зерен наиболее слабые, структурные термические напряжения наибольшие, при некоторой температуре образуются микротрещины. При  $\sigma_{cik} = [\sigma_{np}]$ , и росте температуры на наиболее слабых границах минеральных зерен образуются микротрещины. Нарушение межатомных связей термическими напряжениями считается необратимым процессом, циклический нагрев и охлаждение неоднородных по минеральному составу горных пород могут существенно их разупрочнить, что хорошо подтверждается результатами экспериментов.

Коэффициент теплового расширения полиминеральных горных пород определяется микротрещинами на границах минеральных зерен. При дискретном тепловом расширении неоднородных горных пород, одновременно, каждое составляющее минеральное зерно будет расширяться равномерно. Можно отметить, что коэффициент объемного теплового расширения неоднородных горных пород будет складываться из двух составляющих:

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2, \quad (2.2.7.),$$

где  $\omega_2$  - коэффициент объемного теплового расширения полиминеральной горной породы за счет результирующего равномерного изменения объема минеральных зерен, слагающих породу,  $K^{-1}$ .

Первое слагаемое  $\omega_1$  является положительным как при нагреве, так и при охлаждении горных пород. Величина же  $\omega_2$  при нагревании пород - положительная, а при охлаждении может быть как положительной, так и отрицательной. Следовательно, горные породы при их охлаждении в

сторону от нормальной температуры могут, как расширяться, так и сужаться. Такие изменения зависят от того, какое из слагаемых в формуле (2.2.7.) является преобладающим. В процессе повышения температуры горных пород в сторону от их нормальной температуры они всегда расширяются, т.к., в этом случае  $\omega_1$  и  $\omega_2$  положительные.

### **2.3. Влияние СВЧ волн на механические свойства горных пород**

В процессе рудоподготовки механическое измельчение руды до размера частиц порядка десятков микрон, необходимое для дальнейшей флотации, является наиболее энергозатратным и дорогостоящим процессом в технологической цепи извлечения полезных компонентов, требующим 25 ÷ 40 кВт·ч электроэнергии на тонну переработанной руды. При этом КПД процесса механического измельчения составляет всего 5÷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 энергозатрат при разрушении 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.

Воздействие электромагнитных волн позволяет улучшить раскрываемость минеральных зерен и снижает энергозатраты при измельчении горных пород [15]. Для лучшего раскрытия зерен, ослабления межзеренных связей необходимо использовать особенность селективного воздействия электромагнитного поля на руды и пустые породы. Например, в термообработанной и охлажденной в воде железной руде крепость минералов

магнетит-кварц снижается до двух раз, а при последующем измельчении, термообработка вызывает повышение выхода готового класса на 25%. При увеличении выхода готового класса улучшается выборочное раскрытие минералов, которое, приводит к уменьшению количества сростков и содержания в них полезного компонента. Воздействие СВЧ-электромагнитных волн на окисленную железную руду, в течение 1- мин. приводит к нагреванию до температуры 200°C и обуславливает разупрочнение кварца и упрочнение рудных зерен. При этом повышается раскрываемость минералов, уменьшается время измельчения выхода готового продукта в два раза и увеличивается содержание железа в концентрате на 3% [13,14]. ВЧ электромагнитное воздействие на редкометалльные руды позволяет на 30% сократить время измельчения и увеличить выход полезного компонента в уртиках на 8—9%, а в лувритах – на 15 – 16%. В данном случае содержание полезного минерала в продуктивном классе повышается на 18% по сравнению с исходной рудой.

В работе [44] показано влияние мощного СВЧ излучения как технологии разупрочнения горных пород, изменяющие физико-механические свойства материалов. В этой работе приводятся результаты воздействия СВЧ- поля на горные породы, результаты исследования изменения механических свойств (прочности) некоторых рудных материалов после воздействия на них мощных полей сверхвысоких частот (СВЧ). В качестве объектов изучения были взяты образцы сульфидных медно-никелевых руд Норильского месторождения.

Разупрочнение или частичное разрушение минералов горных пород мощным СВЧ полем обусловлено с их нагревом. Из-за диэлектрических потерь энергия СВЧ волн поглощается породой и превращается в тепловую энергию, при этом температура горных пород увеличивается на  $dT$ .

$$dT = \frac{Pt}{cm} \quad (2.3.1)$$

где  $P$ – мощность СВЧ поля;  $t$ – время воздействия;  $C$ – удельная теплоемкость породы  $m$ - масса горной породы. В случае выбора частоты поля- 2,45 ГГц,

напряженностью 1 МВ/м и воздействия его в течение  $t=100$  мкс, нагрев минералов разных классов будет следующим:

- кварц, галит и другие неполярные  $dT=0,005$  К;
- полевые шпаты, асбест и другие полярные  $dT=0,5$  К;
- гетит, лимонит, шеелит–полупроводящие  $dT$  более 5 К;
- пирит, гематит, магнетит (проводящие)  $dT$  более 500 К.

Следовательно, проводящие и диэлектрические минералы существенно нагреваются в поле СВЧ, тогда как полупроводящие практически не нагреваются. Из-за малости проникновения в глубину диэлектриков СВЧ волн для нагрева необходимо использовать более высокие частоты. Максимальной частотой, используемой в СВЧ – энергетике, принята частота 2,45 ГГц. [44].

Технология СВЧ-обработки различных материалов уже отработана и применяется в промышленности (вулканизация резины, спекание керамики, сушка древесины, синтез новых материалов и т.д.). В горном деле есть свои особенности, связанные с высокой производительностью горных предприятий, с тяжелыми условиями работы оборудования, высокими требованиями на минимальность энергетических затрат и большого срока службы оборудования. В обычных СВЧ-печах, при лабораторных экспериментах и многих промышленных технологиях используется режим периодической загрузки определенной порции продукции в рабочую камеру, после чего на определенное время включается СВЧ-генератор. В горной промышленности такой циклический режим работы нежелателен. Это связано не столько с требованиями высокой производительности, сколько с необходимостью постоянного согласования СВЧ-генератора с загрузкой. Рассогласование (отражение электромагнитных волн от загруженной породой рабочей камеры) приводит к значительным потерям энергии и нарушению работы и даже выходу из строя мощных генераторов СВЧ волн. Эффективность СВЧ-технологий в горном деле определяется, прежде всего, наличием подходящих СВЧ-генераторов большой мощности с высоким коэффициентом преобразования энергии сети 50 Гц в энергию СВЧ-поля (80-90%).



В условиях нагревания в породах формируются термомеханические напряжения, развивается процесс испарения влаги, происходит релаксация остаточных напряжений, полиморфные и фазовые превращения, выгорание органических веществ [44]. Вследствие этого прочность пород с повышением температуры уменьшается в несколько раз (рис. 2.3.1.)

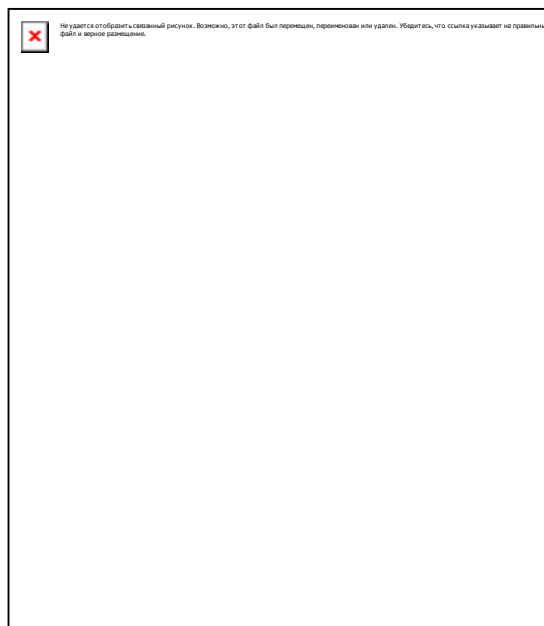


Рис.2.3.1. Зависимость предела прочности на растяжение от температуры для образцов железистого кварцита (1), гнейса (2), гарцбургита (3) и долерита (4) [44].

Значительное повышение времени выдержки  $t$  породы в поле СВЧ, которое обычно используется в лабораторных экспериментах, как будет показано ниже, нецелесообразно с энергетической точки зрения. Поэтому приведенные оценки  $dT$  близки к предельным значениям. Однако, когда речь идет о разупрочнении СВЧ–нагревом, имеется в виду не медленное и однородное повышение температуры, а резкое и неоднородное, при котором разрушающие термомеханические напряжения во много раз больше, а необходимые энергозатраты минимальные.

Для повышения температуры породы массой  $m$  на  $dT$  необходима энергия:

$$W = mcdT \quad (2.3.2.)$$

Так как типичное значение удельной теплоемкости минералов лежит в интервале  $700\text{--}800 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , то для нагрева одной тонны породы на  $100\text{К}$  необходимо энергия  $75 \text{ МДж}$  или  $20 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Несмотря на то, что СВЧ – технология относится к числу энергосберегающих и отличается большим коэффициентом ввода энергии в обрабатываемый материал (около  $0,7$  с учетом КПД генератора  $85\%$ ) [14], исходные энергозатраты составят около  $30 \text{ кВт} \cdot \text{час}$  на тонну породы, что сопоставимо с энергозатратами на ее измельчение чисто механическими средствами. В этой связи, СВЧ- воздействия для разупрочнения выгодна прежде всего для горных пород, содержащих небольшое количество (до  $10\%$ ) рудных минералов, когда на нагрев затрачивается не более  $3 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$  энергии, а на последующих операциях измельчения экономится  $10\text{--}20 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т}$ . Рассмотрим этот процесс более подробно.

Если воздействовать СВЧ–облучением на горную породу содержащий минералы металлов (пирит, никелит, манганит и т.д.) и пустые минералы (кварцит, кальцит, гранит и т.д.), то первые минералы обладают значительными потерями энергии, а вторые – относительно небольшими. При облучении СВЧ–полем рудные минералы нагреваются более интенсивно, в то же время пустая порода остается холодной. Градиент температуры уменьшается после некоторого времени облучения [44]. Для определения распределения температуры вблизи границы раздела фаз нужно решить уравнение теплопроводности для двухфазных сред. Если фаза 1 (рис.2.3.2.) поглощает энергию СВЧ-волн, а фаза 2 нет, то диффузионная длина  $L$  характеризует расстояние, на которое тепло из фазы 1 распространяется в фазу 2 за время  $t$ . Качественная картина распределения температуры в двухфазной среде с плоскими границами раздела фаз показана на рис.2.3.2.

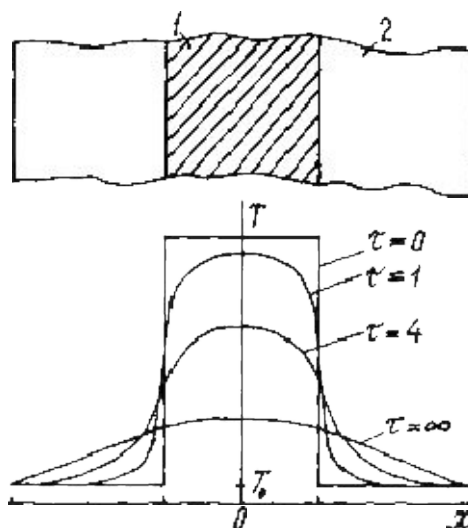


Рис.2.3.2. Распределение температуры в пластине, состоящей из внутренней поглощающей фазы 1 и наружной не поглощающей фазы 2, при мгновенном ( $t = 0$ ), импульсном ( $t = 1$  и  $4$ ) и статическом ( $t = \infty$ ) СВЧ нагреве[44].

При мгновенном нагреве фазы 1 импульсом длительностью  $t = 0$  повышенная температура создается только в этой фазе, а в фазе 2 она равна окружающей температуре  $T_0$ . В статическом случае температура выравнивается по обеим фазам. При импульсном нагреве распределение температуры у границы резко неоднородно, причем, чем меньше длительность импульса, тем больше градиент температуры.

Для уменьшения потерь тепла в пустой породе необходимо время нагрева рудного минерала делать по возможности малым – не более 1 мс. Это возможно только при использовании генераторов СВЧ очень большой мощности. Перепад температуры у границы раздела фаз при импульсном СВЧ-нагреве приводит к появлению значительных термомеханических напряжений, обусловленных разными тепловыми расширениями объемов. В работе [15] дан численный расчет механических напряжений в кальците с включениями зерен пирита диаметром 0,15 мм, нагреваемого импульсами СВЧ-поля разной длительности  $t$ .

Эффективность воздействия на горные породы СВЧ поле состоит в интенсивности передачи энергии электромагнитных волн на твердые материалы за короткое время. При этом существенно изменяется структурное состояние и показатели измельчаемости горных пород.

Детальные исследования процессов управления, прочностными свойствами горных пород, включая разупрочнение СВЧ-полем, проводились в Московском горном институте [13,16,39]. Испытывались железистые кварциты, содержащие около 45% магнетита, 10% гематита и 45% кварца. Образцы размерами 15x15x30 мм<sup>3</sup> облучались от генератора частотой 2,45 ГГц мощностью 0,5 кВт, изучались их помол и обогащение. Из-за небольшой мощности СВЧ-генератора нагревание образца было медленным – до 200<sup>0</sup> С за 50 с, 450<sup>0</sup> С за 3 мин. и до 900<sup>0</sup> С за 10 мин. В случае нагрева выше 900<sup>0</sup> С наблюдается динамическое разрушение, т.е. от образцов отделялись кусочки, поверхности которых, обычно, проходила по рудным минералам. Такое взрывоподобное разрушение пород обусловлено наличием значительного количества связанной воды и ее испарением. При резком снижении температуры раскаленных образцов в воде, образование микротрещин идет значительно быстрее, и этот процесс часто приводит к их разрушению. В соответствии с расчетами при повышении температуры на 1 К в зернах магнетита обычно возникают растягивающие термические напряжения до 0,17-0,23 МПа, в зернах гематита до 0,35- 0,40 МПа, а в кварце сжимающие напряжения 0,21-0,27 МПа. В случае повышения температуры на 100К напряжения могут превышать предел прочности минералов и тогда произойдет разрушение. Возникновение микротрещин, развивающихся в основном по границам зерен, наблюдается рентгеноструктурными исследованиями минералов руд. Образование трещин в минерале кварца происходит при более низких температурах, чем в рудных минералах. Данную особенность минерала следует учитывать при выборе оптимального режима СВЧ-воздействия для разупрочнения зерен магнетита и гематита.

Исследование выхода мелких фракций и анализ проб, подвергнутых СВЧ-воздействию, показали следующие данные. В стадии облучения СВЧ полем, фракции класса -0,074 мм имеет выход до 85% за 20 мин, а исходные необработанные пробы – за 40 мин. Результаты применения СВЧ технологии свидетельствуют об эффективном разупрочнении руды и об уменьшении энергоемкости измельчения.

Обогащение проб магнитной сепарацией в сильном магнитном поле выявило повышение качества концентрата при СВЧ-обработке по сравнению с необработанной рудой. На 11,6% увеличился выход концентрата и на 12,5% извлечение железа. При этом, наибольший эффект достигается на образцах, нагретых до 200, а не до 900<sup>0</sup> С. Следовательно, в работах ученых из РФ убедительно доказана необходимость подбора своего оптимального режима СВЧ-обработки для каждого конкретного вида горной породы, если мы имеем целью не только получить необходимые изменения ее параметров при минимуме энергозатрат, но и улучшить дальнейшую переработку [41,42]. Случайно взятый режим воздействия СВЧ-полем (частота, мощность, длительность) может не дать положительного результата. По приведенным расчетам для разрушения прочных пород типа гранита или известняка в стоячей электромагнитной волне мощность генератора должна быть не менее 50 кВт. При этом энергоемкость разрушения составит 3-7 МДж/м<sup>3</sup>, а производительность – до 30 м<sup>3</sup>/ч. Энергоемкость для пород типа песчаника, содержащих не менее 1% влаги, значительно ниже, так как пары воды создают в закрытых трещинах и порах давление до 20 МПа. В указанных работах рассмотрено разрушение пород применением СВЧ волн, направляемым электродом. Указано, что эффективность разрушения увеличивается в зависимости от величины квадрата мощности, а энергоемкость уменьшается пропорционально мощности излучения, и разрушение породы с помощью СВЧ-волн наиболее эффективна для крепких пород.

Отметим, что во всех перечисленных работах используются генераторы СВЧ недостаточно большой мощности, которые не могут обеспечить режим

резкого и неоднородного адиабатического нагрева многофазных сред. Режим же медленного нагрева, при котором температура успевает выровняться по зернам разных минералов, не является оптимальным как с точки зрения получения максимальных разрушающих напряжений, так и минимизации энергозатрат и улучшения раскрываемости извлекаемого компонента. В Институте геотехнической механики (ИГТМ) АН УР (г. Днепропетровск) совместно с Днепропетровским горным институтом и Днепропетровским университетом до 1991 г. велись интенсивные разработки технологии и аппаратуры для разупрочнения горных пород СВЧ-полем [41,42] и проводились эксперименты в этом направлении [41, 46]. Испытывалась главным образом железная руда Криворожского бассейна.

В частности [41] измерена прочность железной руды при нагреве СВЧ – полем и установлено ее значительное снижение. Сделан вывод о возможности использования электромагнитной энергии СВЧ для разупрочнения пород перед их механическим разрушением.

В работе [30] приведены данные по измерению диэлектрических и магнитных параметров ряда горных пород при воздействии СВЧ волн. Железосодержащие руды обладают высоким поглощением энергии СВЧ волн, связанным с содержанием магнетита. Существенный вклад в поглощение на диапазоне частот 0,915 -2,375 ГГц вносят магнитные потери. В условиях облучения СВЧ-полем 2,5 кВт отдельные породы (песчаник, окисленная гематитовая руда, магнетитовый роговик) разрушаются без дополнительного приложения механических усилий.

В работе [34] представлены экспериментальные результаты по ситовому анализу проб железных руд, нагреваемых СВЧ-полем до 300<sup>0</sup> С (плотность потока мощности 35-60 Вт/см<sup>2</sup>, время облучения 3 мин), и нагреваемых в муфельной печи до той же температуры не подвергнутых СВЧ обработке. Результаты показали, что при измельчении руды, нагретой в печи, по сравнению с исходной пробой, выход классов размером менее -0,1 мм практически не изменился, а в случае нагревания СВЧ-полем возросло

содержание фракции данного размера. При этом выход класса -0,074 мм увеличился на 6-10%. Более крупные фракции руды, нагретой в печи, оказались измельченными лучше, т.е., в них увеличился содержание средних фракций. При СВЧ-нагреве до той же температуры это различие проявляется в большей мере. Такие же изменения были выявлены и на пробах руды, нагревавшихся до температур – от 80 до 450<sup>0</sup> С. Установленные преимущества СВЧ-нагрева по сравнению с печным нагревом связываются с избирательностью воздействия СВЧ-волн на минералы и раскрытием зерен по плоскостям ослабления.

Измельчение руды, обработанной СВЧ-полем в разных режимах, показало, что с увеличением времени воздействия содержание классов мельче -0,16 мм в продукте измельчения закономерно возрастает. При этом для контрольного и обработанного продуктов различие по классу -0,074 мм достигает 25%. Наиболее полное раскрытие для данной породы достигается в классе -0,05 мм, что подтверждено данными, полученными при изучении под микроскопом.

Обработка руды в потоке СВЧ-мощности 35 Вт/см<sup>2</sup> в течение 1-10 мин позволяет повысить производительность мельницы по крупности 10-0 мм на 60%. Увеличение потока мощности дает возможность достичь тех же результатов.

Как указано выше, вследствие кратковременности воздействия достаточно мощных импульсов, одним из эффективных способов горных пород являются воздействия мощных электромагнитных излучений.

Результаты исследования процесса измельчения железных руд после СВЧ-поле обработки представлены в работе [61]. Пробы руды имели средние поперечные размеры 3 см и содержали гематит, магнетит и гетит. Источник энергии мощностью 3 кВт и частотой 2450 МГц обеспечивал нагрев проб до температуры 940<sup>0</sup>С. Сканирующим электронным микроскопом исследовался изменение микроструктуры проб при их обработке, а также проводился тонкое измельчение и ситовой анализ по методике Бонда. При анализе фотографий

проб, обработанных СВЧ-полем, выявлены микротрещины по границам зерен. При этом происходит снижение энергозатрат на измельчения порядка 3 кВт\*ч/т и облегчается дальнейшая сепарация. В случае повышения мощности магнетрона до 6 кВт энергозатраты на нагрев уменьшаются, обеспечивается экономия энергии на измельчения. В то время не были созданы более мощные генераторы, которые могли бы уменьшить общие энергозатраты на СВЧ-обработку и измельчение по сравнению без обработки.

В теоретической работе [56] правильность расчета СВЧ-нагрева руд проверялась экспериментом с искусственным композитом, содержащим кварц и 1-7% поглощающего халькопирита. Композит нагревался в СВЧ-печи мощностью 1 кВт в течение 120 с. Выяснено, что поглощаемая энергия линейно растет с увеличением содержания халькопирита, а также с увеличением размера его частиц, достигая максимума в районе 0,4 мм. Здесь же дан энергетический анализ СВЧ – разупрочнения.

Таблица 2.3.2 - Показатели извлечения в зависимости от времени облучения

Время облучения мин	Потери массы, %	Извлечение, %	
		Au	Ag
5	1,5	75	34
8	10,2	89	45
12	10,2	97	56
13	17,0	98	59
16	20,3	98	60

Если обрабатываемая руда содержит 2,5% массы поглощающего минерала (например, пирита), а создаваемые в ней термомеханические напряжения равны 50 МПа (скачок температуры на 200 К), то расход СВЧ-энергии при импульсном режиме обработки составит всего 0,8 кВт·ч на тонну породы.



Проведенные предварительные эксперименты по обработке железной руды мощными импульсами СВЧ показали, что при облучении дробленой породы импульсами миллиметровых волн (150 ГГц) мощностью 0,5 МВт и длительностью 1 мс наблюдается оплавление кусочков без их разрушения. Это связано с очень малой глубиной проникновения миллиметровых волн в проводящие среды.

#### **2.4. Выводы**

1. Эффективность в области рационального применения электрофизических, термических и термомеханических способов разрушения горных пород во многом определяются физико-механическими свойствами, в первую очередь, прочностными, упругими и вязко-упругими свойствами.
2. Изменение свойств упругости и прочности у разных пород носит различный характер, на величину изменения этих свойств влияют вид и режим воздействия физического поля.
3. В горных породах при изменении температуры, вследствие различия значений коэффициентов теплового расширения и модуля упругости минералов на границах минеральных зерен возникают структурные термические напряжения.
4. Перепад температуры у границы раздела фаз при импульсном СВЧ-нагреве приводит к появлению значительных термомеханических напряжений, обусловленных разными тепловыми расширениями объемов

## **ГЛАВА 3. СТРУКТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ.**

### **3.1. Параметры структурного состояния горных пород.**

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 позволяют обеспечить существенное уменьшение энергоемкости процесса измельчения. Механические характеристики горных пород при внешнем воздействии зависят от таких факторов, как состав и строения, так и вида самого воздействия.

Для детального исследования напряженно-деформированного состояния полиминеральной системы предлагается использовать понятие структурного состояния горной породы. Напряженное состояние структурных элементов и дефектность, в целом, характеризуют структурное состояние горной породы [45]. Экспериментальные данные показывают, что в отличие от многих твердых материалов, горные породы деформируются и разрушаются, имея ряд характерных особенностей. Эти отличия обусловлены структурной неоднородностью горных пород.

Для того чтобы разобраться в том, что происходит или произошло с горной породой в общем случае необходима информация об изменениях структурного состояния происшедших на всех уровнях. Используемые при

рассмотрении структурного состояния многокомпонентной системы параметры обычно классифицируют в соответствии с масштабным признаком.

В неоднородной среде, какой является горная порода, напряжения имеют стохастический характер. Обозначим  $\Delta F_{kl}$ , ( $k, l=1,2,3$ ) как проекцию на оси координат случайной силы.  $\Delta F_l$ -равнодействующая случайных сил, приложенных к площадке  $\Delta S_l$ , то средние напряжения по ним  $\bar{\sigma}_{kl}$  определяется как отношение:

$$\bar{\sigma}_{kl} = \frac{\Delta F_{kl}}{\Delta S_l}. \quad (3.1.1)$$

Таким образом, учитывая, что рассматриваемая среда (горная порода) неоднородна, что характерно также и для поля упругих напряжений, то в зависимости от выбора размера площадки  $\Delta S_l$  мы будем получать различные значения  $\bar{\sigma}_{kl}$ , которые будут иметь и различный физический смысл [45].

Для количественной характеристики структурного состояния горной породы (минерала) необходимо использовать специальные параметры. Если горную породу условно разбить на структурные составляющие: минеральные агрегаты и минеральные зерна, то для характеристики их напряженного состояния применяются следующие величины: напряжения первого рода – средние напряжения в представительном объеме горной породы; напряжения второго рода – средние напряжения в минеральном агрегате породы; напряжения третьего рода – 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. Учитывая, что горная порода характеризуется случайным хаотическим строением, значение напряжений в элементах структуры и текстуры также носят случайный характер. Если принять, что изменчивость напряжений подчиняется нормальному закону, то их значения можно характеризовать дисперсией и математическим ожиданием.

Классификация разномасштабных параметров, характеризующая горную породу, используется для разработки моделей, необходимых для описания физических процессов, протекающих в породе при различных видах внешнего воздействия. Здесь рассматриваются только параметры, характеризующие напряжение и деформацию рассматриваемых объемов и дефектность.

Если  $\Delta S_j$  принять как размер площадки с линейными размерами первого порядка малости, то согласно (3.1.1) получим величину напряжения первого рода  $\sigma_{kl}^I$ . Уменьшая размеры площадок до величины с линейными размерами второго порядка малости, получим случайные напряжения  $\sigma_{kl}^{II}$  второго рода и т.д.

Между напряжениями первого и второго рода существует соотношение

$$\sigma_{kl}^I = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta S_j} \int_{\Delta S_j} \sigma_{ij}^{II} dS_j. \quad (3.1.2)$$

Таким образом, макронапряжения в горной породе являются по существу напряжениями первого, текстурные и структурные аналогичны напряжениям второго, а локальные – напряжениям третьего рода.

Дефектная структура горной породы определяется концентрацией и распределением всевозможных дефектов, дислокаций в минеральных агрегатах. Под нарушением строения понимаются отклонение их кристаллической структуры от идеальной. Дефекты в минеральном зерне можно условно разделить на четыре группы: 1) точечные дефекты создаются искажениями в области, размеры которой сравнимы с межатомными расстояниями. Они нарушают лишь ближний порядок в кристаллах, ими могут

быть внедренные атомы, вакансии и т.д.; 2) линейные дефекты нарушают дальний порядок, протяженность дефектной области может быть порядка размера минерального зерна, к ним относятся дислокации и т.д.; 3) плоские дефекты имеют размеры кристалла в двух измерениях. К их числу относятся дефекты упаковки, границы блоков, межзеренные границы и т.д.; 4) объемные дефекты обусловленные отклонениями от периодичности кристаллической решетки минерала. К ним можно отнести блоки мозаики, двойниковые области, включения другого минерала. Заметим, что точечные дефекты, находящиеся в тепловом равновесии со структурой, рассматриваются как равновесные, другие же дефекты – неравновесные. Основные представления о точечных дефектах достаточно полно изложены [16].

Дислокации в кристаллах впервые были изучены с помощью электронных микроскопов и методами рентгеноструктурного анализа. В не нарушенном кристалле отражение рентгеновских лучей от атомных плоскостей должно происходить под строго определенными углами. В реальных кристаллах отражение происходит в достаточно широком угловом интервале, а интенсивность отраженного рентгеновского луча оказывается во много раз превосходящей по сравнению интенсивности для идеального кристалла. Эта особенность была объяснена мозаичностью строения – существованием областей кристаллической решетки (блоков) с квазисовершенной структурой, размером в несколько сотен ангстрем, разориентированных друг относительно друга на небольшой угол от нескольких минут до нескольких градусов. Блоки отделены друг от друга последовательностью краевых дислокаций. Дислокации характеризуются плотностью – числом дислокаций, пересекающих единицу площади. Одной из разновидностей нарушения является дефект упаковки – нарушение последовательности слоев плотнейшей упаковки атомов. Дефект упаковки можно рассматривать как удаление или внедрение одной плотноупакованной плоскости. Накопление деформационных дефектов упаковки может привести к появлению двойников.

К двумерным дефектам относится большое количество различных элементов структуры горных пород. В частности, двойниковая граница – граница раздела двух симметрично связанных частей минерального зерна – обычно образуется одинаковыми сетками одной и той же простой формы, если граница совпадает с плоскостью зеркального отражения. Если граница отклоняется от кристаллографической плоскости двойникования, она содержит в себе двойнивающие дислокации.

Дефекты минерального агрегата – совокупности зерен определенной парагенетической ассоциации, характеризуют отличие рассматриваемого объема от однородной сплошной среды. Нарушение структуры агрегата носит здесь в основном двумерный и трехмерный характер. К двумерным можно отнести межзеренные границы и трещины ( нарушение сплошности ), которые могут проходить как по зернам, так и по межзеренному пространству. К трехмерным – области появления новых минеральных фаз.

### **3.2. Принципы взаимодействия рентгеновского излучения с минералами.**

В основу изучения атомной структуры минералов положено явление дифракции в них рентгеновских лучей, электронов или нейтронов. Теория этого процесса, устанавливающая связь картины рассеяния с пространственным расположением атомов, для всех перечисленных излучений одинакова. Однако в определении структурных параметров и напряжений 3-порядка горных пород будет применяться рентгенографический метод.

При изучении структурного состояния твердых сред в рентгенографии используется монохроматическое рентгеновское излучение, с длиной волны в части спектра, соизмеримой с межатомным расстоянием данного материала.

Когда пучок рентгеновских лучей падают на скопление атомов, то их электронные оболочки будут взаимодействовать с падающей волной и рассеивают её в пространства [17] .

Направление распространения волны обычно задается вектором  $\bar{k}$ , модуль которого

$$|\vec{k}| = 2\pi / \lambda$$

где  $\lambda$  - длина волны.

При рассмотрении процесса рассеяния на группе атомов можно ограничиться статическим описанием процесса (без параметра времени), так как для анализа явлений важна, мгновенная картина дифракции. Это позволяет наглядно установить взаимные фазовые сдвиги, возникающие при интерференции рассеянных волн, поскольку сдвиги для монохроматического излучения зависят от пространственного расположения атомов и постоянны во времени.

Если две идущие в одном направлении волны рентгеновского излучения, отразившись от разных атомных слоев, интерферируют друг с другом и находятся в одинаковой фазе, то они складываются и дают волну с удвоенной амплитудой (рис. 2.1,а), а если, они – в противофазе, то гасят друг друга (рис. 2.1,б). В промежуточных случаях меняется амплитуда и фаза.

Следует заметить, что при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом возникает как упругое рассеяние, происходящее без потери энергии и изменения длины волны (образующее дифракционную картину), так и неупругое рассеяние, которое не содержит информации о структуре объекта и здесь оно рассматриваться не будет.

Дифракцию на минерале можно интерпретировать как «отражение» луча плоскостями кристаллической решетки под вполне определенными фиксированными углами падения и отражения. Это наблюдается потому, что «отражение» происходит лишь тогда (под тем углом), когда волны, рассеянные параллельными атомными плоскостями, оказываются в фазе и усиливают друг друга.

В этом случае разность хода при рассеянии от соседних плоскостей равна целому числу  $n$  длин волн  $\lambda$ :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta. \quad \text{где } n=1, 2, 3 \dots \quad (3.2.1)$$

Очевидно, что это условие может выполняться при нескольких фиксированных значениях угла  $\theta$ . При других же значениях угла «отражение» значительной интенсивности рассеянного излучения регистрироваться не будет.

Формула (3.2.1) - закон Вульфа – Брэгга, связывающий направление отражение рентгеновского монохроматического излучения, характеризуемое углом  $\theta$ , с межплоскостным расстоянием  $d_{hkl}$  в решетке ( $n$ -порядок отражения). Когда условие Вульфа-Брэгга не выполняется, то вследствие наличия в кристалле очень большого количества атомных плоскостей, разности фаз, приводит к полному гашению рассеянных пучков при любых углах, отличающихся от соответствующих условию рис.3.2.2. Формула Вульфа-Брэгга показывает, что дифрагированные пучки для данного  $d_{hkl}$  могут быть получены в монохроматическом излучении (т.е. при постоянной  $\lambda$ ) только за счет изменения ориентации кристалла, т.е. углов  $\theta$ , что можно сделать для единичного кристалла с помощью специального устройства (кристалльного гониометра), а в поликристаллическом образце (порошка) реализуется само собой. Аналогичная ситуация наблюдается при неподвижном кристалле – а в полихроматическом излучении, когда отражение возникает при подходящих значениях  $\lambda$ .



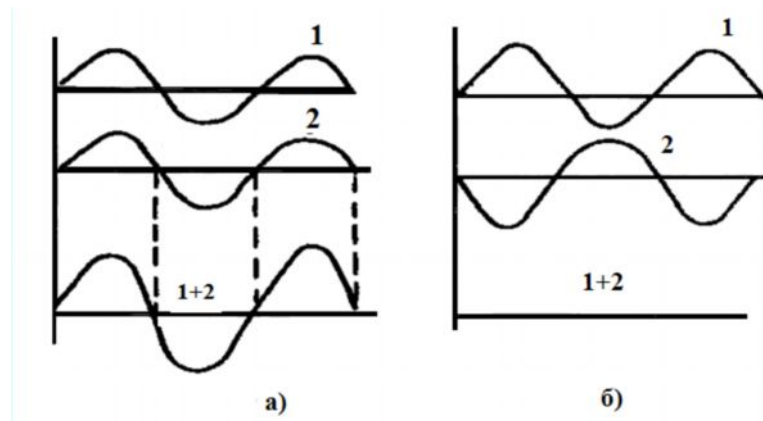


Рис.3. 2.1. Взаимодействие двух волн (1) и (2) одинаковой амплитуды

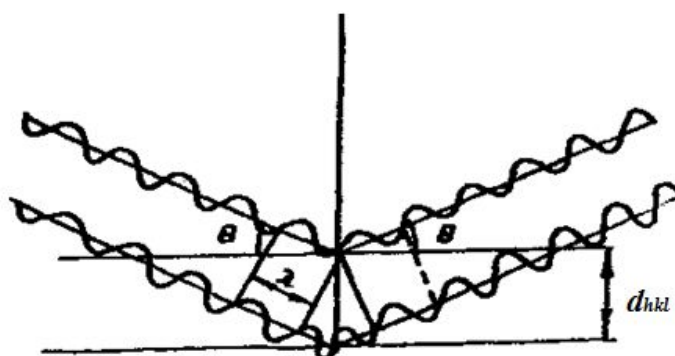


Рис.3.2.2. Схема формирования отражения от атомных плоскостей

Итак, выражение (3.2.1) иллюстрирует нам физический смысл тех параметров, которые мы способны получить, в первую очередь анализируя угловое положение рентгеновских дифракционных пиков. Однако общая дифракционная картина содержит не только количественную информацию о положении максимумов, но и об их интенсивности (высота), форме профиля и т.д.

Рентгеноструктурный анализ позволяет определить размеры частиц (зерен в поликристалле, блоков в зернах) в диапазоне от 0,2 до 2мкм по изменению интенсивности линий с малыми индексами.

В соответствии с теорией рассеяния рентгеновских лучей интегральная интенсивность дифракционных максимумов рентгенограммы от крупных кристаллов ослабляется из-за взаимодействия первичного пучка рентгеновских лучей с лучами, отраженными от атомных плоскостей кристалла в соответствии с уравнением Вульфа-Брэгга. Интенсивность

отраженных лучей от идеального кристалла, во много раз больше, чем от реального, где, происходит многократное отражение рентгеновских лучей.

Для определения размера (блоков) когерентного рассеяния в зернах горной породы можно использовать как физический принцип, основанный на эффекте первичной экстинкции, так и способ, заключающийся в анализе профиля дифракционных пиков.

### **3.3.Рентгенографическое определение структурных напряжений разного масштабного уровня**

Различают остаточные генетические напряжения, имеющиеся в породе до воздействия, т. е., обусловленные генезисом породы, и остаточные наведенные напряжения, возникшие в породе после физического воздействия.

Изучения механизма формирования остаточных напряжений на разных масштабных уровнях позволяет успешно решать задачи оперативного и достоверного их определения на макро- и микроструктурных элементах твердых тел. Остаточные напряжения и параметры структуры горных пород не поддаются строгому теоретическому расчету. Результаты рентгенографического метода, наряду с другими методами исследований параметров структурного состояния, в конечном итоге позволяют целенаправленно управлять деформационными и прочностными свойствами горных пород и минералов, использовать изменение свойств для решения задач при добыче и переработке полезных ископаемых, при создании строительных материалов.

Рентгенографическое определение деформаций и напряжений в минералах позволяет изучить природу физических процессов, протекающих в горной породе, подвергающейся воздействию внешних полей (механических, тепловых и т.д.) [17]. В этом случае обычно наблюдается неоднородность поля деформаций и соответственно напряжения, т.е. деформации в объеме зерен неоднородны.

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  $\Delta d$  семейства атомных плоскостей в минеральном зерне при его изменении определяется соотношением:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\sigma}{E} \quad (3.3.1)$$

где  $\sigma$  – величина приложенного напряжения, МПа,  $E$  – модуль упругости, МПа.

Если, на образец, после внешнего воздействия, перпендикулярно направить пучок монохроматических рентгеновских лучей, то, анализируя дифракционные пики под большими углами, можно определить изменение межплоскостного расстояния  $d_2$ , связанного с  $d_1$  через коэффициент Пуассона

$$\frac{\Delta d_2}{d_2} = -\mu \frac{\Delta d_1}{d_1} \quad (3.3.2)$$

$$\text{тогда } \frac{\Delta d_2}{d_2} = -\mu \frac{\Delta d_1}{d_1} = -\mu \frac{\sigma}{E} \quad (3.3.3)$$

Изменение межплоскостного расстояния на величину  $\Delta d$  вызывает сдвиг брэгговского отражения на величину  $\Delta\theta$  в соответствии с уравнением:

$$\Delta\theta = -\frac{\Delta d}{d} \cdot \operatorname{tg}\theta_0 \quad (3.3.4)$$

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

$$\Delta\theta = \mu \frac{\sigma}{E} \cdot \operatorname{tg}\theta_0 \quad (3.3.5)$$

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

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \cdot \operatorname{ctg}\theta_0 \Delta\theta \quad (3.3.6)$$

где,  $E$  и  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона породы.

Рентгенографически остаточные напряжения первого рода выражаются в сдвиге дифракционных линий, связанных с уменьшением межплоскостных расстояний решетки. Напряжение второго рода уравниваются в объеме единичных кристаллов, заключенных между плоскостями сдвига («пачек плоскостей сдвига»). На рентгенограммах эти остаточные напряжения сказываются в размытии дифракционных полос, в особенности в области больших углов скольжения пучка рентгеновских лучей.

Напряжение третьего рода, связанные с дислокациями, уравниваются в пределах некоторого количества атомов (в пределах кристаллической решетки), лежащих у плоскостей сдвига. Они обнаруживаются в ослаблении дифракционных линий и усилении общего фона (вуали) на рентгенограмме. Ослабление линий обычно возрастает с увеличением угла скольжения.

Расчет параметров тонкой структуры порообразующих минералов производится в несколько этапов [17]. Из-за интегральной природы формирования дифракционного максимума от поликристаллического образца, разброс значений напряжений вокруг средней величины, связанный с величиной микродеформацией ( $\epsilon$ ), вызовет его уширение. Кроме того, ширина и форма профиля дифракционной линии рентгенограммы поликристалла зависят от величины рассеивающих областей ( $D$ ) блоков мозаики. На первом этапе вводится поправки на инструментальное уширение гониометра дифрактометра:

$$\beta = B_{\text{эксн}} - \frac{b^2_{\text{этап}}}{B_{\text{эксн}}}. \quad (3.3.7)$$

где  $\beta$ - интегральная ширина, зависящая от размера блока  $\epsilon$ , т.е. только от состояния структуры исследуемого образца.

$B_{\text{эксн}}$  - интегральная ширина, зависящая как от состояния структуры,

$$B = \frac{1}{I_{\text{max}}} \left[ h \sum_{k=1}^n I_k - \frac{I_{\phi 1} + I_{\phi 2}}{2} nh \right]. \quad (3.3.8)$$

$I_{\max}$  - интенсивность в максимуме дифракционного пика;  $h$  - шаг перемещения детектора;  $n$  - число точек измерения интенсивности дифракционного пика;  $I_{\phi_1}, I_{\phi_2}$  - интенсивность фона на краях дифракционного пика.

Второй этап - разделение эффектов, связанных с малостью блоков и величиной микродеформации. При этом следует иметь в виду, что распределение интенсивности по ширине линии, размытой под влиянием искажений кристаллической решетки.

Характер распределения и плотность дислокаций в деформированных кристаллических телах изменяются в широких пределах, выделив основные виды распределения дислокаций, можно использовать рентгенографические данные для расчета плотности дислокаций.

Плотность дислокаций, находящихся на границе блоков и определяется по формуле:

$$\rho_D = \frac{6nD}{2D^2} = \frac{3n}{D^2}, \quad (3.3.9)$$

где  $\rho$  - длина линий дислокаций в единице объема (плотность дислокаций);  $D$  - размер блока;  $n$  - число дислокаций на грани блока.

При  $n=1$  (хаотическое распределение дислокаций)

$$\rho_D = \frac{3}{D^2} \quad (3.3.10)$$

Используя выражение для оценки энергии, запасенной в материале после деформации ( $\omega$ ) и энергии винтовой дислокации ( $v_b$ ) можно вычислить плотность дислокаций внутри блока ( $\rho_\varepsilon$ ) и истинную плотность дислокаций ( $\rho_n$ ).

$$\omega = \frac{3}{2} E \bar{\varepsilon}^2 \quad (3.3.11),$$

где  $E$  - модуль Юнга.

На третьем этапе определяется концентрации деформационных и двойниковых дефектов упаковки.

Рентгеновская дифрактометрия используется для исследования процессов, протекающих в горных породах, подвергающихся внешнему тепловому воздействию. Этим методом исследуются как фазовые превращения, нарушения структуры, тепловое расширение породообразующих минералов, так и явления, присущие горной породе в целом, - появление микроструктурных напряжений, протекание пластических микродеформаций и т.д.

Для оценки изменения параметров структуры и остаточных напряжений от воздействия теплового поля, нами исследовались несколько разновидностей горных пород, взятых из разных месторождений Кыргызской республики. В таблице. 3.3.1 представлены деформационные характеристики горных пород до и после их термической обработки.

Таблица 3.3.1 - Деформационные характеристики горных пород

Название и место отбора породы	Состояние породы	Номер образца	Модуль упругости, (E)×10 <sup>-5</sup> МПа	Коэффициент Пуассона, μ
1	2	3	4	5
Песчаник (Рогун)	Исходное	2	0,39	0,20
	После термообр.	1	0,28	0,30
	После термообр.	4	0,33	0,30
Гранит (Кыртабылгы)	Исходное	10	0,85	0,25
	После термообр.	6	0,10	0,30
Мрамор (Новоросийск)	Исходное	12	0,76	0,18
	После термообр.	7	0,30	0,40
Кварц (Восточ.Коунра д, шх.6, г.220)	Исходное	13	0,75	0,23
	Исходное	14	0,75	0,23
Гранит (Восточ.Коунра д, шх.6, г.150)	Исходное	15	0,43	0,27
	Исходное	16	0,43	0,27

Для изучения изменений параметров структурного состояния исследованию подвергались 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  $D$ , о величине остаточной деформации кристаллической решетки  $\epsilon$ , плотности дислокации на границе блока мозаики  $\rho_{\epsilon}$ , средней плотности дислокации  $\rho_{ср}$ , напряжения внутри зерна  $\sigma_{в.з.}$ , напряжения на границе зерна  $\sigma_{г.з.}$ , вероятности дефектов упаковки  $\alpha$  и двойниковых дефектов  $\gamma$ , расстояния между дислокациями на границе блока  $r_D$ , расстояния между дислокациями внутри блока  $r_{\epsilon}$ . Результаты измерения этих параметров приведены в таблице.3.3.2.

На основе результатов исследований структуры и остаточных напряжений можно отметить следующее: Результаты исследований показали, что термическая обработка в режиме закалки приводит к существенным изменениям напряжений на всех структурных уровнях.

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, при дальнейшем увеличении температуры преобразуются в растягивающие напряжения.

В кварцах сжимающие остаточные напряжения 3-го рода снижаются, а в некоторых случаях, преобразуются в растягивающие напряжения, а в кальцитах растягивающие напряжения преобразуются в значительные сжимающие остаточные напряжения, за счет чего происходит упрочнение, тогда как в кварцах, термическая обработка приводит к разупрочнению за счет увеличения растягивающих остаточных напряжений.

В мономинеральных породах, содержащих кальциты, 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.



Таблица 3.3.2-Параметры структуры и остаточных напряжений минералов горных пород

Название и место отбора породы	Название минерала	Состояние и номер образца	$D, \text{Å}$	$\rho_D \cdot 10^4, \text{см}^2$	$r_D, \text{Å}$	$r_\varepsilon, \text{Å}$	$\varepsilon, 10^{-5}$ е.о.д	$\rho_\varepsilon \cdot 10^{10}, \text{см}^2$	$\rho_{\text{ср}} \cdot 10^4, \text{см}^2$	$\alpha \cdot 10^4$	$\gamma \cdot 10^3$	$\sigma_{\text{в.з}} \cdot 10^3, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{г.з}} \cdot 10^2, \text{МПа}$
Гранит Кыртабылгы	кварц	исходн.,10	254	47			-8,8	123	7,6	27	51	40	1,64
		после термич. обработки, обр.7	398	19			-3,6	18	1,8	16	7,4	10,3	0,61
Мрамор Новороссийск	кальцит	исходн.,12	566	9,4			9,2	17,5	1,3	2000	3000	11	0,80
		после т.о.,7	324	29			-8,2	17,1	2,2	2000	3000	4,8	0,26
Песчаник Рогун	кальцит	исходн.,2	784	5,0			8,9	15	0,85	2000	3000	1,4	6,46
		после т.обр.,4	239	52,0			-1,3	47	5,0	2000	2900	8,6	1,95
	кварц	исходн.,2	651	7,1			-0,68	0,57	0,20	2,8	3,3	0,61	5,5
		после т.обр.,4	594	8,5			-1,4	2,35	0,45	8,3	9,4	2,2	1,9

	кварц	исходн., <sup>2</sup> <sup>1</sup>	385	20,2	223	78	-3,97						
		после	376	21,2	217	76	-3,42						
		т.обр., <sup>1</sup>	535	10,5	309	73	4,11						
		пос, т.о., <sup>4</sup> <sup>1</sup>											
Кварц	кварц	исходн., <sup>2</sup>	458	14,3	264	150	-2,93						
Вост.Коунрад		исходн., <sup>2</sup>	511	11,5	295	320	-1,48						
Гранит	кварц	исходн., <sup>2</sup>	554	9,8	320	171	-1,99						
Вост.Коунрад		исходн., <sup>2</sup>	688	6,3	397	116	-3,02						

### **3.4. Влияние остаточных напряжений на характеристики механических свойств твердых материалов.**

Известно, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на механическое поведение твердых материалов. Для оценки влияния остаточных напряжений на поглощаемую энергию при разрушении материалов проведено исследование корреляции между остаточными напряжениями, возникающими в результате прокатки и энергией динамического разрушения при испытаниях на ударную вязкость. Остаточные напряжения измеряли рентгенографическим методом, а энергия разрушения определялась на маятниковом копре с обработкой результатов. Микроскопические напряжения коррелируют с микротвердостью металлов. Энергия разрушения убывала по мере релаксации (уменьшения) остаточных напряжений. Установлена также связь остаточных макронапряжений с энергией разрушения для каждого типа образцов.

Как известно, остаточные напряжения существуют в телах независимо от внешних воздействий (силовых и температурных) и возникают вследствие неоднородности линейных или объемных деформаций в смежных объемах материала. В соответствии с размерами последних различают макро, микро- и ультрамикроскопические напряжения (напряжения 1-, 2-, и 3-рода).

Необходимым условием возникновения внутренних напряжений является появление неоднородности деформированного состояния в различных точках тела (нарушение условия совместности деформаций). Эта неоднородность может быть вызвана самыми различными причинами и неоднородным тепловым расширением или сжатием при неравномерном нагреве или охлаждении тела, фазовыми превращениями, приводящими к неоднородным объемным изменениям (закалка, затвердевание, охлаждение после сварки и т.д.), неоднородной пластической деформацией и т.д.

Известно, что технологические процессы оказывают существенное влияние на остаточные напряжения. Например, отмечается, что технологические операции по термообработке и сварка формирует поля

остаточных напряжений, вызывающие снижение усталостной прочности. В то же время сжимающие остаточные напряжения на поверхности изделия препятствуют возникновению трещин. При исследованиях влияния остаточных напряжений на механическое поведение композитных материалов отмечается, что вид термообработки заметно влияет на характер диаграмм деформирования образцов. Так, закалка по отношению к отжигу приводит к тому, что падает прочность, увеличивается предельная деформация и разброс всех параметров. Анализ результатов исследований остаточных напряжений и их влияния на характеристики механических свойств горных пород показывает, что остаточные напряжения влияют не только на свойства но и на динамические проявления горного давления [51].

Лазерное плавление поверхности металла приводит к значительному повышению износостойкости за счет образования дендритной структуры. В то же время в поверхностном слое возникают остаточные растягивающие напряжения, которые способствуют появлению поверхностных трещин и снижению прочности. Для уменьшения остаточных напряжений предложено обрабатывать оплавленную поверхность струей стеклянных микросфер, распыляемых потоком сжатого воздуха. Проведена экспериментальная оценка эффективности такой обработки в сравнении с другими ранее предлагавшимися методами, в частности, насыщением поверхности металла инертным газом.

В горных породах остаточные напряжения могут формироваться при их образовании и длительном нагружении. Например, при исследовании остаточных напряжений в кернах песчаника, отобранных с глубины 5300м, проведены следующие исследования: замер деформаций после вторичной разгрузки кернов путем уменьшения их диаметров, анализ анизотропии скоростей распространения ультразвука при разных давлениях, анализ прочностной анизотропии путем раскалывания образца двумя методами, микроскопический анализ шлифов. Оказалось, что обнаруженные эффекты могут быть объяснены наличием в кернах микротрещин. Все методы показали близкие направления максимальных горизонтальных главных напряжений,

связанные с ориентацией инициированных ими микротрещин. Ультразвуковые измерения показали, что при давлении 150 МПа трещины закрываются. Установлено, что это значение характеризует величину максимальных напряжений в массиве.

Остаточные напряжения в ряде случаев оказывают определяющее влияние на разрушение горных пород. Как известно, процесс разрушения горной породы с остаточными напряжениями происходит скачкообразно. Изучая влияние остаточных сварочных напряжений на ресурс конструкции, исследователи отмечают, что оценка ресурса конструкции на стадии развития установленной трещины связана со следующими особенностями:

–неоднородность поля остаточных сварочных напряжений по толщине элемента конструкции приводит во многих случаях к криволинейности траектории развития трещины;

–по мере развития трещины происходит перераспределение остаточных напряжений, обусловленное изменением жесткости конструкции. Поэтому развитие трещин по «замороженному» полю может приводить к неконсервативной оценке ресурса конструкции;

–взаимодействие поля остаточных сварочных напряжений с полем от эксплуатационной циклической нагрузки с постоянной асимметрией нагружения может приводить к существенному изменению асимметрии нагружения в вершине трещины по мере ее развития.

В большинстве технологических процессах (литье, сварка, обработка давлением, механическая обработка и др.) возникают напряжения, остающиеся в элементах конструкции и после завершения процесса изготовления, остаточные напряжения могут достигать значительной величины, порядка предела текучести материала и существенно влиять на прочность и надежность элементов конструкции. Остаточные напряжения образуют самоуравновешенную систему напряжений, вызванную неравномерными начальными деформациями. Влияние их на прочность зависит от вида нагружения и характера напряженного состояния, от внешних нагрузок.

Как установлено экспериментально и расчетным путем несущая способность (величина нагрузки, вызывающей разрушение) элементов конструкций из пластичных материалов не зависит от величины остаточных напряжений. Объясняется это тем, что в пластичных материалах перед разрушением протекает пластическая деформация, выравнивающая распределение напряжений. Для хрупких материалов, имеющих удлинение в момент разрыва менее 1%, остаточные напряжения могут влиять на статическую прочность. Установлено, что остаточные напряжения сжатия повышают усталостную прочность (на 30%), а растягивающие остаточные напряжения понижают (на 50%) [57].

Практика эксплуатации полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях, длительно работающих при нагрузках, близких предельной, в агрессивных средах и в условиях действия низких или повышенных температур, показало, что их надежность и долговечность во многом зависит от величины и характера распределения в материале остаточных микронапряжений. Величина остаточных микронапряжений в ПКМ может достигать значений, соизмеримых с прочностью компонентов материала. В результате происходит отслаивание от наполнителя или растрескивание полимера, разрушения наполнителя. Возникшие микродефекты способствуют быстрому проникновению в материал газов и жидкостей, вследствие чего резко ухудшаются электроизоляционные свойства материала и возрастает скорость его коррозионного разрушения. Остаточные напряжения определяют усталостную и длительную прочность деталей из ПКМ и при неблагоприятном для условий эксплуатации распределении могут снижать их в несколько раз, способствуя самопроизвольному растрескиванию и разрушению деталей не только в активных средах и при низких температурах, но и даже при длительном хранении. Одним из возможных путей повышения эксплуатационных свойств ПКМ является снижение остаточных напряжений или формирование такого характера их распределения, чтобы они

компенсировали временные напряжения. Снижению остаточных напряжений, можно достигнуть также при статических нагрузениях [4].

Например, анализируя остаточные напряжения в зоне сварочного шва тонкостенных оболочек (труб) отмечают, что механизм снижения максимальных остаточных напряжений при статических нагрузениях приводит к пластическому удлинению зоны высоких сжимающих напряжений. Такое удлинение является причиной снижения остаточных максимальных напряжений в зоне кольцевого шва.

Остаточные напряжения, возникающие в изделиях практически во всех технологических процессах, существенно влияют на работу конструкций. Во многих случаях остаточные напряжения играют отрицательную роль. При воздействии силовых и температурных нагрузок, суммируясь с напряжениями от нагрузки, остаточные напряжения могут привести к разрушению, потере устойчивости, искривлениям и т.д. Известно немало случаев, когда остаточные напряжения играют положительную роль, что позволяет без повышения металлоемкости изделий повысить их прочностные характеристики.

Одним из ведущих физических процессов, протекающих во времени в сварных соединениях и определяющих качественные и количественные характеристик деформирования с течением времени, является релаксация остаточных напряжений. Рентгеноструктурным методом на титановых сплавах ВТ1-0 и ВТ6С обнаружен эффект «неоднозначности» развития во времени деформационных и релаксационных процессов. Отмечается, что аномальное поведение во времени сварных соединений титановых сплавов, заключающееся в «неоднозначности» деформирования на первом этапе вылеживания (до 120 час) было прослежено при исследованиях на образцах размером  $15 \times 10 \times (1,5 \dots 2,0)$  мм, вырезанных из сварного соединения на участке установившегося квазистационарного температурного поля [32]. Анализ полученных данных позволил установить основные закономерности поведения во времени полей напряжений в кристаллической решетке сварных соединений указанных сплавов. В тонкой структуре сварных соединений, и в первую

очередь в швах, с течением времени наряду с известными процессами релаксации обнаружены процессы аккумуляции напряжений II рода, которые приводят к повышению уровня напряжений I рода. Скорость релаксаций напряжений второго рода значительно выше напряжений первого рода, и может превышать последнюю на порядок (снижение напряжений II рода за 500 ч вылеживания) при 20°C достигает 80%);

Одним из основных методических выводов по этим результатам является то, что при изучении проблемы нестабильности свойств сварных соединений одним из главных критериев надежности методов и достоверности результатов испытаний является четко фиксированный и, по возможности, минимальный параметр  $T_0$ , характеризующий отрезок времени от момента окончания сварки до начала испытаний.

Проведенные в МВТУ им. Н.Э. Баумана исследования свидетельствуют о том, что сварные соединения практически всех изученных металлов (стали, алюминиевые и титановые сплавы) деформируются с течением времени в той или иной степени, а величина и характер деформирования зависит от материала, его обработки. Так, например, стали со стабильной структурой изменяют свои размеры под действием одних лишь остаточных напряжений. В результате исследований деформирования образцов из магниевого сплава МА2-1пч при разных (+20°, +60°, +100°C) температурах было установлено, что сварные образцы из указанного сплава, оплавленные по кромке ниточным швом, деформируются при всех указанных температурах хранения и температурный фактор оказывает существенное влияние на величину после сварочной деформации. Интенсивность деформирования увеличивается с повышением температуры. Наиболее интенсивно деформирование протекает в первые сутки, в дальнейшем наблюдаются затухания по экспоненциальному закону. Причиной деформирования с течением времени сварных соединений сплава МА2-1пч при рассмотренных температурах хранения является релаксация остаточных напряжений. Определяющим фактором интенсивности падения остаточных напряжений является температура. За 5 суток уменьшение



(от максимальных) растягивающих напряжений в зоне шва при 100°C составило около 50%, а при 60°C–15%. Снижение остаточных напряжений на 85-90% наблюдается при температуре 250°C. При этой же температуре достигается стабилизация геометрических размеров сварных соединений. Самопроизвольное изменение остаточных напряжений, происходящее в течение длительного времени (за 3 года произошло снижение максимального остаточного напряжения на 40-50 МПа) замечено при комнатной температуре.

Из анализа определений прочностных характеристик Сары-Джазского месторождения, по своим механическим свойствам и деформаций разгрузки остаточных напряжений, известно, что граниты весьма неоднородны. Коэффициент вариации прочности на одноосное сжатие для конкретных участков колеблется от 15 до 66% при количестве опытов, равному  $5 \div 7$ . Граниты считаются механически однородными горными породами.

Значительная вариация прочности твердого деформируемого твердого тела при одноосном сжатии имеет место при наличии случайных трещин разной ориентации в образцах или при его существенной неоднородности его вещественного состава. В тех случаях, когда материал трещиноватый, обычно значение коэффициента вариации прочности при одноосном растяжении больше, чем коэффициент вариации прочности при одноосном сжатии, так как к трещинам более чувствителен показатель прочности при растяжении.

Для участков с остаточными напряжениями наблюдается обратная тенденция, т.е. значение коэффициента вариации прочности при сжатии больше, чем при разрыве. Интересно отметить, что для участков, где нет остаточных напряжений (деформации разгрузки остаточных напряжений), значения коэффициентов вариации прочности при одноосном сжатии и растяжении незначительны и близки между собой ( $15 \div 30\%$ ). С другой стороны, минералогический состав гранитов, тем более для небольших участков скважин, существенно не изменяется. Все это свидетельствует о том, что неоднородность прочностных свойств горных пород данного

месторождения обусловлена наличием неоднородного поля остаточных напряжений в горных породах Сары –Джазского месторождения.

### **3.5. Выводы**

1. Установлено, что термообработка существенно влияет на остаточные напряжения и в последующем на механическое поведение и характер диаграмм деформирования образцов. Так, закалка упругопластичных материалов по отношению к отжигу приводит к тому, что падает прочность, увеличивается предельная деформация и разброс механических параметров.

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

3. В мономинеральных породах, содержащих кальциты, 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.

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

## **ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РУД И МИНЕРАЛОВ.**

### **4.1. Принципы управления прочностными свойствами минералов и руд.**

Как известно, для решения определенных технических задач могут быть искусственно созданы материалы с заданными свойствами. Например, 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 всегда трудно, решать для них задачу улучшения раскрываемости зерен металлов, с чем напрямую связаны количество и качество извлекаемого концентрата металла. Применение для таких руд имеющихся традиционных способов подготовки и переработки минерального сырья приведет к удорожанию процесса измельчения, потерям ценных металлов. В связи с этим решение проблемы управления механическими свойствами руд и минералов приобретает большое прикладное значение.

Исследователи [24] отмечают, что многообразие особенностей состава и строения горных пород, обуславливающие широкий диапазон изменчивости их физико-технических параметров в пространстве, а также немонотонные изменения свойств, при разных способах воздействия, требует использование целого спектра способов разупрочнения. Наиболее важное направление развития работ в этой области является, разработка и внедрение способов и средств целенаправленного изменения технологических свойств трудно-перерабатываемого минерального сырья и отходов горного производства, обеспечивающих их эффективную переработку и комплексное использование. Такой подход, несмотря на возможное введение новых технологических операций, позволяет повысить эффективность использования существующих технических и технологических возможностей.

В большинстве случаев потери полезных минералов обуславливаются из-за несоответствия возможностей используемых технологических решений и технических средств многообразию физико-технических параметров, вовлекаемых переработку руд. Обеспечение их оптимального сочетания и целенаправленное изменение первоначальных свойств минерального сырья позволяет обеспечить эффективность работы и достигнуть высоких эксплуатируемых производственных единиц. Анализ показывает, что такой подход начинает находить широкое распространение в практике горного производства. Способы разупрочнения реализуются с помощью различных видов физического воздействия, для изменения прочности пород, способности минеральных агрегатов руд к раскрытию в процессах измельчения, повышению контрастности свойств их компонентов. Большой объем экспериментальных данных свидетельствует о том, что свойства горных пород, подвергнутых физическому воздействию, изменятся в широком диапазоне. В общем случае изменение параметров, количественно описывающих свойства породы, происходит немонотонно; различные виды воздействия вызывают изменения, отличающиеся по своему характеру. 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. Они, в свою очередь, затрудняют описание процессов, протекающих в объемах меньших представительного, и определяющих ее поведения в процессах переработки. Из этого становится ясным то, что до настоящего времени не сформировалась методология исследования целенаправленного изменения механических свойств горных пород и минералов [15]. В этой работе, М.Г. Зильбершмидт отмечает, что различная реакция на внешнее воздействие и анизотропия физических свойств компонентов обуславливают появление в полиминеральном агрегате породы, подвергающемся действию физического поля, неоднородных напряжений. 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. На основании экспериментальных данных по кинетике реакции породы на внешнее воздействие, начинающейся с микрообъемов, нарушенность горной породы рассматривается как система разноуровневых дефектов. Причем структурные уровни определены с учетом традиционных петрографических представлений о строении породы, а именно: элемент структуры - порода (минеральное зерно), элемент текстуры-

(минеральный агрегат), представительный объем. Предлагаемые структурные параметры представлены в таблице. 4.1.1.

Таблица 4.1.1-Элементы иерархической системы дефектов горной породы[15].

Характеризуемый объем	Разновидности дефектов			
	точечные	линейные	поверхностные	объемные
Элемент структуры минерального агрегата (зерно i-го порообразующего минерала)	Вакансии; междоузельные атомы	Дислокации различных типов	Дефекты упаковки; границы блоков мозаики	Двойниковые области; поры; блоки мозаики
Элемент текстуры горной породы (мин. агрегат k-го состава)	-	Линейное нарушение сплошности	Межзеренная граница; трещина	Крупные поры; выделение новой фазы
Представительный объем породы	-	-	Межагрегатная граница трещина	Вновь образованные агрегаты

Наличие многоуровневой системы дефектности в горной породе обуславливает существование аналогичной системы напряжений (табл.4.1.2) [15].

Таблица 4.1.2

Характеризуемый объем	Используемый параметр	Обозначение
Представительный объем	Макронапряжение	$\langle \sigma \rangle$
Элементы текстуры породы – минеральный агрегат j-го состава	Текстурные напряжения	$\sigma^{T(j)}$
Элемент структуры	Структурные	$\sigma^{S(k)}$

минерального агрегата зерно $k$ -го минерала	напряжения	
Элемент структуры зерна-блоки мозаики и более мелкие объемы в зерне $k$ -го минерала	Локальные напряжения	$\sigma^{L(k)}$

Параметры количественной характеристики иерархической системы напряжений взаимосвязаны друг с другом следующим образом:

$$\langle \sigma \rangle \approx \sum_i^n V_i \sigma_{-T(j)} ; \quad \sigma_{-T(j)} \approx \sum_k^m V_k \sigma_{-S(k)} ; \quad (4.1.1)$$

Ввиду того, что нарушенность строения и напряжения в породе вызывают в конечном итоге структурные искажения, элементы иерархической системы дефектности и напряжений объединяются понятием «структурное состояние горной породы».

Для его количественной характеристики следует использовать параметры, описывающие элементы иерархической система, представленные в таблицах 4.1.1 и 4.1.2.

Поведение горной породы при внешнем воздействии определяется свойствами составляющих ее минералов, их содержанием, расположением, ориентацией в пространстве и исходным структурным состоянием.

Причинами изменений свойств пород являются: изменение термобарических условий, протекание фазовых переходов и превращений, изменение дефектной структуры минеральных компонентов; протекание процессов неупругости в зернах и на межзеренной границе, сопровождающееся изменением нарушенности полиминерального агрегата.

Рассмотрение структурных уровней позволил сформулировать базовые

положения теории 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.

Процесс аккумуляции энергии горной породой, подвергнутой физической обработке, полностью определяется соответствующей перестройкой иерархической системы дефектности и напряжений и позволяет осуществить ее косвенную оценку как сумму частных энергий, затраченных на упругое деформирование элементов строения породы, изменение плотности дислокаций, концентрации точечных дефектов, образование свободных поверхностей при появлении нарушений сплошности.

Чтобы решить конкретную задачу по целенаправленному управлению механическими свойствами горных пород и минералов, для повышения эффективности технологических процессов, необходимо установить масштаб рассмотрения. Например, процесс разрушения при первичном дроблении горных пород происходит на значительно большем масштабном уровне, чем процесс измельчения или тонкого помола. Для каждого масштаба рассмотрения, т.е. масштабного уровня, необходимо установить свой представительный объем, который представляет собой тот минимальный объем, характеризующий в среднем свойство рассматриваемой среды для данного масштаба рассмотрения.

Например, для глобальной тектонической плиты объем, включающий только сотни минеральных зерен, не может быть представительным, тогда как



такой объем может быть представительным при рассмотрении процесса измельчения руд.

Для анализа особенностей деформирования и разрушения горных пород при различных напряженных состояниях и на разных масштабных уровнях К.Т. Тажибаевым [50] была разработана структурная модель квазиизотропной горной породы, где показано, что реальная среда – массив горных пород представляет собой единство непрерывности (континуум) и дискретности, т.е. дискретно – связанную среду. Предлагается рассмотреть горную породу, при изучении процессов ее деформирования и разрушения, как конструкцию, состоящую из определенно расположенных и связанных по локальным участкам структурных элементов, где приложенная извне нагрузка распределяется согласно строению этой внутренней конструкции. Например, признавая реальную структуру горной породы, естественно предположить, что приложенная извне одноосно сжимающая нагрузка отнюдь не одноосно внутри образца. Согласно внутреннему строению рассматриваемой горной породы и контактными условиям передачи нагрузок, приложенная образцу нагрузка перераспределяется самым сложным образом, обуславливая неоднородные напряженные состояния структурных элементов. Если, мы утверждаем об однородности напряженно деформированного состояния, то, в этом случае имеем в виду однородность состояния для значительно большего масштаба, чем масштабы составляющих структурных элементов (зерен), т.е. квазиоднородности.

В предложенной структурной модели [50] рассматриваются структурные иерархические уровни с присущими каждому из них неоднородностями (дефектами). Согласно иерархической системе структурных уровней, каждый вышестоящий уровень включает элементы структуры всех нижестоящих уровней, т.е. согласно структурной схеме, плита сложена из блоков, блоки в свою очередь состоят из зерен, зерна составлены из кристаллических отделностей и, наконец, кристаллические отделности состоят из атомов и молекул.

Естественно, при соответствующем масштабе рассмотрения, для каждого структурного элемента присущи соответствующие по величине напряжения.

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. Задача определения остаточных напряжений I-го (в масштабах образца, куска измельчаемой руды), II-го (в масштабах зерен), III-го (в масштабах кристаллической решетки) рода и структурных параметров горных пород и минералов может быть решена с применением метода рентгеноструктурного анализа. Целенаправленное изменение этих остаточных напряжений может быть достигнута с помощью разного рода физических полей и соответствующих установок. 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. Таким образом, основные принципы и задачи управления механическими свойствами горных пород и минералов заключаются в следующем:

1. Учет масштаба рассмотрения и определения структурных параметров горных пород и минералов, представление горной породы как разноуровневая иерархическая, дискретно–связанная по локальным участкам границ структурных элементов - система.

2. Оценка структурных остаточных напряжений горных пород и минералов на разных масштабных уровнях.

3. Изменение прочности и деформационных свойств горных пород и минералов путем изменения их дефектности и структурных остаточных напряжений на разных масштабных уровнях воздействием физических полей.

4. Учет избирательности воздействий физических полей на разные минералы и их структурные элементы.

5. Обеспечение минимальности показателя энергоемкости технологических процессов (дробление, измельчение, обогащение руд).

6. Учет направленности действия остаточных напряжений и внешних сил при разрушении руд и минералов.

7. Обеспечение безопасности и экологической чистоты изменения механических свойств горных пород и минералов при целенаправленном изменении остаточных напряжений.

#### **4.2. Исследование структурных напряжений на основе структурно-механической модели.**

Как указано выше, остаточные напряжения могут иметь место в твердых материалах на разных масштабных и структурных уровнях. Поэтому, различают остаточные напряжения 1-го рода, уравнивающиеся на макроскопическом структурном уровне - на уровне зерен, 2-го рода - микроскопический структурный уровень - на уровне кристаллических отдельностей, 3-го рода - субмикроскопический структурный уровень - на уровне кристаллической решетки. Как известно, остаточные напряжения - это механические напряжения, остающиеся в структурах твердых материалов после устранения причин (внешние нагрузки, потоки тепла) его возникновения.

Вследствие неоднородности пространственного распределения, а также знакопеременной изменчивости величин на разных структурных и масштабных уровнях, остаточные напряжения таких гетерогенных материалов, как горные породы, композитные материалы, сплавы металлов и др., не поддаются непосредственному точному аналитическому описанию. В связи с этим возникает необходимость их исследования на основе структурно-механических

модельных представлений. Результаты таких исследований, в конечном счете, позволяют целенаправленно управлять механическими свойствами технических материалов, руд и минералов, и эффективно решать технологические задачи по упрочнению металлов, конструкций, а также по разупрочнению крепких руд и минералов до их измельчения. При разупрочнении крепких руд обеспечивается наиболее полное извлечение из них полезного металла или компонента с меньшими материальными и энергетическими затратами.

В гетерогенных твердых материалах, как горные породы, остаточные напряжения неоднородны, и поэтому в них наблюдается сложная картина напряженного состояния. Для анализа остаточных напряжений, имеющих место на разных масштабных уровнях, совместно с К.Т. Тажибаевым разработана структурно - механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды ( рис. 4.2.1) [52, 53]. Предлагаемая модель предназначена, главным образом, для описания изменения остаточных (структурных) напряжений, существующих на различных структурных уровнях горных пород (кристаллическая решетка, кристаллическая отдельность, блок мозаики, зерно). Анализ данных показывает, что остаточные напряжения более подробно изучены в металлах и технических материалах, чем в горных породах. Несмотря на определенные достижения в области изучения остаточных напряжений в твердых средах, в настоящее время представления о процессах их релаксации и совместного изменения на разных масштабных уровнях достаточно скудны. Для анализа разномасштабных остаточных напряжений и чтобы восполнить в какой-то мере указанный пробел, была предложена данная структурно- механическая модель неоднородной твердой среды (рис.4.2.1).

Модель состоит из пяти разных цепочек (А, Б, В, Г, Д), содержащих упругие, пластические, вязкие и неустойчивые элементы. Особенность каждой цепочки характеризуется ее равновесным состоянием. Например, цепочка В отражает нейтральное (не напряженное) состояние и характеризуется равновесием. Цепочки А и Д весьма неустойчивы, т.к. имеется наличие

неустойчивого элемента (9), отображающего частицы на поверхности раздела (на внешней поверхности или на поверхности внутренней трещины), то есть, частиц не со всех сторон уравновешенных. Равновесие таких цепочек обеспечивается только силами сцепления и трения частиц.

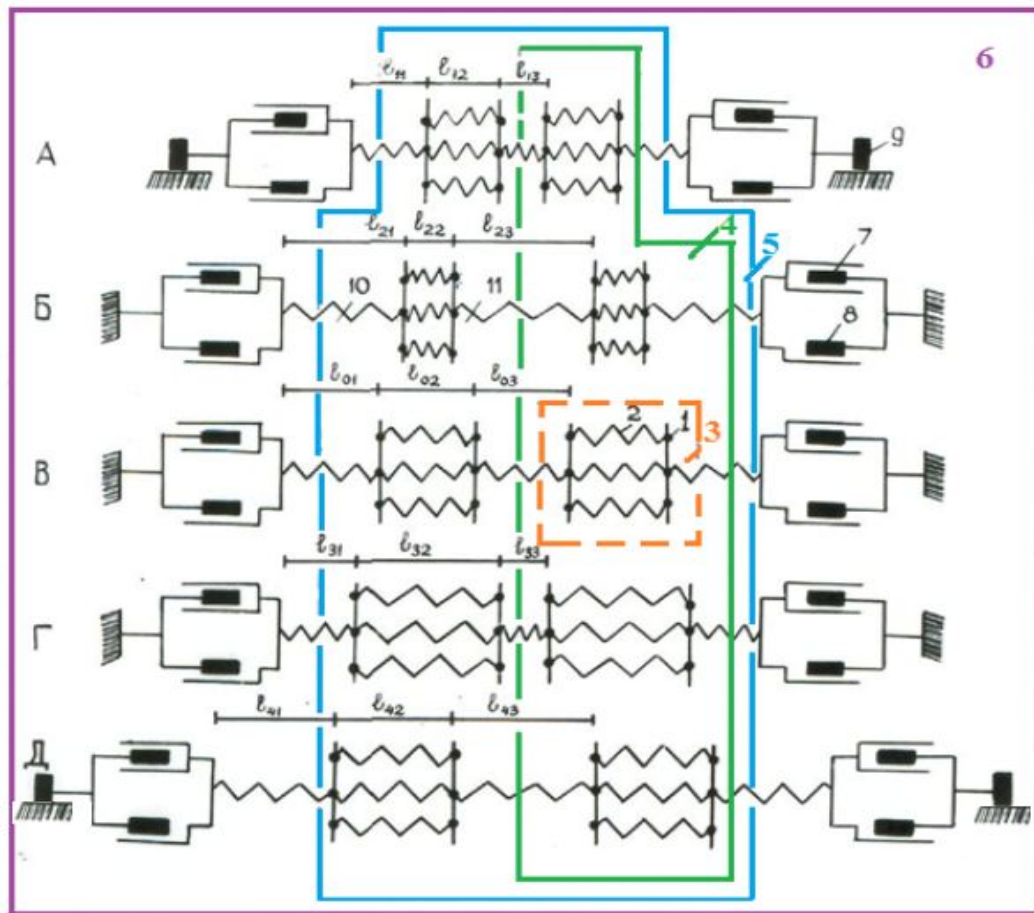


Рис.4.2.1. Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала.

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.

Характерным для этих цепочек является то, что напряжение (деформация) на всех структурных уровнях на границе и внутри зерна, на границе и внутри кристаллической отдельности имеет один знак, то есть все элементы такой цепочки либо растянуты, либо сжаты. Незначительные внешние нагрузки, в цепочках А и Д, могут привести, в зависимости от знака остаточных напряжений к скачкообразному деформированию расширения или сжатия, как результат совместной деформации всех упругих элементов в одном направлении. Относительное равновесие таких неустойчивых цепочек обеспечивается только силами сцепления и трения частиц.

Цепочки типа Б и Г также неустойчивы, но в отличие от цепочек А и Д уравновешены со всех сторон окружающими частицами, поэтому они названы цепочками неустойчивого равновесия 1-го порядка. Особенность данных цепочек заключается в том, что в них напряжения (деформация) на разных структурных элементах могут быть разного знака. Например, в цепочке Б на уровне кристаллической решетки имеются сжимающие остаточные напряжения, тогда как на границе блока мозаики (внутри зерна) и на границе зерна –растягивающие напряжения. В этой цепочке увеличение сжимающего напряжения на кристаллической решетке, согласно модели, приводит к увеличению растягивающих напряжений на границе кристаллической отдельности (блока мозаики) и зерна. В цепочке Г уменьшение растягивающих напряжений или переход растягивающих к сжимающим напряжениям на кристаллической решетке приведет к уменьшению напряжений сжатия или к переходу сжимающих напряжений к растягивающим на границе зерна и кристаллической отдельности.

Модель содержит в себе такие структурные элементы как атом, ячейка кристаллической решетки, кристаллическая отдельность (блок 1-уровня), зерно, блок-2 уровня. Следует отметить, что в цепочках неустойчивого равновесия (А, Б, Г, Д) происходит релаксация остаточных напряжений, скорость которой зависит от внешних и внутренних условий. Эти цепочки всегда стремятся к нейтральному состоянию – к устойчивому равновесию (к состоянию В), то есть к минимуму потенциальной энергии. Например, в цепочке Б сжимающие остаточные напряжения в кристаллической решетке, “самопроизвольно” уменьшаясь во времени, вызовут одновременное уменьшение растягивающих напряжений на границах кристаллической отдельности и зерна. Однако при соответствующих условиях данный процесс может длиться тысячи и миллионы лет. Внешние силовые поля значительно ускоряют процессы изменения остаточных напряжений: в одном случае устраняя их полностью, в другом – формируя. В этом смысле исходя из модели вполне понятно устранение остаточных напряжений при отжиге (при нагревании и медленном охлаждении). Для проверки правомерности предложенной модели было проведено сравнение экспериментально измеренных изменений остаточных напряжений на разных структурных уровнях с изменениями в модели для минералов шести разновидностей горных пород. Проверка модели по экспериментальным данным Т.К. Заворыкиной (табл.4.2.1) [16] показала соответствие изменений напряжений в модели с данными рентгеноскопии. Исследование исходного структурного состояния и процессов, протекающих в железных рудах Михайловского месторождения при физическом воздействии, показало, что кинетика процессов изменения структурной нарушенности породы носит многостадийный характер и позволяет в зависимости от вида, интенсивности и длительности обработки получать различные структурные состояния полиминерального агрегата. При механическом нагружении руды максимальные текстурные и структурные напряжения, возникающие в железосодержащих минералах (магнетите и гематите), инициируют именно в них наиболее ранние и значительные структурные преобразования. На первой

стадии, при нагрузках менее 50 МПа, изменение дислокационной структуры зерен магнетита вызывает их деформационное упрочнение, затем, при более интенсивных нагрузках ( более 50 МПа – вторая стадия ) из-за высоких локальных напряжений на различных стопорах в магнетите появляются микротрещины как в объеме зерен, так и в межзеренном пространстве, при этом в зернах кварца новых нарушений сплошности нет. При нагрузке более 100 МПа наступает третья стадия структурных изменений, характеризующаяся дополнительным появлением нарушений сплошности в зернах кварца.

Равномерный по объему нагрев железной руды генерирует максимальные сжимающие напряжения в кварце, а растягивающие – в магнетите и гематите. В зависимости от вариации состава руды в этом случае, в первую очередь, повреждаются гематитовые и магнетитовые зерна; при температурах более  $350^{\circ}\text{C}$  активизируются процесс образования трещин и в кварцевых зернах.

Электромагнитная СВЧ - обработка вызывает первоочередное разупрочнение кварцевых зерен. Так, при нагреве до  $T=200^{\circ}\text{C}$  за время не более 50с (I стадия) за счет преобладающего действия растягивающих напряжений в кварце и сжимающих в рудных минералах происходит трещинообразование в зернах кварца и упрочнение контакта магнетит - гематит в агрегате рудных минералов. Нагрев до  $T=450^{\circ}\text{C}$  за время 180с (II стадия) интенсифицирует действие вторичных структурных напряжений, вызванных выравниванием температуры по образцу и характеризуемых действием растягивающих напряжений в рудных минералах и сжимающих в кварце, вызывающих упрочнение кварца и гематита и разупрочнение магнетита. При нагреве до  $T=950^{\circ}\text{C}$  за время 600 с (III стадия) под действием значительных растягивающих напряжений, последовательно генерируемых во всех минералах, происходит общее разупрочнение агрегата.

Исследование механизма и закономерностей изменения связей и свойств компонентов апатитовой руды (Ковшинского месторождения) при динамическом нагружении, также выявило немонотонный многостадийный характер происходящих при структурных преобразованиях. В частности, при



малоинтенсивном нагружении ( $\leq 510$  Дж) зафиксировано деформационное упрочнение зерен апатита и нефелина, а также разупрочнение межзеренных границ в апатитовом агрегате.

Исследования показали, что механизм изменения структурного состояния и свойства горных пород при действии различных полей определяется совокупностью разноуровневых процессов преобразований иерархической системы дефектности, немонотонно инициируемый вариацией термобарических условий в элементах строения. Например, при воздействии электромагнитным 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) магнетита в модели соответствует цепочке **Б**, где увеличение сжимающих напряжений (по сравнению с исходным значением) в кристаллической решетке приведет к увеличению растягивающих напряжений на границе кристаллической отдельности (блока мозаики) и на границе зерна. Экспериментально, при увеличении сжимающих напряжений кристаллической решетки магнетита от СВЧ облучения (в течение 50с.), растягивающие напряжения на границе кристаллической отдельности и на границе зерна увеличились, то есть имеется соответствие фактических 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 полностью соответствует согласованным изменениям напряжений в структурных элементах модели (рис.4.2.1, табл.4.2.1).

Таблица 4.2.1-Изменение параметров структурного состояния основных минералов окисленной железной руды

Длительность СВЧ-воздействия,Сек	Д, А	$\rho_D \cdot 10^{-10}$ см <sup>-2</sup>	r <sub>D</sub> , А	r <sub>ε</sub> , А	$\varepsilon \cdot 10^3$	$\rho_{\Sigma} \cdot 10^{-11}$ см <sup>-2</sup>	$\rho_{cp} \cdot 10^{11}$ см <sup>-2</sup>	$\alpha \cdot 10^3$	$\gamma \cdot 10^2$	$\sigma_D \cdot 10^3$ , Мбар	$\sigma_{эpz} \cdot 10^4$ , Мбар	
а) кварц												
исх.	0	1371,0	1,60	790,045	91,10	1,98	12,06	1,32	5,47	5,25	11,95	7,90
СВЧ-воз.,с	50	781,5	4,91	1,3	97,13	-1,74	10,6	2,20	77,70	88,30	5,26	2,21
	180	1275,0	1,85	735,2	35,74	5,01	78,27	3,26	8,0	6,93	71,22	44,95
	600	439,6	12,31	285,0	126,0	1,28	6,30	2,64	2,7	2,68	1,79	0,55
б) гематит												
	0	661,0	6,87	381,5	234,0	-1,17	1,82	1,11	18,3	2,54	3,41	4,90
	50	773,4	5,08	443,7	251,60	-1,41	1,58	0,89	0,91	0,03	3,58	5,83
	180	535,4	10,30	311,6	135,60	-2,00	5,44	2,36	1,85	1,85	7,94	9,75
	600	925,4	3,50	534,5	816,50	0,35	0,315	0,22	79,91	79,91	0,41	0,78
в) магнетит												
	0	461,0	14,12	266,0	132,0	-2,10	5,76	2,88	2,70	1,16	4,36	4,66
	50	360,0	23,15	208,0	91,0	-2,93	12,10	5,36	6,75	2,01	6,63	5,10
	180	696	6,20	401,6	466,0	-0,65	0,46	0,55	2,10	0,16	0,61	0,88
	600	520	11,10	300	258,0	-1,10	1,50	1,25	1,90	0,07	1,35	1,58

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 – 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.

#### **4.3. Аналитические зависимости структурно - механической модели напряженно-деформированного состояния структурных элементов неоднородных твердых материалов.**

Для количественного описания остаточных напряжений 1-го, 2-го и 3-го рода, в соответствии с известными результатами исследований структуры горных пород и других твердых материалов принимаем следующие положения:

1. Основное структурное состояние гетерогенных материалов дискретно - связанное. В реальных условиях имеет место единство континуума (сплошности) и дискретности в структуре твердого материала, структурные элементы, которые дискретны и имеют нарушения сплошности на разных

масштабных уровнях и в то же время по определенным каналам (границы кристаллических отдельностей, зерен) связаны силовыми полями непрерывно [15]. На атомно-молекулярном уровне непрерывность силового поля обеспечивается взаимодействием элементарных частиц твердых материалов.

2. Силы упругости твердых материалов противодействуют внешней силе и обусловлены взаимодействием и степенью перекрытия силовых полей составляющих структурных элементов.

3. В твердых материалах вследствие их дискретно-связанной структуры распределение напряжения в разных масштабных уровнях неоднородное и имеет периодический характер.

Аналитические зависимости структурно - механической модели напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала для направлений X,Y,Z представлены следующими формулами (см.рис.4.2.1.):

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

$$\varepsilon_{XA} = -\frac{\sigma_{1AX}}{E_{1X}} - \frac{\sigma_{2AX}}{E_{2X}} - \frac{\sigma_{3AX}}{E_{3X}} \quad (4.3.1),$$

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

$$\varepsilon_{XB} = \frac{\sigma_{1AX}}{E_{1X}} + \frac{\sigma_{2AX}}{E_{2X}} - \frac{\sigma_{3AX}}{E_{3X}} \quad (4.3.2),$$

Для цепочки В по направлению X  $\varepsilon_{XB} = 0$  (4.3.3).

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

$$\varepsilon_{XG} = -\frac{\sigma_{1GX}}{E_{1X}} - \frac{\sigma_{2GX}}{E_{2X}} + \frac{\sigma_{3GX}}{E_{3X}} \quad (4.3.4).$$

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

$$\varepsilon_{XD} = \frac{\sigma_{1DX}}{E_{1X}} + \frac{\sigma_{2DX}}{E_{2X}} + \frac{\sigma_{3DX}}{E_{3X}} \quad (4.3.5),$$

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 (остаточных напряжений) 1-го, 2-го, 3-го рода соответственно цепочки **А, Б, Г, Д** по направлению **X**;

$\varepsilon_{XA}, \varepsilon_{XB}, \varepsilon_{XB}, \varepsilon_{XG}, \varepsilon_{XD}$  - результирующая относительная деформация для цепочки **А, Б, В, Г, Д** по направлению **X**;

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

$\sigma_{3DX}$  - остаточные напряжения 1-го, 2-го, 3-го рода соответственно цепочки **А, Б, Г, Д** по направлению **X**;

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

по направлению **Y** и **Z** соответственно

$$\varepsilon_{YA} = -\frac{\sigma_{1AY}}{E_{1Y}} - \frac{\sigma_{2AY}}{E_{2Y}} - \frac{\sigma_{3AY}}{E_{3Y}} \quad (4.3.6)$$

$$\varepsilon_{YA'} = \frac{\sigma_{1AY}}{E_{1Y}} + \frac{\sigma_{2AY}}{E_{2Y}} - \frac{\sigma_{3AY}}{E_{3Y}} \quad (4.3.7)$$

$$\varepsilon_{YB} = 0 \quad (4.3.8)$$

$$\varepsilon_{YA''} = -\frac{\sigma_{1AY}}{E_{1Y}} - \frac{\sigma_{2AY}}{E_{2Y}} + \frac{\sigma_{3AY}}{E_{3Y}} \quad (4.3.9)$$

$$\varepsilon_{YA'''} = \frac{\sigma_{1AY}}{E_{1Y}} + \frac{\sigma_{2AY}}{E_{2Y}} + \frac{\sigma_{3AY}}{E_{3Y}} \quad (4.3.10)$$

$$\varepsilon_{ZA} = -\frac{\sigma_{1AZ}}{E_{1Z}} - \frac{\sigma_{2AZ}}{E_{2Z}} - \frac{\sigma_{3AZ}}{E_{3Z}} \quad (4.3.11)$$

$$\varepsilon_{ZA'} = \frac{\sigma_{1AZ}}{E_{1Z}} + \frac{\sigma_{2AZ}}{E_{2Z}} - \frac{\sigma_{3AZ}}{E_{3Z}} \quad (4.3.12)$$

$$\varepsilon_{ZB} = 0 \quad (4.3.13)$$

$$\varepsilon_{Z\dot{A}} = -\frac{\sigma_{1\dot{A}Z}}{E_{1Z}} - \frac{\sigma_{2\dot{A}Z}}{E_{2Z}} + \frac{\sigma_{3\dot{A}Z}}{E_{3Z}} \quad (4.3.14)$$

$$\varepsilon_{Z\dot{A}} = \frac{\sigma_{1\dot{A}Z}}{E_{1Z}} + \frac{\sigma_{2\dot{A}Z}}{E_{2Z}} + \frac{\sigma_{3\dot{A}Z}}{E_{3Z}} \quad (4.3.15)$$

Для изотропных материалов

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

Для экспериментального изучения параметров структуры и остаточных напряжений 1-го, 2-го, 3-го рода нами проведены рентгенографические исследования образцов, минералов пяти разновидностей горных пород [49]. При этом исследованию подвергались минералы горных пород в исходном состоянии и после термической обработки. Особое внимание уделялось изучению изменений структуры и остаточных напряжений после термической обработки. Полученные экспериментальные данные по изменению остаточных напряжений 1-го, 2-го, 3-го рода хорошо описываются на основе структурно-механической модели напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала и предложенных расчетных формул. Например, для исходного состояния кварца гранита (Кыртабылга) остаточные напряжения 3-го рода сжимающие (отрицательные), а остаточные напряжения 1-го и 2-го рода растягивающие (положительные). Такое состояние соответствует в модели цепочке **Б** и описывается формулой (4.2.1). 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 подтверждается данными рентгеноструктурного анализа [13] (см. табл.4.2.1 и 3.2.1). Для кварца и песчаника, согласно модели, увеличение сжимающих остаточных напряжений 3-го рода приводит к увеличению растягивающих остаточных напряжений 1-го и 2-го рода, что также экспериментально подтверждается. При наличии в исходном состоянии сжимающих остаточных напряжений на всех рассматриваемых структурных уровнях, т.е. когда

остаточные напряжения 1-го, 2-го, 3-го рода все сжимающие (отрицательные), согласно модели (цепочка А) и формуле (3.2.1), уменьшение сжимающих остаточных напряжений 3-го рода приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений 1-го и 2-го рода. Такие изменения подтвердились экспериментальными данными и другого автора [16], согласно которых при облучении СВЧ волнами уменьшение сжимающих остаточных напряжений 3-го рода приводит к увеличению сжимающих остаточных напряжений 1-го и 2-го рода. Можно показать также и количественное соответствие экспериментальных данных с данными, 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 в сотни раз превышает «реальную» (измеренную на практике) прочность, как было показано [50], из-за ошибки определения площади истинного сечения, передающего нагрузку (по границам зерен и кристаллических отдельностей) как сплошная конструкция, модуль упругости 3-го рода в несколько раз превышает модуль упругости 1-го рода, так как данный показатель зависит от плотности. Следует отметить, что остаточные напряжения 3-го рода так же в несколько раз превышает остаточные напряжения 1-го рода.

На основе  $E_1 < E_2 < E_3$  для кварца, принимаем  $E_3 = 25E_1$ ;  $E_2 = 5E_1$ . Для кварца гранита (Кыртабылга) экспериментально установленная величина  $E_1 = 0.75 \cdot 10^5$  МПа [49]. По формуле (4.2.2.) определяем остаточные напряжения 1-го рода и сравним расчетное значение со значением, установленное экспериментально рентгеноструктурным анализом [17]. Подставляя значения модулей упругости и напряжений 2-го и 3-го рода для кварца термообработанного гранита (Кыртабылга) из таблицы 4.2.1. в формулу (4.2.2.) получим значение остаточных напряжения 1-го рода  $\sigma_1 = 6,49$  МПа. Экспериментально установленное, рентгеноструктурным анализом,

значение остаточного напряжения 1-го рода для кварца и гранита после термической обработки  $\sigma_1 = 6,1$  МПа (см. табл. 2.3.2).

Таким образом, можно отметить, что структурно-механическая модель, и соответствующие расчетные формулы позволяют анализировать остаточные напряжения на разных структурных и масштабных уровнях, вести расчеты остаточных напряжений и, в конечном итоге, разработать технологические меры по целенаправленному изменению механических свойств твердых материалов.

#### 4.4. Выводы.

1. В твердых материалах, вследствие их дискретно-связанной структуры, распределение остаточных напряжений в разных масштабных уровнях имеет неоднородный и скачкообразный характер.
2. Остаточные напряжения на разных структурных элементах: кристаллическая решетка, зерно, граница зерна могут иметь разные знаки и изменяются в соответствии с их знаками взаимосогласованно:
  - а) в однонаправлено напряженных (всюду сжатых – отрицательные знаки, или всюду растянутых – положительные знаки) структурных элементах разного масштабного уровня, 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;
  - б) в разнонаправленных напряженных структурных элементах, увеличение напряжения 3-го рода приводит к увеличению напряжений 1-го и 2-го рода, а уменьшение напряжения 3-го рода до смены знака - к уменьшению напряжений 1-го и 2-го рода;
  - в) в ненапряженных структурных элементах, 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.
3. Предложенная структурно - механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородного твердого материала, и его



соответствующие расчетные формулы позволяют анализировать остаточные напряжения на разных структурных и масштабных уровнях, разработать технологические меры по целенаправленному управлению механических свойств материалов, руд и минералов.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАЗУПРОЧНЕНИЯ РУД И МИНЕРАЛОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СВЧ ВОЛН НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

### **5.1. Методика определения удельной энергоемкости измельчения горных пород.**

Решение проблемы обогащения крепких полиминеральных руд возможно при применении двух принципиально разных способов разрушения горных пород. Первый из них основан только на механическом разрушении, что требует создания специальных горных машин со значительной единичной мощностью и в настоящее время встречает ряд затруднений. Второй - кроме механического разрушения используется предварительное снижение прочности (разупрочнение) пород путем воздействия на горные породы тем или иным видом энергии.

Известный способ разупрочнения крепких горных пород на основе управления напряженным состоянием массива осуществляется путем создания опережающего теплового фронта конической формы [44]. Накопленная потенциальная энергия деформации, при определенных условиях, переходит в кинетическую энергию, приводящая к образованию трещин, обуславливающее разупрочнения горных пород, существенно облегчающую дальнейшее его разрушение. Значение крепости горных пород, в том числе коэффициента крепости играет большую роль при процессах разупрочнении, дроблении. Одним из методов определения коэффициента крепости является метод толчения [20]. По данному методу коэффициент крепости горных пород определяется на основе зависимости энергии, расходуемой на измельчение пробы горной породы, а также величины вновь образованной поверхности.

Измельчение горных пород, руд происходит в условиях сложного напряженного состояния, когда разрушаемый материал одновременно подвергается сжатию, растяжению, сдвигу и изгибу. Отсюда следует, что коэффициент крепости, определяемый при измельчении, должен представлять собой обобщенную характеристику крепости, соответствующую многим практическим случаям нагружения горных пород.

Из месторождения отбирают такое количество горной породы или руды (обычно по одной пробе из каждого места, в котором нужно определить крепость), чтобы можно было получить 20-25 навесок по 20-50г каждая (3-5 кусков). Навески размером в 20-30 мм в поперечнике, изготавливают, раскалывая отобранные пробы руды. Для каждого отдельного определения коэффициента крепости используется 5 навесок. Полученные этим методом данные, отличаются сравнительно невысоким коэффициентом вариации равным в среднем 10-15%. Поэтому для получения надежной средней величины коэффициента крепости, производится по 5 определений на одной и той же пробе породы. Для измерения коэффициента крепости разработан специальный прибор ПОК (прибор для определения крепости), состоящий из трубчатого копра, измерителя мелкой фракции. Каждая отдельная навеска дробится в стакане вертикального трубчатого копра, прибора ПОК, гирей весом 2,4 кг, сбрасываемой с высоты 600мм. В случае необходимости изменение величины работы разрушения при толчении, целесообразно варьировать число ударов падающей гири по навеске.

Коэффициент крепости пород методом толчения определяется по эмпирической формуле:

$$f_T = \frac{20n}{l} \quad (5.1.1),$$

где  $n$  –число ударов свободно падающего груза по одной навеске;

$l$  –высота столбика пыли в объемомере, мм;

Вес гири и высоту ее сбрасывания следует оставлять постоянным. Получившаяся, после толчения, мелочь высыпается из стакана копра на сито с

отверстиями 0,5мм, и 5 навесок, раздробленных по отдельности в копре прибора, просеивается отдельно. Фракция размером менее 0,5мм (прошедшая через сито) собирается и насыпается в стакан объемомера диаметром 23мм, при помощи которого определяется высота столбика этой пылевой фракции.

Обычно для пород с низкой и средней прочностью производят в зависимости от прочности породы от 3 до 15 ударов. Для подавляющего большинства горных пород и углей кривая зависимости выхода пыли, характеризуемого величиной  $l$ , от затраченной на дробление работы  $A$  имеет тенденцию к выполаживанию при больших значениях  $A$ . Поэтому рекомендуется подбирать для каждой испытываемой породы соответствующее, определенной работе  $A$  число ударов при разрушении навески, чтобы выход пыли  $l$  был примерно в пределах от 20 до 70мм. В формуле (5.1.1.) числитель  $20n$  - пропорционален работе, затраченной на дробление навески, а  $l$  пропорционален вновь образованной поверхности.

Общая работа, затрачиваемая на измельчения одной навески исследуемой породы методом толчения, выражается уравнением

$$A = GHn \quad (5.1.2)$$

где  $G$  – вес гири, кг;

$H$  – высота сбрасывания гири, см.;

$n$  – число сбрасываний гири.

Величина коэффициента крепости исследуемой горной породы вычисляется по отношению затраченной на дробление работы к вновь образованной поверхности по эмпирической формуле (5.1.1) М.М.Протодьяконова.

По полученным пяти значениям коэффициента крепости определяется его среднеарифметическая величина. Исследованиями установлено, что вновь образованная при дроблении хрупкого материала поверхность складывается в основном (примерно на 90%) из поверхности мельчайших кусочков, величиной менее 0,5 мм. Поэтому, для значительного упрощения метода, после дробления определяется поверхность только мелких фракций (величина высоты столбика

пыли в объемомера пропорциональна вновь образованной поверхности полученных при дроблении кусочков) [20].

На рисунках 5.1.1-5.1.4 представлены графики коэффициента крепости по толчению исследованных горных пород и руд при различных продолжительностях воздействия СВЧ волн.

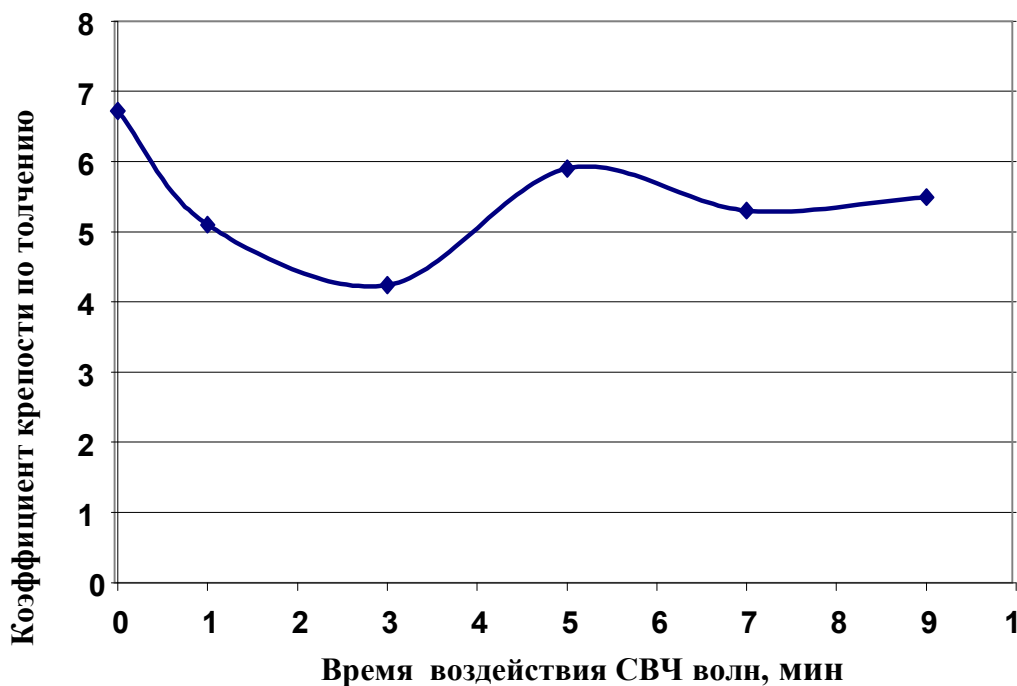


Рис. 5.1.1. Зависимость крепости от времени воздействия СВЧ волн (известняк доломитизированный к. Ак-Татыр, Баткенск. обл.)

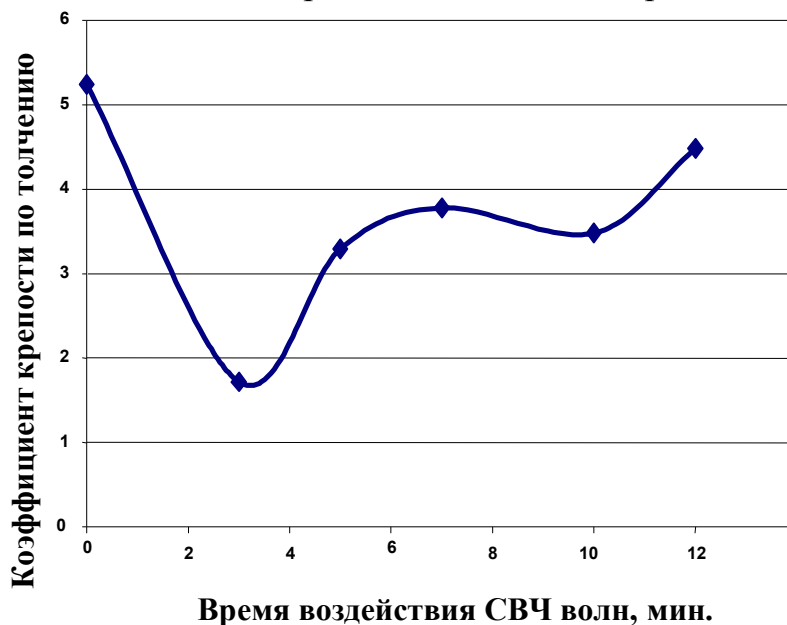


Рис. 5.1.2- Зависимость крепости от времени воздействия СВЧ волн (диорит, месторождение Токтазан)

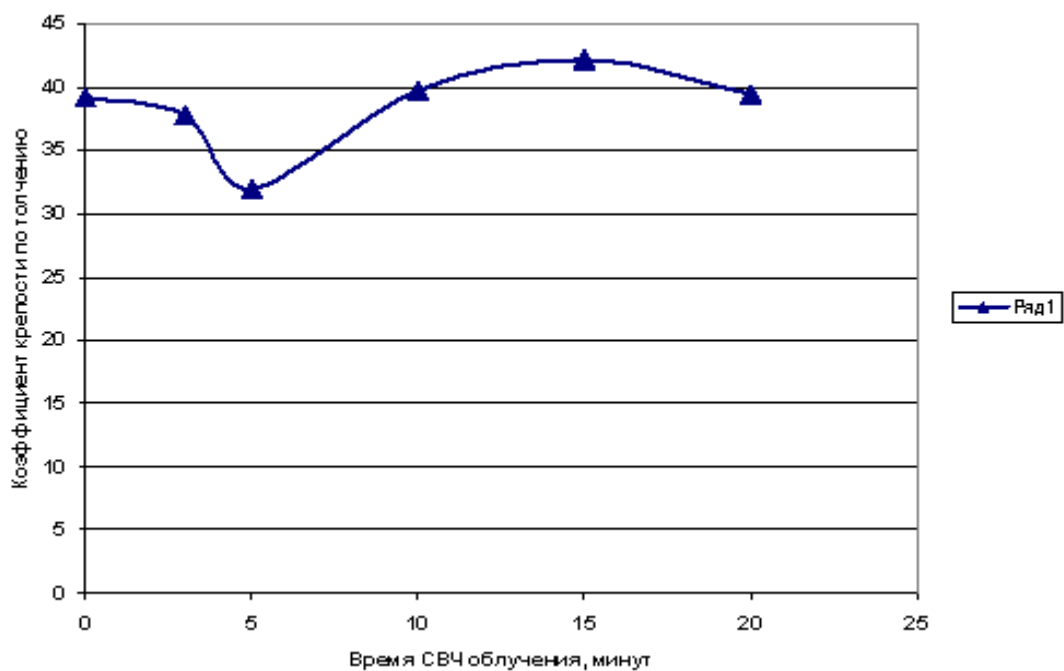


Рис. 5.1.3. График изменения крепости от времени СВЧ облучения (диорит, Жети-Огуз)

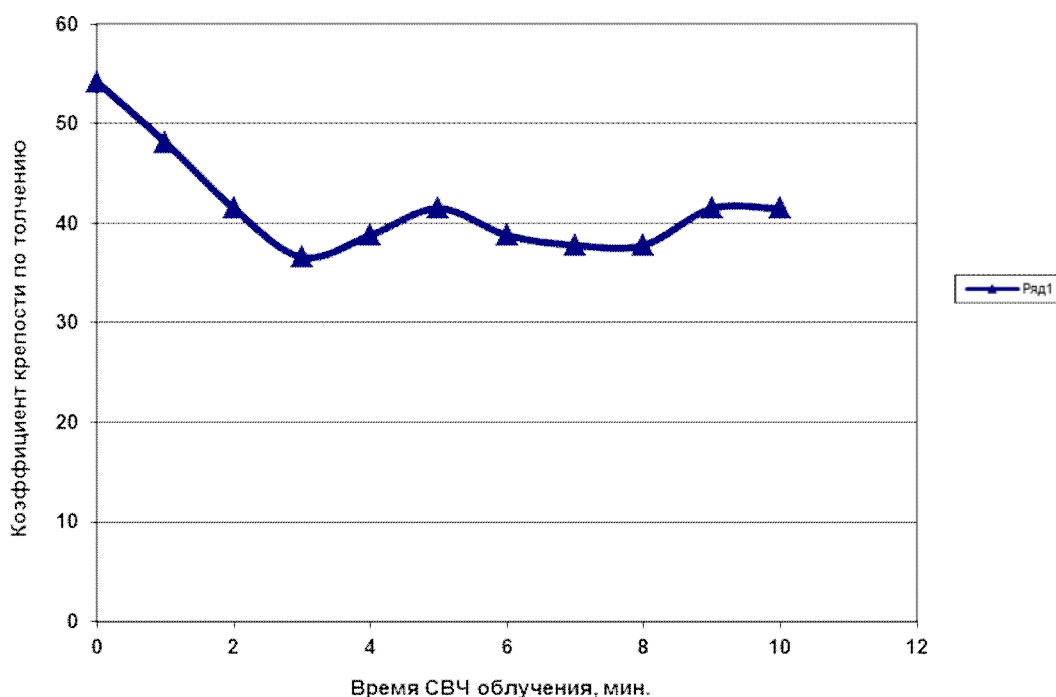


Рис. 5.1.4. График зависимости коэффициента крепости по толчению от времени СВЧ облучения (филлит серый, Кумтор).

Учитывая, что энергетические характеристики процесса измельчения представляют собой интегральные характеристики и имеют большое

практическое значение, предложен способ определения показателя удельной энергоемкости измельчения –  $K$ ,

$$K = \frac{nE_i}{V} \quad (5.1.3)$$

или

$$K = \frac{n \cdot mgh}{Sl} \quad (5.1.4),$$

где  $n$  – число ударов свободно падающего груза;

$E_i$  - энергия единичного удара;

$V$  -объем фракции размером менее 0,5 мм;

$m$  –масса свободно падающего груза;

$g$  -ускорение свободного падения;

$h$  -высота падения груза;

$S$  -площадь сечения объемомера.

Для облучения образцов горных пород нами использовалась СВЧ- печь (микроволновая печь), максимальная и средняя мощности которой составляла 1,5 МВт. Длительность облучения выбирается от 1 мин. до 15 мин с интервалом 2 – 5 мин. Как известно, микроволны СВЧ облучения представляют собой форму энергии, аналогичную электромагнитным волнам, используемыми в радио- и телевизионном вещании и обычному дневному свету. Обычно электромагнитные волны выходят наружу, и рассеивается в пространстве. В микроволновых печах встроен магнетрон, который располагается таким образом, чтобы можно было эффективно использовать энергию в печи. Электрическая энергия, поступающая магнетрону, преобразуется для генерации микроволновой энергии. В печи можно выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Было использовано уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн составляет – 2450 МГц. Образцы пород и руд после определения деформационных и акустических свойств в исходном состоянии помещаются в внутрь печи и облучаются СВЧ - импульсами. Продолжительность СВЧ облучения изменяется ступенчато и составляет 1-3-5-7-9 минут, для некоторых пород – 1-3-5-10-15 минут. Для каждой продолжительности времени

воздействия СВЧ волн определяется акустические и деформационные свойства, а также параметр остаточного напряжения горных пород. Исходные свойства горных пород определяются в условиях комнатной температуры. Таким образом, до проведения опытов по исследованию влияния СВЧ волн на механические свойства горных пород, были определены их акустические и деформационные свойства в исходном состоянии. Результаты исследований приводятся в таблицах 5.1.1- 5.1.4

На рис. 5.1.5- 5.1.7 представлены изменения модуля упругости и акустической жесткости горных пород от продолжительности СВЧ воздействия.

Из табл. 5.3.1-5.3.4 и рис. 5.1.1-5.1.3. видно что, для всех горных пород, когда время облучения в пределах 3-5 мин. модуль упругости и акустическая жесткость исследуемых пород уменьшается до минимума. Это объясняется тем, что при малом времени облучения происходит неравномерное поглощение электромагнитной энергии СВЧ излучения. СВЧ излучение приводит к существенному изменению акустических и деформационных свойств (рис.5.1.5-5.1.7.).

Таблица 5.1.1 - Акустические и деформационные характеристики образцов диорита (Жети - Огуз) до СВЧ облучения

Номер и режим СВЧ облучения образца	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Модуль упругости, $E, 10^4$ МПа	Модуль объемной упругости, $K, 10^4$ МПа	Модуль сдвига, $G, 10^4$ МПа	Акустическая жесткость $A, 10^6, \frac{кг}{сек \cdot м^2}$
До СВЧ облучения							
Образец 1-1	4277	2076	0,35	3,3	2,2	0,7	12,1
Образец 1-2	3827	2076	0,35	3,3	2,2	0,7	12,4
Образец 1-3	6103	1515	0,36	3,5	2,4	0,8	13,
Образец 1-4	4214	1547	0,25	4,5	2,8	1,1	12,5
Образец 2-1	6428	1536	0,36	3,5	2,4	0,7	13
Образец 2-2	3290	1457	0,26	4,2	2,6	1,0	12,1



Таблица 5.1.2 - Акустические и деформационные характеристики образцов диорита (Жети - Огуз) после СВЧ облучения

Номер и режим СВЧ облучения образца, (мин)	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, $E \cdot 10^4$ МПа	Модуль объемной упругости $K \cdot 10^4$ , МПа	Модуль сдвига, $G \cdot 10^4$ , МПа	Акустическая жесткость $A \cdot 10^6$ , $\frac{кг}{сек \cdot м^2}$
После СВЧ облучения							
об1-1(3м.)	4057	2119	0,26	4,5	1,8	2,06	1,4
об1-2(5м.)	4031	2109	0,26	4,5	1,7	2,04	11,4
об1-3(10)	4034	2113	0,26	4,5	1,7	2,04	11,4
об1-4(15)	4204	2494	0,29	4,6	1,7	2,18	11,8
об2-2(20)	4132	2444	0,29	4,4	1,7	2,11	11,6

Таблица 5.1.3 - Акустические и деформационные характеристики образцов известняка (Ак-Татыр, Баткенская область) до СВЧ облучения

Номер и режим СВЧ облучения образца	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, $E \cdot 10^4$ МПа	Модуль объемной упругости, $K \cdot 10^4$ МПа	Модуль сдвига, $G \cdot 10^4$ , МПа	Акустическая жесткость $A \cdot 10^6$ , $\frac{кг}{ж \cdot м^2}$
До СВЧ облуч.							
1	5500	2062	0,18	9,2	3,8	3,7	15,8
2	5500	2062	0,18	9,0	3,8	3,7	15,6
3	5583	2030	0,18	9,2	3,9	3,7	15,6
4	5583	2030	0,18	9,2	3,9	3,7	15,6
5	5583	2030	0,18	9,2	3,9	3,7	15,6
6	5307	2029	0,19	8,4	3,5	3,4	15,0
7	5384	2121	0,19	8,7	3,6	3,6	15,5
8	5384	2058	0,19	8,7	3,6	3,6	15,4
9	5538	2117	0,19	9,3	3,9	3,8	16,0
10	5538	2057	0,18	9,3	3,9	3,8	15,8

Таблица 5.1.4- Акустические и деформационные характеристики образцов известняка (Ак-Татыр, Баткенская область) после СВЧ облучения

Номер и режим СВЧ облучения образца	Скорость продольной волны, м/с	Скор. попер. волны, м/с	Коэф Пуассона	Модуль упругости, $E \cdot 10^4$ МПа	Модуль объемн. упругости, $K \cdot 10^4$ МПа	Мод. сдвига $G \cdot 10^4$ , МПа	Акустическая жесткость $A \cdot 10^6$ , $\frac{кг}{сек \cdot м^2}$
№1-выдержка 1мин	4714	2200	0,36	3,8	2,5	0,8	13,6
№2- выдержка 1мин	4714	2200	0,36	3,7	2,5	0,7	13,3
№3- выдержка 3мин	4785	2233	0,36	3,8	2,5	0,8	13,4
№4- выдержка 3мин	4785	2161	0,37	3,5	2,4	0,7	13,4
№5- выдержка 5мин	4785	2161	0,37	3,6	2,4	0,7	13,4
№6- выдержка 5мин	4600	2225	0,34	3,7	2,5	0,8	13,0
№7- выдержка 7мин	4666	2258	0,34	3,9	2,6	0,8	13,4
№8- выдержка 7мин	4666	2187	0,35	3,7	2,5	0,7	13,3
№9- выдержка 9мин	4800	2250	0,35	3,9	2,7	0,8	13,8
№10-исходный	4800	2250	0,35	3,9	2,6	0,8	13,7

Табл. 5.1.5.

Название и место отбора породы, режим термообработки	Коэффициент крепости по толчению		Удельно-объемная энергоемкость измельчения, Дж/см <sup>3</sup>		
	Исходное состояние	по предл. способу	Исходное состояние	По предл. способу	
1	2	3	4	5	
Гранит (Сары-Жаз, скв. 277), медленный нагрев, охлаждение в воде	5,6	1,6	9,9	2,9	
	4,0	1,7	7,1	2,9	
	3,7	1,4	6,6	2,5	
	4,2	1,4	7,4	2,5	
	5,6	1,5	9,9	2,7	
	среднее значение	4,6	1,5	8,2	2,7
	сред. квадр. откл. коэфф. вариации	0,82		1,43	
	17,8		17,4		
Гранит (Сары-Жаз, скв. 1066), медленный нагрев, охлаждение в воздухе	4,0	2,4	7,1	4,3	
	4,2	2,5	7,4	4,4	
	4,4	2,2	7,7	3,8	
	3,8	2,5	6,8	4,4	
	4,1		7,2		
	среднее значение	4,1	2,4	7,2	4,2
	сред. квадр. откл. коэфф. вариации	0,2		0,3	
	4,9		4,2		
Гранит (Сары-Жаз, скв. 1066), медленный нагрев, охлаждение в воде	4,0	2,3	7,1	4,1	
	4,2	2,2	7,4	3,9	
	4,4	2,5	7,7	4,4	
	3,8	2,3	6,8	4,0	
	4,1		7,2		
	среднее значение	4,1	2,3	7,2	4,1
	сред. квадр. откл.	0,2		0,3	

коэфф. вариации	4,9		4,2	
Гранит (Сары-Жаз, скв. 183), медленный нагрев, охлаждение в воздухе	2,9	1,2	5,2	2,1
	3,1	1,2	5,5	2,2
	3,2	1,1	5,6	2,1
	3,1	1,2	5,4	2,1
	2,9		5,1	
среднее значение	3,0	1,2	5,4	2,1
сред. квадр. откл.	0,13		0,19	
коэфф. вариации	4,3		3,6	
Гранит (Сары-Жаз, скв. 183), медленный нагрев, охлаждение в воде	2,9	1,1	5,2	1,9
	3,1	1,2	5,5	2,1
	3,2	1,1	5,6	2,0
	3,1	1,2	5,4	2,1
	2,9	1,1	5,1	2,0
среднее значение	3,0	1,1	5,4	2,0
сред. квадр. откл.	0,13		0,19	
коэфф. вариации	4,3		3,6	

Зависимость акустической жесткости от времени воздействия СВЧ волн (известняк доломитизированный, к. Ак-Татыр, Баткенск обл.)

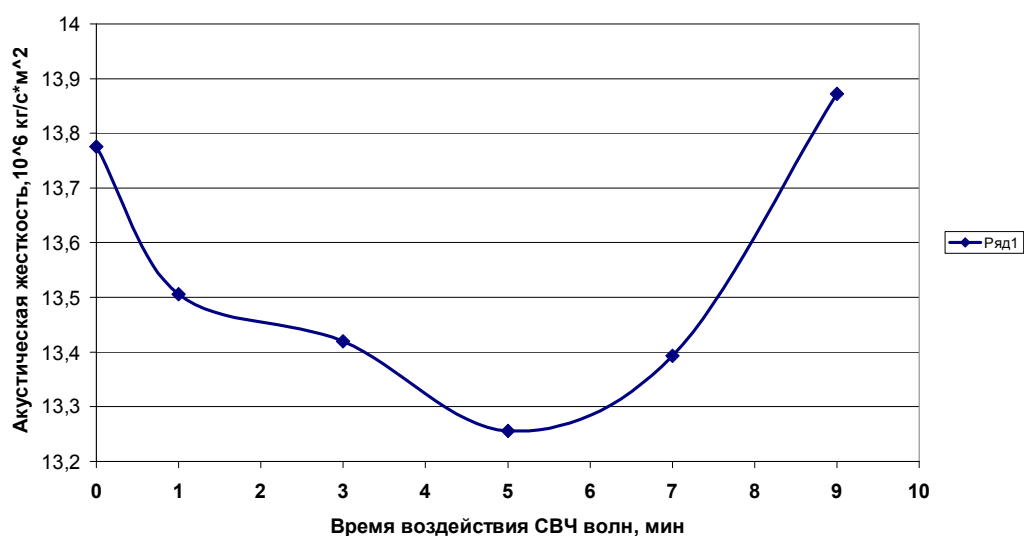


Рис.5.1.5. График изменения акустической жесткости от продолжительности СВЧ воздействия (известняк доломитизированный, к. Ак-Татыр, Баткенская область).



Рис. 5.1.6 . График изменения модуля упругости от продолжительности СВЧ воздействия (известняк доломитизированный, к. Ак-Татыр, Баткенская область) .



Рис. 5.1.7. График изменения модуля упругости от продолжительности СВЧ воздействия (известняк, к. Даана, Лейлекский район).

Породы содержащие металлы сильно поглощают СВЧ- волны и являются источниками тепла вызывающий нарушение сплошности горных пород. С увеличением времени воздействия СВЧ излучения градиент температуры по всему объему образца выравнивается и снимается температурное напряжение. Это приводит к восстановлению упругости горных пород.

Для горных пород, более длительное СВЧ излучение (более 3-5 минуты), приводит к увеличению упругости (рис.5.1.5-5.1.7). Это объясняется тем, что исследуемые горные породы по вещественному составу неоднородные, в них поглощение энергии СВЧ излучения по всему объему образца происходит неравномерно и по всей вероятности при длительном облучении формируются сжимающие остаточные напряжения.

Было показано, что путем термической обработки горных пород можно добиться устранения или формирования остаточных напряжений. Результаты исследований процессов деформации и разрушения горных пород методом тензометрии и акустической эмиссии показали значительность влияния остаточных напряжений на указанные процессы. Остаточные напряжения в горных породах, наведенные термической обработкой, как показали экспериментальные исследования, приводят к увеличению в них суммарного энерговыделения акустической эмиссии в 2-5 раз, по сравнению суммарным энерговыделением, при нагружении горных пород исходного состояния. Данные экспериментальные факты свидетельствуют о значительности вклада наведенных остаточных напряжений в трещинообразование при нагружении горных пород, а также о возможности изменения прочности и измельчаемости горных пород в 2-5 раз по сравнению с исходным состоянием, что имеет принципиальное значение для практики подготовки и переработки руд. На основе результатов исследований процессов деформирования и разрушения горных пород для условий их исходного состояния и наведения остаточных напряжений термической обработкой нами разработан способ разупрочнения руд.

Способ разупрочнения руд предназначен для уменьшения энергоемкости измельчения руд при подготовке их к обогащению и увеличения извлечения металлов и полезных компонентов. Рекомендуется для внедрения на горно-обогатительных комбинатах при измельчении и извлечении металлов и полезных компонентов из трудно измельчаемых руд. Сущность способа заключается в том, что измельчаемую руду предварительно нагревают в трубчатой печи до температуры кристаллизации основных минералов, затем подвергают резкому охлаждению в воздушной или в водной среде в зависимости от типа руды. Наибольший эффект достигается в том случае, когда режим термической обработки руд соответствует тепловым свойствам (коэффициент теплового расширения, теплопроводность, температура кристаллизации) основных минералов, выбирается с учетом влияния термических и остаточных напряжений на трещинообразование. Избирательность формирования местных термических и остаточных напряжений по разным минеральным образованиям, связанная с различием их тепловых и механических свойств, при целенаправленном управлении указанными напряжениями позволяет улучшить раскрываемость минеральных зерен извлекаемого металла или полезного компонента в процессе измельчения руды.

Остаточные напряжения, которые оказывают значительное влияние на образование микро- и макротрещины при внешних (ударных или статических) нагружениях, как известно, устраняются или формируются в зависимости от температурных режимов.

В процессе термообработки руд формируются микротрещины и остаточные напряжения, которые впоследствии в значительной мере определяют эффективность измельчения и обогащения за счет снижения энергоемкости разрушения и улучшения раскрываемости минеральных зерен по их границам.



С точки зрения разрушения горных пород сжимающие остаточные напряжения препятствуют, а растягивающие – способствуют развитию существующих трещин при внешнем нагружении.

Преимущество предлагаемого способа по сравнению с известными подобными способами заключается в том, что измельчаемость и раскрываемость минеральных зерен увеличивается при снижении энергоемкости процесса разрушения.

Экономическая эффективность данного способа обеспечивается за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен, уменьшения энергоемкости измельчения руд, износа контактных частей измельчителей, т.е. уменьшения расхода металлов.

Результаты исследований показали, что при использовании предлагаемого способа в зависимости от типа руд и режимов их термической обработки коэффициент крепости по толчению и удельно-объемная энергоемкость измельчения уменьшаются до 2 раз по сравнению с соответствующими данными исходного состояния (табл.5.1.1). Несмотря на дополнительное энергопотребление при термообработке, за счет эффекта кратного разупрочнения общее суммарное энергопотребление на измельчение крепких руд при использовании описанного способа снижается существенно. Значение крепости и удельной энергоемкости горных пород Сары-Джазского месторождения для исходного состояния и по предложенному способу разупрочнения уменьшаются порядка два раза.

Снижение удельной энергоемкости при разупрочнении предложенным способом, несмотря на дополнительное энергопотребление для термообработки, обеспечивается не только кратностью снижения прочности, но еще тем, что к.п.д. электропечей значительно выше, чем к.п.д. измельчителей, дробилок. Например, тепловую энергию можно накапливать, сохранять с помощью теплоизоляционных материалов, эффективно передавать из одного твердого тела в другое.

Для наилучшего приближения к производственным условиям и обеспечения точности и удобства сравнения удельной энергоемкости измельчения горных пород (руд), наряду с предложенным показателем, определяемым по формуле (5.1.4), рекомендуем определять производственную удельную энергоемкость измельчения, непосредственно используя дробилку следующим путем. Загрузить валковую дробилку типа ДГ200х125 представительными кусками (со средним размером куска в поперечнике 20мм) с общим весом 3кг (одна навеска). После работы дробилки в течении 1мин продукты измельчения просеять через сито с размером ячейки 0,5мм.

Производственная удельная энергоемкость измельчения руды определяется как отношение расходуемой электроэнергии к объему фракции менее 0,5мм получаемой при дроблении в течении 1минуты, т.е.

$$K_{II} = \frac{E_d}{V}, \frac{Дж}{см^3}. \quad (5.1.5)$$

где  $E_d$  -расходуемая электрическая энергия при работе дробилки в течении 1 минуты;

$V$  -объем фракции, менее 0,5мм, получаемой при дроблении в течении 1 минуты.

Затем повторяя определения производственной энергоемкости измельчения 5-7 раз, устанавливается среднее значение.

## **5.2. Аналитические исследования закономерности изменения температуры руд от продолжительности времени воздействия СВЧ волн.**

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 [54] заключается в том, что по данным определения удельной энергоемкости измельчения для исходного состояния (не подвергнутых воздействию состояние), и для разных

величин длительности СВЧ воздействия, определения оптимального значения продолжительности времени воздействия СВЧ волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды. В качестве примера на рис. 5.2.1 приводится график энергоемкости измельчения минерала кварца. Оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ волн принимают для обработки всей руды данного типа и размера кусков подлежащих измельчению в производственных условиях. Как видно из рис. 5.4.2; 5.4.4; 5.4.8; 5.2.1; оптимальные значения времени воздействия СВЧ волн для известняка (карьер Ак-Татыр, Баткенская область), диорита (месторождение Токтозан), филлита серого (рудник Кумтор) составляет 3 минуты, а для кварца (рудник Восточный Коунрад) – 5 минут.

Как указано выше, для облучения можно использовать СВЧ - печь (микроволновая печь). Нами использована уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м<sup>3</sup>. 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 интервалам: 1;3;5;7;9 и 1-12 минут, с интервалом 1 мин. Для каждого интервала СВЧ воздействия определяется удельная энергоемкость измельчения руды или минерала.

Зависимость удельной объемной энергоёмкости измельчения кварца (Восточный-Коунрад, обр.7, ПК298+50) от времени воздействия СВЧ волн

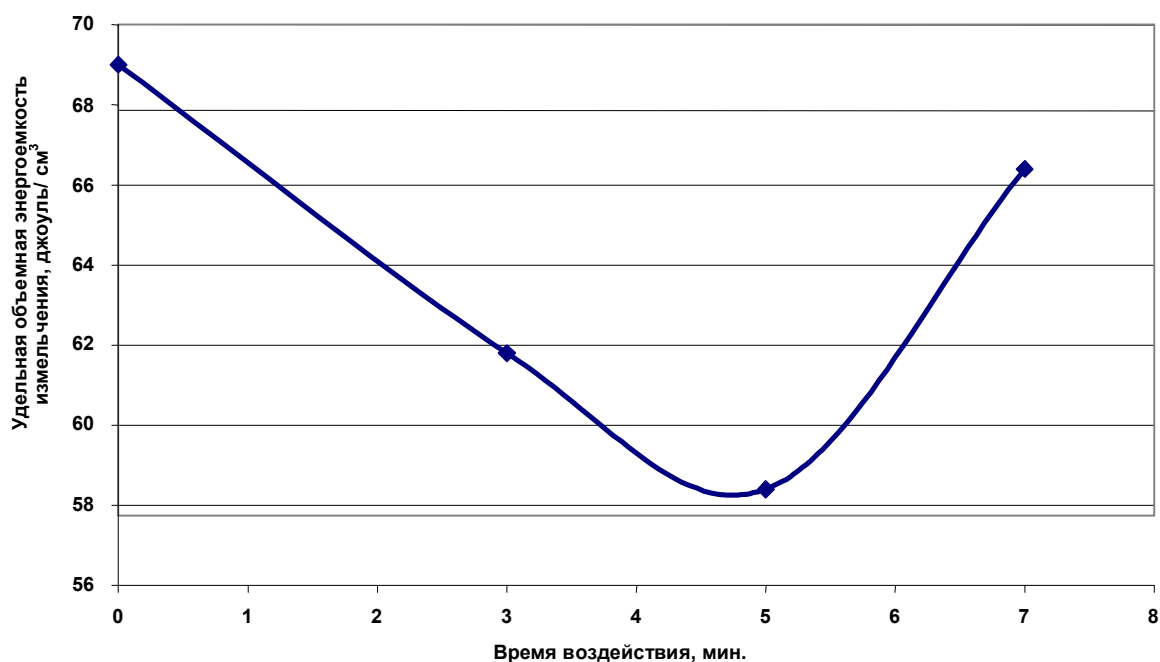


Рисунок 5.2.1. Зависимость энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ волн (кварц, Восточный-Коунрад)

Как выше упомянуто, 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 при СВЧ облучении температура породы повышается на  $dT$ .

$$dT = \frac{Pt}{c\rho} \quad (5.2.1)$$

где  $P$  – мощность СВЧ поля, поглощаемая единицей объема породы;  
 $t$  – время воздействия СВЧ волн;  $c$  – удельная теплоемкость породы;  
 $\rho$  – плотность породы.

Подставляя  $dT = T_2 - T_1$  и  $P = \frac{N}{V}$  в формулу ( 5.2.1) получим

$$T_2 - T_1 = \frac{Nt}{Vc\rho} \quad (5.2.2)$$

где  $V$  – объем навески породы;  $T_1$  - первоначальная температура, К ;

$T_2$  - температура при исследуемой длительности нагрева ( $t, c$ ) в К;  $N$  - мощность СВЧ установки.

Температуру породы для разной длительности воздействия СВЧ волн можно определить по формуле (5.2.2)

Таблица 5.2.1 – Удельная теплоемкость горных пород рудных месторождений [48].

Название горной породы	Удельная теплоемкость, $C_0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
диабаз	0,77
кварцит	0,72-0,85
кварцито-песчаник	0,79
сидерит	0,7-0,73
магнетит	0,5-0,6
скарн гранат магнетитовый	0,68-0,74
карбонат кальцитовый	0,34
известняк	0,45
карбонат доломитовый	0,98
сланцы окварцованные	0,79
гранит	0,87-0,6
известняк	0,9-1
гранодиорит	0,65
песчаник	0,78
мрамор	0,6-0,9
гранит	0,73
апатит	0,7
гипс	0,9-1
гранит красный	0,8-0,9
алевролит	0,8-0,9
песчаник с известковым цементом	1,38

Для диорита, с месторождения Токтозан, удельной теплоемкостью  $C_0 = \frac{0,65 \text{ кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  (табл. 5.2.1) и учетом навески (пробы) 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  $c = 0,65 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , определим температуру нагрева для разных продолжительностях времени воздействия СВЧ волн. Вначале, для  $t = 40 \text{ с}$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho Vn} = \frac{700 \cdot 40}{650 \cdot 2700 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 319 \text{ К}, \quad (5.2.3)$$

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

Известно, что при повышении температуры повышается и удельная теплоемкость горных пород.

Считают, что при температуре от 273 до 773 К (от 0 до 500<sup>0</sup> С) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону.

Для определения удельной теплоемкости горных пород для соответствующей температуры запишем

$$c_T = c_0 + c_0 T_K \quad (5.2.4),$$

где  $c_T$  – удельная теплоемкость для соответствующей температуры;

$c_0$  – удельная теплоемкость исходного состояния (начальная, для комнатной температуры);

$T_K$  – коэффициент пропорциональности.

При увеличении продолжительности действия СВЧ волн более 1 минуты температура горной породы повышается не строго по линейному закону и поэтому необходимо исследовать характер изменения удельной теплоемкости от продолжительности воздействия СВЧ волн. На основе экспериментальных

исследований и с учетом формулы (5.2.4) совместно с Тажибаевым К.Т. получена следующая зависимость удельной теплоемкости горных пород.

$$c_T = c_0 + c_0 \frac{t_m R_m}{4} \quad (5.2.5),$$

$t_m$  – продолжительность СВЧ воздействия в минутах;

$R_m$  – коэффициент размерности времени, 1/минут.

Формула (5.2 5) справедлива для температур от 0 до 1000<sup>0</sup>С, так как выше этой температуры в горных породах возможны процессы разложения.

Принимая для диорита (Токтозан)  $C_0 = 0,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  [48], определим на основе полученной нами формулы (5.2.5) теплоемкость данной руды для продолжительности времени воздействия СВЧ волн равной 1 минуте:

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

тогда, с учетом найденного значения теплоемкости, соответствующей времени воздействия СВЧ волн равной 1 минуте, определим по формуле (5.2.2.) температуру нагрева, соответствующего времени продолжительности воздействия волн.

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 60}{\frac{0,81 \text{ кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг} / \text{м}^3} = \frac{42 \text{ кДж}}{0,11 \text{ кДж}} = 381 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 381 + 20 = 401 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 401 - 273 = 128^\circ\text{C} .$$

Удельная теплоемкость при продолжительности времени воздействия СВЧ волн, равное 2 минуты:

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

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 120 \text{ с}}{\frac{0,975 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{84 \text{ кДж}}{0,132 \text{ кДж}} = 636 \text{ К};$$

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

При продолжительности времени 3 минуты,

$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{3}{1}\right) = 1,14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 180 \text{ с}}{\frac{1,14 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{126 \text{ кДж}}{0,1539 \text{ кДж}} = 819 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 819 + 20 = 839 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 839 - 273 = 566 \text{ }^\circ\text{C} .$$

При 5- минут времени воздействия СВЧ волн,

$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{5}{4}\right) = 1,462 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 300 \text{ с}}{\frac{1,462 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{210 \text{ кДж}}{0,197 \text{ кДж}} = 1066 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1066 + 20 = 1086 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1086 - 273 = 813 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн- 7 минута

$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{7}{1}\right) = 1,788 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 420 \text{ с}}{\frac{1,788 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{294 \text{ кДж}}{0,241 \text{ кДж}} = 1220 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1220 + 20 = 1240 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1240 - 273 = 967 \text{ }^\circ\text{C} .$$

При 9 минут времени воздействия СВЧ волн



$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{9}{4}\right) = 2,11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 540 \text{ с}}{2,11 \text{ кДж} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{378 \text{ кДж}}{0,2848 \text{ кДж}} = 1327 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1327 + 20 = 1347 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1347 - 273 = 1074 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Когда  $t=10$  мин. воздействия СВЧ волн,

$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{10}{4}\right) = 2,275 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 600 \text{ с}}{2,275 \text{ кДж} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{420 \text{ кДж}}{0,307 \text{ кДж}} = 1368 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1368 + 20 = 1388 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1388 - 273 = 1115 \text{ }^\circ\text{C}$$

При 12 минут времени воздействия СВЧ волн

$$C_T = 0,65 \left(1 + \frac{12}{4}\right) = 2,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 720 \text{ с}}{2,6 \text{ кДж} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{504 \text{ кДж}}{0,351 \text{ кДж}} = 1436 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1436 + 20 = 1456 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1456 - 273 = 1183 \text{ }^\circ\text{C}$$

На рис. 5.2.2. представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для диорита месторождения Токтозан. Как видно из рисунка, выше  $566^\circ\text{C}$ , при дальнейшем увеличении времени воздействия СВЧ волны температура руды изменяется не линейно. Следует также отметить, что температура  $566^\circ\text{C}$  соответствует 3-х минутному СВЧ воздействию и при этой продолжительности времени обеспечивается минимальность удельной энергоёмкости измельчения. Дальнейшее увеличение времени воздействия волн, наоборот (рис.5.2.4) приводит к

увеличению энергоемкости измельчения (рассматриваются и представлены средние значения данного показателя). Таким образом, переломное время воздействия СВЧ волн – 3 минуты, соответствует температура 566<sup>0</sup> С, он может служить характеристикой для диорита Токтозанского месторождения, при которой реализуется эффективное измельчение.

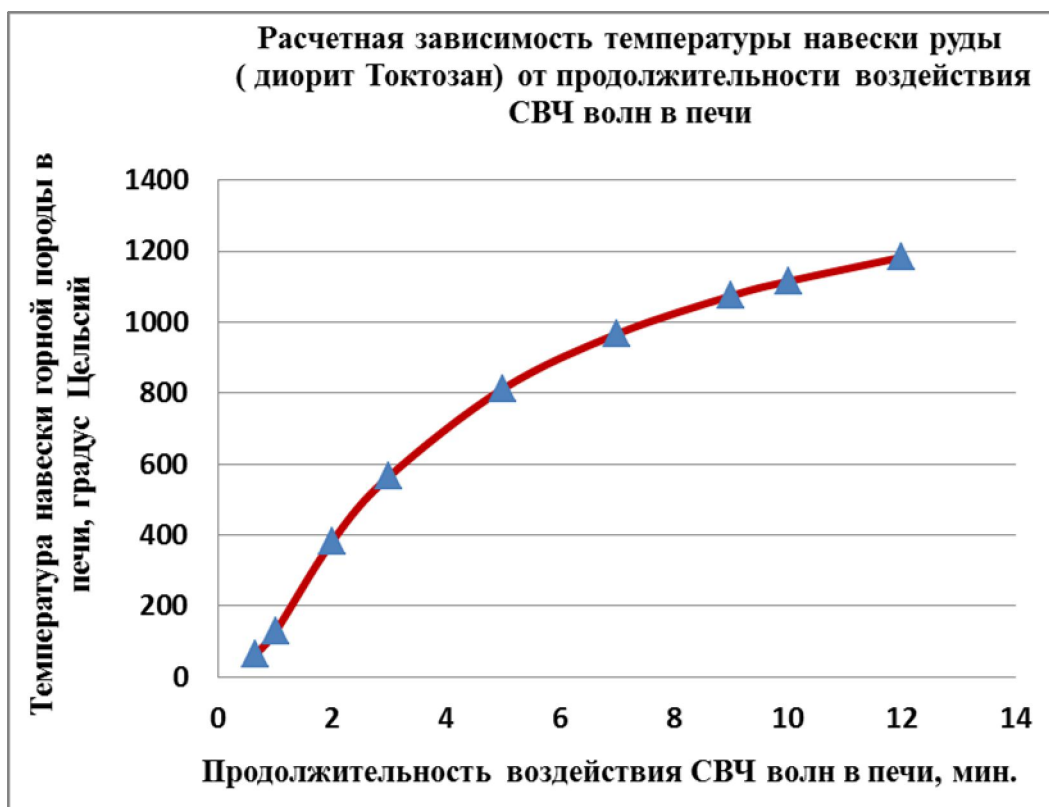


Рис. 5.2.2. График изменения температуры навески руды (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

По выше указанной формуле (5.2.5) найдем зависимость удельной теплоемкости от времени воздействия СВЧ волн и соответствующую температуру для темно-серого филлита месторождения Кумтор. Исходную удельную теплоемкость берем из таблицы  $C_0 = \frac{0,79 \text{ кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  (табл. 5.2.1. сланцы) [48].

При времени воздействия СВЧ волн равной 1- минуте

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t_m R_m}{4}\right) = 0,79 \left(1 + \frac{1}{4}\right) = 0,99 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 60 \text{ с}}{0,99 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{42 \text{ кДж}}{0,148 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 284 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 284 + 20 = 304 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 304 - 273 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$$

При продолжительности времени волн - 2 минуты

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{2}{1}\right) = 1,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 120 \text{ с}}{1,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{84 \text{ кДж}}{0,177 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 475 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 475 + 20 = 495 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 495 - 273 = 222 \text{ }^\circ\text{C}$$

Для продолжительности времени волн равной 3 минуте

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{3}{1}\right) = 1,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 180 \text{ с}}{1,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{126 \text{ кДж}}{0,207 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 609 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 609 + 20 = 629 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 629 - 273 = 356 \text{ }^\circ\text{C} .$$

При продолжительности времени волн - 5 минута

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{5}{1}\right) = 1,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 300 \text{ с}}{1,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{210 \text{ кДж}}{0,267 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 786 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 786 + 20 = 806 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 806 - 273 = 533 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн- 6 минута

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{6}{1}\right) = 1,975 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 360 \text{ с}}{1,975 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{252 \text{ кДж}}{0,296 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 851 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 851 + 20 = 871 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 871 - 273 = 598^\circ\text{C}$$

Для времени воздействия СВЧ волн -7 минута

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{7}{1}\right) = 2,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 420 \text{ с}}{2,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{294 \text{ кДж}}{0,326 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 902 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 902 + 20 = 922 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 922 - 273 = 649^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн-9 минута

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{9}{1}\right) = 2,57 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 540 \text{ с}}{2,57 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = \frac{378 \text{ кДж}}{0,386 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 979 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 979 + 20 = 999 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 999 - 273 = 726^\circ\text{C} .$$

На рис. 5.2.3. представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия темно-серого филлита месторождения Кумтор. Как видно из рисунка, выше  $350^\circ\text{C}$  температура руды от продолжительности СВЧ воздействия изменяется не линейно. В данном случае температура  $350^\circ\text{C}$  соответствует 3-х минутному СВЧ воздействию и при этой продолжительности времени воздействия волн на данную руду удельная энергоёмкость измельчения минимальная. Следовательно температура  $350^\circ\text{C}$  может служить характеристикой для темносерого филлита месторождения

Кумтор, так как при этой температуре, реализуется эффективное измельчение данной руды. Согласованность результатов определения температуры по формуле (5.2.5) с экспериментальными результатами энергоемкости измельчения свидетельствует о правомерности данной формулы.

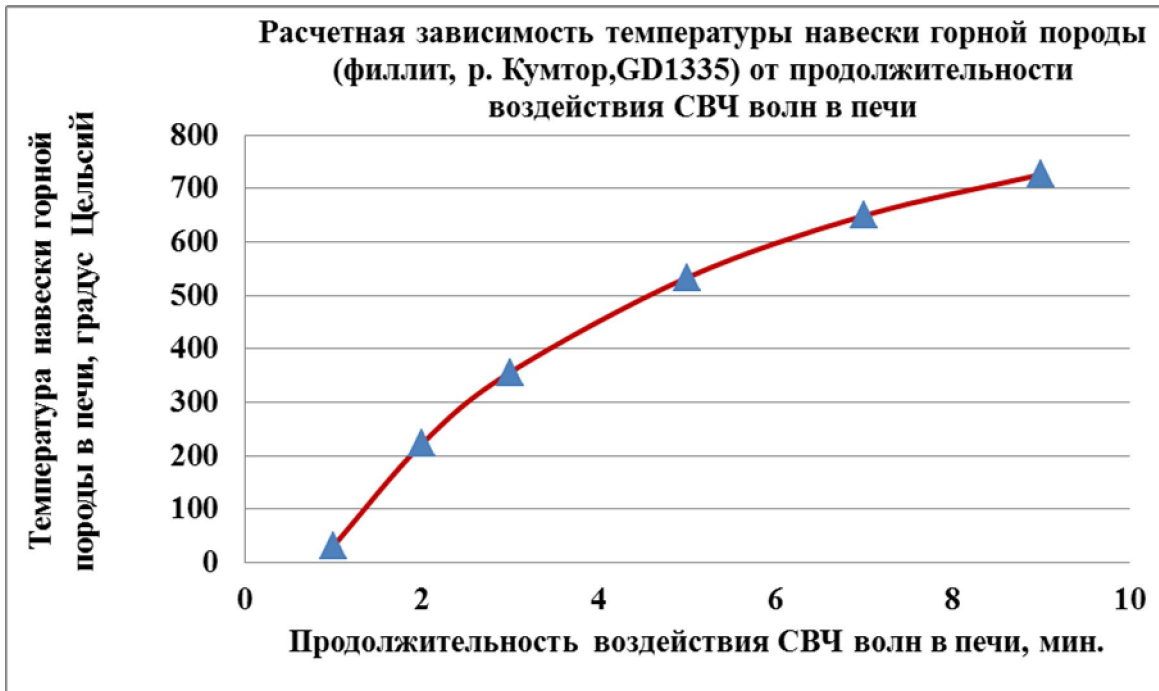


Рис. 5.2.3. График изменения температуры навески руды (темносерый фиолит, Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

Далее, определим на основе формулы (5.2.5) теплоемкость кварца (Восточный Коунрад), а по формуле (5.2.2.) -температуру нагрева для разных продолжительностях времени воздействия СВЧ волн. Для кварца, удельную теплоемкость при нормальных условиях, принимаем  $C_0 = 0,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$  [48] , плотность  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$ .

При времени воздействия СВЧ волн равной 1 минуте

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t_m \cdot \rho_m}{4}\right) = 0,74 \left(1 + \frac{1}{4}\right) = 1,665 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 60 \text{ с}}{0,925 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{42 \text{ кДж}}{0,1221 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 344 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 344 + 20 = 364 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 364 - 273 = 91 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 2 минуты

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{2}{4}\right) = 1,11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 120 \text{ с}}{1,11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{84 \text{ кДж}}{0,1465 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 573 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 573 + 20 = 593 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 593 - 273 = 320 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени волн 3 минуты

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{3}{4}\right) = 1,295 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 180 \text{ с}}{1,295 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{126 \text{ кДж}}{0,171 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 737 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 737 + 20 = 757 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 757 - 273 = 484 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

При времени воздействия СВЧ волн- 4 минуты

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{4}{4}\right) = 1,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 240 \text{ с}}{1,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{168 \text{ кДж}}{0,1954 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 860 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 860 + 20 = 880 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 880 - 273 = 607 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 5 минут

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{5}{4}\right) = 1,665 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 300 \text{ с}}{\frac{1,665 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{210 \text{ кДж}}{0,2198 \text{ кДж}} = 955 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 955 + 20 = 975 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 975 - 273 = 702 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 6 минут

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{6}{1}\right) = 1,85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 360 \text{ с}}{\frac{1,85 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{252 \text{ кДж}}{0,2442 \text{ кДж}} = 1032 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1032 + 20 = 1052 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1052 - 273 = 779 \text{ }^\circ\text{C} .$$

При времени воздействия СВЧ волн равной 7 минута

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{7}{1}\right) = 2,035 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 420 \text{ с}}{\frac{2,035 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг/м}^3} = \frac{294 \text{ кДж}}{0,2686 \text{ кДж}} = 1094 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1094 + 20 = 1114 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1114 - 273 = 841 \text{ }^\circ\text{C}$$

Также определяем эти показатели для известняка месторождения Ак-Татыр. Для известняков значения удельной теплоемкости колеблются в широких пределах (табл.5.2.1) [48]: 0,45; 0,75; 0,9-1  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Принимаем для известняка Ак-Татыр среднее значение удельной теплоемкости  $C_0 = 0,775 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Плотность данной породы равна  $2710 \text{ кг/м}^3$ . Определим на основе формулы (5.2.5) удельные теплоемкости известняка Ак-Татыр при продолжительностях времени воздействия СВЧ волн от 1 мин. -9 мин., с интервалом 1 минута, а по формуле (5.2.2) -температуру нагрева.

При времени воздействия 1 минута,

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t \cdot R_{T1}}{4}\right) = 0,775 \left(1 + \frac{1}{4}\right) = 0,968 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 60 \text{ с}}{0,968 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} = \frac{42 \text{ кДж}}{0,127 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 331 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 331 + 20 = 351 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 351 - 273 = 78 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 2 минуты

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{2}{4}\right) = 1,16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 120 \text{ с}}{1,16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} = \frac{84 \text{ кДж}}{0,15 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 560 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 560 + 20 = 580 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 580 - 273 = 307 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Продолжительность времени воздействия СВЧ волн- 3 минута,

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{3}{4}\right) = 1,356 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 180 \text{ с}}{1,356 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} = \frac{126 \text{ кДж}}{0,1779 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 708 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 708 + 20 = 728 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 728 - 273 = 455 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При времени воздействия СВЧ волн- 5 минута

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{5}{4}\right) = 1,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 300 \text{ с}}{1,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} = \frac{210 \text{ кДж}}{0,228 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 921 \text{ К};$$



$$T_2 = \Delta T + T_1 = 921 + 20 = 941 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 941 - 273 = 668 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Время воздействия СВЧ волн- 7 минута,

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{7}{4}\right) = 2,13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 420 \text{ с}}{2,13 \text{ кДж} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг/м}^3} = \frac{294 \text{ кДж}}{0,2796 \text{ кДж}} = 1052 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1052 + 20 = 1072 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 1072 - 273 = 799 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

При времени воздействия СВЧ волн -9 минута,

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{9}{4}\right) = 2,519 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{c\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 560 \text{ с}}{2,519 \text{ кДж} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг/м}^3} = \frac{392 \text{ кДж}}{0,3305 \text{ кДж}} = 1186 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 1186 + 20 = 1206 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 974 - 273 = 933 \text{ } ^\circ\text{C}$$

На рисунках 5.2.4 и 5.2.5 представлены графики изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для кварца месторождения Восточный – Коунрад и известняка месторождения Ак – Татыр.

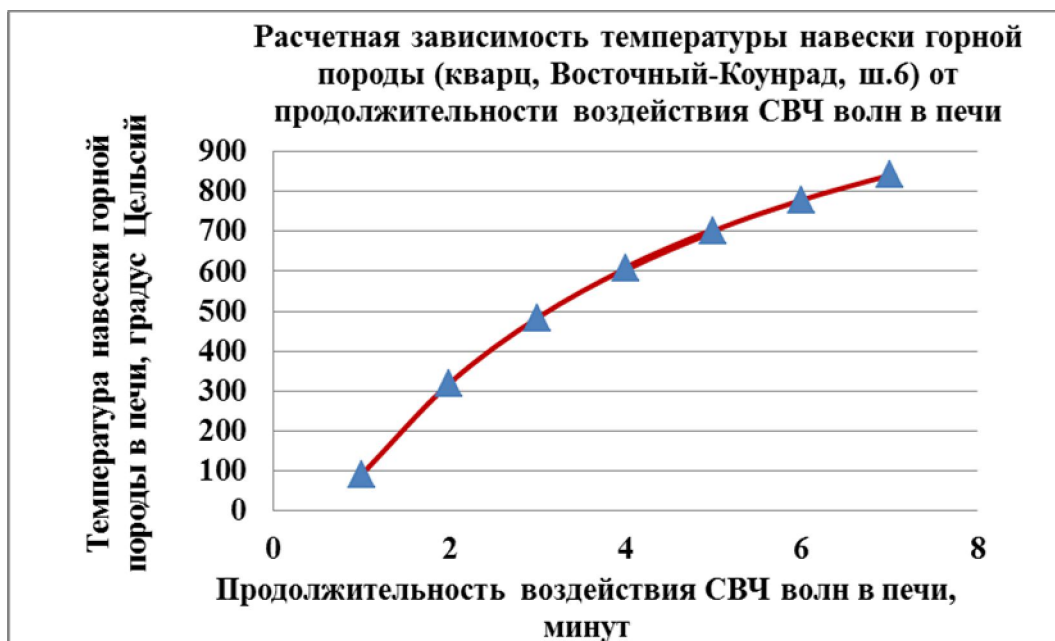


Рисунок 5.2.4 - График изменения температуры навески руды (кварц, Восточный - Коунрад) от продолжительности воздействия СВЧ волн.



Рисунок 5.2.5 - График изменения температуры навески руды (известняк, Ак - Татыр) от продолжительности воздействия СВЧ волн.

### 5.3. Результаты аналитических исследований зависимости энергоемкости измельчения руд от времени воздействия СВЧ волн

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:

$$\sigma_0 > \sigma_{сж} > \tau_c > \sigma_p \quad (5.3.1.),$$

где  $\sigma_0$  – прочность при объемном (трехосном) сжатии;

$\sigma_{сж}$  - прочность при одноосном сжатии;  $\tau_c$  - прочность при срезе (сдвиг);

$\sigma_p$  - прочность при одноосном растяжении

Хрупкость и пластичность (вязкость) горных пород существенно влияют на энергоемкость их разрушения. В качестве показателя - коэффициента хрупкости -  $K_{xp}$  горной породы предложено отношение прочности при одноосном сжатии к прочности при одноосном растяжении [20]  $K_{xp} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}$ .

Обратную к показателю хрупкости величину назовем коэффициентом сопротивляемости разрушению горной породы  $K_c = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$ .

Изменение удельной энергоемкости измельчения горных пород (руд) зависит от остаточного напряжения  $\sigma_0$  и показателя сопротивляемости породы

разрушению  $\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$ .

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

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \cdot K_p \quad (5.3.2),$$

где  $E_V$  – удельная энергоёмкость измельчения после СВЧ облучения;

$E_{VO}$  - удельная энергоёмкость измельчения до СВЧ облучения (исходного состояния);

$K_p$  – коэффициент энергоёмкости разрушения горной породы, зависящий от разности коэффициента сопротивляемости разрушению  $K_c$  и показателя напряженности  $K_\sigma$ , то есть  $K_p = K_c - K_\sigma$ .

Показатель напряженности  $K_\sigma$  представим в виде

$$K_\sigma = \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \quad (5.3.3),$$

где  $|\sigma_0|$  - абсолютное среднее значение остаточных напряжений;

$K_T$  - неизвестный эмпирический коэффициент напряженности.

С учетом равенства (5.3.3), запишем

$$K_p = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \quad (5.3.4),$$

тогда из равенства (5.3.2),

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) \quad (5.3.5)$$

или

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - E_{VO} \frac{K_T \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \quad (5.3.6)$$

Таким образом, в уравнении (5.3.6) 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 средних (Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М., «Наука», 1970, с. 432), как наиболее простой и не требующих сложных математических преобразований.

$$\text{Введем обозначения: } Y = E_V; a = E_{V0}; b = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}; c = \frac{1}{\sigma_{сж}}; X = \sigma_0.$$

Уравнение (5.3.6) записывается в соответствии с обозначениями, тогда, имеем  $Y = a + ab - acXK_T$  или  $Y - a(1 + b - cXK_T)$  (5.3.7).

В уравнении необходимо определить только коэффициент  $K_T$ , так как остальные показатели известны. Способ средней, по которому определяется  $K_T$ , состоит в следующем. Пусть даны экспериментальные значения  $X$  и  $Y$ . Вследствие наличия неизбежных экспериментальных ошибок и отклонений, наблюдаемые значения  $Y_i$  (или  $E_V$ ) будут отличны от  $a(1 + b - cXK_T)$ , тогда, отклонение определяется из следующего равенства:  $\Delta_i = Y_i - a(1 + b - cX_iK_T)$ . Если параметр  $K_T$  выбрать так, чтобы для всех  $N$  наблюдений отклонения уравновешивались, то есть  $\sum_i^N \Delta_i = 0$ , то это приводит нас к следующему уравнению:

$$\sum_i^N [Y_i - a(1 + b - cX_iK_T)] = 0 \quad (5.3.8).$$

Из уравнения (8) легко определяется коэффициент  $K_T$ , так как остальные параметры известны. Например, для темносерого филлита месторождения Кумтор (для 8 условий опытов: 1;2;3;4;5;6;7;8 минут СВЧ облучения) имеются следующие средние (из пяти опытов) значения удельной энергоемкости измельчения в (Дж/см<sup>3</sup>): 97;85;72;63;69;74;68;67;67 и соответственно данные  $\sigma_n$  (кГ/см<sup>2</sup>): 53,46;114,17;156,13; -99,74; -125,12; -144,54; -160,62; -174,16 (всего 40 опытов). В соответствии с уравнением (5.3.8)

$$\sum_i^N [Y_i - a(1 + b - cX_i K_T)] = 0, \quad \text{или}$$

$$565 - 8 \cdot 97 - 8 \cdot 0,0504 \cdot 97 + 0,00089 \cdot K_T \cdot 97 \cdot 1027 = 0$$

$$565 - 776 - 39,11 + 88,66 K_T = 0 \quad \text{отсюда} \quad K_T = 2,82$$

Для кварца Восточно-Коунрадского месторождения (для 7 условий опытов - всего 35 опытов: 1;2;3;4;5;6;7 минут СВЧ облучения)

$$\sum_i^N [Y_i - a(1 + b - cX_i K_T)] = 0, \quad \text{или}$$

$$438 - 7 \cdot 69 - 7 \cdot 0,0343 \cdot 69 + 0,00057 \cdot K_T \cdot 69 \cdot 699 = 0$$

$$438 - 483 - 16,6 + 27,5 K_T = 0, \quad \text{отсюда} \quad K_T = 2,24$$

Для известняка Ак-Татырского месторождения (для 9 условий опытов - всего 45 опытов: 1;2;3;4;5;6;7;8;9 минут СВЧ облучения)

$$\sum_i^N [Y_i - a(1 + b - cX_i K_T)] = 0, \quad \text{или}$$

$$810,8 - 9 \cdot 118 - 9 \cdot 0,0515 \cdot 118 + 0,00107 \cdot K_T \cdot 118 \cdot 931,3 = 0$$

$$810,8 - 1062 - 54,7 + 117,58 K_T = 0 \quad \text{отсюда} \quad K_T = 2,6$$

Для диорита Токтозанского месторождения (для 10 условий опытов - всего 50 опытов: 1;2;3;4;5;6;7;8;9;10 минут СВЧ облучения)

$$\sum_i^N [Y_i - a(1 + b - cX_i K_T)] = 0, \quad \text{или}$$

$$556 - 10 \cdot 88 - 10 \cdot 0,0669 \cdot 88 + 0,000869 \cdot K_T \cdot 88 \cdot 1858 = 0$$

$$556 - 880 - 58,9 + 142 K_T = 0 \quad \text{отсюда} \quad K_T = 2,7$$

В итоге, принимаем среднее значение генеральной совокупности для руд, горных пород и минералов  $K_T = \frac{2,82 + 2,24 + 2,6 + 2,7}{4} = 2,6$ , (Значение  $K_T$  по данным способа о среднем 2,6 из 300 опытов). Подставляя значение  $K_T$  в уравнение (5.3.6), получим

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) \quad (5.3.9)$$

По формуле (5.3.9) можно аналитически определить удельную энергоёмкость измельчения руд, горных пород и минералов. Известно, что при неравномерном температурном воздействии изменяется структурное состояние,

в том числе остаточные (структурные) напряжения горных пород и минералов [15].

Остаточные напряжения в зависимости от их знака, то есть направленности: растягивающие (знак +), сжимающие (знак -) влияют на прочность по-разному - в первом случае как разупрочняющий, во втором случае как упрочняющий фактор. Например, для режущих металлических инструментов с целью их упрочнения, формируют вблизи поверхности сжимающие остаточные напряжения путем термической закалки этих инструментов. Уровень температуры и режим температурного влияния на остаточные напряжения в горных породах изучено не достаточно. Естественно, что при достижении температуры разложения (деструкции) остаточные напряжения разгружаются. Экспериментальные результаты показали, что после нагревания и в последующем медленном охлаждении (режим отжига) остаточные напряжения всех видов разгружаются. При невысоких температурах - в диапазоне 100-400<sup>0</sup>С и в последующем быстром охлаждении (в воздухе), преимущественно формируются растягивающие остаточные напряжения, тогда как при более высоких температурах и быстром охлаждении – сжимающие. При определенной температуре нагрева возможны преобразования растягивающих остаточных напряжений в сжимающие и наоборот.

Для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при тепловом воздействии СВЧ волн, с последующим охлаждением в воздухе, получена (совместно с Тажибаевым К.Т.) следующая зависимость:

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_p} \pm \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \quad (5.3.10)$$

где  $\sigma_0$  - среднее остаточное напряжение в объеме горной породы;

$T_m$  –температура, при которой минимальна удельная энергоемкость измельчения горной породы, то есть температура перехода знака остаточных

напряжений, растягивающие напряжения, переходят в сжимающие;  $T_2$  – температура для соответствующей продолжительности воздействия СВЧ волн (t);  $T_p$  – температура разложения (деструкции) основного минерала или горной породы;  $\sigma_p$  – прочность горной породы при одноосном растяжении.

В формуле (5.3.10) знак плюс (+) соответствует  $T_m \geq T_2$ , при этом формируются преимущественно растягивающие остаточные напряжения, знак минус (-) когда  $T_m < T_2$ , при этом формируются преимущественно сжимающие остаточные напряжения.

По формуле (5.3.9.) определяется удельная энергоёмкость измельчения темносерого филлита месторождения Кумтор, продолжительность воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Вначале по формуле (5.3.10) определяется остаточное напряжение для температуры, соответствующей 1-й минуте СВЧ облучения. Температура разложения основного породообразующего минерала кальцита  $T_p = 900^0$  С (см. табл. 5.3.2), прочность при одноосном растяжении филлита  $\sigma_p = 5,6$  МПа (см. табл. 5.3.1). Подставляя в формулу экспериментально установленное минимальное значение удельной энергоёмкости измельчения филлита, соответствующую 3-минутам СВЧ воздействия, температуру  $T_m = 356^0$  С, и температуру при продолжительности СВЧ облучения равной 1- минуте  $T_2 = 31^0$  С (рис. 5.3.3), получаем:

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m \pm T_2}{T_p} \right) \cdot \sigma_p = \left( \frac{356}{900} + \frac{31}{356} \right) 5,6 \cdot 2 = (0,396 + 0,0871) \cdot 112 = 5,4 \text{ МПа},$$

С учетом найденного значения остаточного напряжения определяем удельную энергоёмкость измельчения темносерого филлита месторождения Кумтор, продолжительность воздействия СВЧ волна равной 1-ой минуте.

Для данного филлита удельная энергоёмкость измельчения исходного (начального) состояния  $E_{VO} = 97$  Дж / см<sup>3</sup>, прочность при одноосном сжатии  $\sigma_{сж} = 111,2$  МПа; растяжении  $\sigma_p = 5,6$  МПа (табл. 5.3.2), для 1-ой минуты  $\sigma_0 = 5,4$  МПа, тогда



$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{5,6}{111,2} - \frac{2,6 \cdot |5,4|}{111,2} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,1262) \quad 97 - 7,39 = 89,6 \text{ МДж} / \text{м}^3.$$

При продолжительности времени воздействия СВЧ волн 2 минуты

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_p} \pm \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \quad \left( \frac{356}{900} + \frac{222}{356} \right) 56 \cdot 2 \quad (0,396 + 0,6236) \cdot 112 \quad 114,2 \text{ кГс} / \text{см}^2$$

$$= 11,4 \text{ МПа};$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) \quad 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |114,2|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,267) \quad 97 - 21 = 76 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для времени воздействия СВЧ волн 3 минуты

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_p} \pm \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \quad \left( \frac{356}{900} + \frac{356}{356} \right) 56 \cdot 2 \quad (0,3956 + 1) \cdot 112 = 156 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |156|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,365) \quad 97 - 30,5 = 66,5 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 4 минуты

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_p} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \quad \left( \frac{356}{900} - \frac{440}{356} \right) 56 \cdot 2 \quad (0,3956 - 1,2359) \cdot 112 =$$

$$= -94 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |94|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,2198) \quad 97 - 16,5 = 80,5 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для времени воздействия СВЧ волн- 5 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{356}{900} - \frac{533}{356} \right) 56 \cdot 2 \cdot (0,3956 - 1,4972) \cdot 112 =$$

$$= -123 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |123|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,2876) \quad 97 - 23 = 74 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Время воздействия СВЧ волн - 6 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{356}{900} - \frac{595}{356} \right) 56 \cdot 2 \cdot (0,3956 - 1,67) \cdot 112 =$$

$$= -143 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |143|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,3344) \quad 97 - 27,6 = 69,4 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн - 7 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{356}{900} - \frac{649}{356} \right) 56 \cdot 2 \cdot (0,3956 - 1,82) \cdot 112 =$$

$$= -159,5 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |159,5|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,3729) \quad 97 - 31 = 66 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн - 8 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{356}{900} - \frac{670}{356} \right) 56 \cdot 2 \cdot (0,3956 - 1,88) \cdot 112 =$$

$$= -166,5 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 97 + 97 \left( \frac{56}{1112} - \frac{2,6 \cdot |166,5|}{1112} \right) = 97 + 97(0,05 - 0,3892) = 97 - 33 = 65 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

На рисунке 5.3.1. представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения филлита Кумторского месторождения. Сравнения результатов показывает хорошую сходимость и согласованность экспериментальных и аналитических данных.

По формуле (5.3.9) определяем удельную энергоёмкость измельчения диорита Токтозан для продолжительности воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Для этого по формуле (5.3.10) определяется остаточное напряжение для температуры, соответствующей 1-й минуте СВЧ облучения. Температура разложения основного породообразующего минерала кварца  $T_p = 1470^0 \text{ C}$  (табл. 5.3.2), прочность при одноосном растяжении диорита  $\sigma_p = 77 \text{ кГс/см}^2$  (табл. 5.3.1.).



Рис. 5.3.1 - Графики экспериментального -1 и аналитического -2 определения удельной энергоемкости измельчения филлита Кумторского месторождения.

Таблица 5.3.1. - Механические характеристики горных пород

Название и место отбора горной породы, минерала	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Прочность при одноосном растяжении $\sigma_p$ , МПа
Известняк, Ак-Татыр	2,7; 2,72; 2,68; 2,72; 2,71	896; 1041; 966; 820	45;53;52;48,2; 40,9;
Среднее значение	2,71	931	48
Гранодиорит, Токтозан	2,68; 2,69; 2,69; 2,73; 2,71; 2,68	1145; 1177; 1145; 1138	70; 81;77;70;91; 76;70;80
Среднее значение	2,7	1151	77
Филлит темносерый, Кумтор	2,97; 3,13; 2,99; 2,91; 3,0	961;1255; 1045; 1185	48; 63; 52; 60
Среднее значение	3,0	1112	56
Кварц, Восточный-Коунрад	2,62; 2,65; 2,68; 2,65; 2,64	1824; 1765; 1674; 1740; 1745	54; 59; 61;56; 63; 66; 62
Среднее значение	2,65	1750	60

Таблица 5.3.2 - Температуры фазового перехода некоторых минералов [2].

Название минерала	Температура плавления	Температура
-------------------	-----------------------	-------------

	(фазового перехода) $T_{пл}, ^\circ C$	разложения $T_p, ^\circ C$
Галит (NaCl)	800	
Кварц (SiO <sub>2</sub> )	1600 -1670	1470
Гематит (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1400-1560	1360
Кальцит (CaCO <sub>3</sub> )	1750	900

Экспериментально установлено, что при продолжительности СВЧ облучения 3 минуты удельная энергоёмкость измельчения диорита Токтозан имеет минимальное значение и при этом согласно расчетам  $T_m = 566^\circ C$ , а при продолжительности СВЧ облучения 1 минута -  $T_2 = 128^\circ C$  (рис. 5.2), следовательно по формуле (5.310)

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{566}{1470} + \frac{128}{566} \right) 77 \cdot 2 \cdot (0,385 + 0,226) \cdot 154 =$$

$$= 94 \text{ кГс} / \text{см}^2,$$

С учетом найденного значения остаточного напряжения по формуле (5.3.9) определяем удельную энергоёмкость измельчения диорита месторождения Токтозан при продолжительности воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Для данного диорита удельная энергоёмкость измельчения исходного (начального) состояния  $E_{v0} = 88 \text{ Дж} / \text{см}^3$ , прочность при одноосном сжатии  $\sigma_{сж} = 1151 \text{ кГс} / \text{см}^2$  (табл. 5.3.2), тогда для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 1 минута

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |94|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,2423) = 88 - 14 = 74 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

При времени воздействия СВЧ волн -2 минуты

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{566}{1470} + \frac{383}{566} \right) 77 \cdot 2 \cdot (0,385 + 0,6767) \cdot 154 =$$

$$= 164 \text{кГс} / \text{см}^2,$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |164|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,3704) \quad 88 - 29,4 = 58 \text{Дж} / \text{см}^3.$$

Время воздействия СВЧ волн - 3 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{566}{1470} + \frac{566}{566} \right) 77 \cdot 2 \cdot (0,385 + 1) \cdot 154 =$$

$$= 213 \text{кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |213|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,4811) \quad 88 - 46 = 542 \text{Дж} / \text{см}^3.$$

При времени воздействия СВЧ волн - 4 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{566}{1470} + \frac{700}{566} \right) 77 \cdot 2 \cdot (0,385 + 1,24) \cdot 154 =$$

$$= 250 \text{кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |250|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,565) \quad 88 - 44 = 44 \text{Дж} / \text{см}^3.$$

Продолжительность времени воздействия СВЧ волн 5 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \cdot \left( \frac{566}{1470} - \frac{813}{566} \right) 77 \cdot 2 \cdot (0,385 - 1,436) \cdot 154 =$$

$$= -162 \text{кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |162|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,3659) = 88 - 27 = 61 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

При времени воздействия СВЧ волн - 6 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot \sigma_p = \left( \frac{566}{1470} - \frac{900}{566} \right) 77 \cdot 2 = (0,385 - 1,59) \cdot 154 =$$

$$= -185,6 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |185,6|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,419) = 88 - 31 = 57 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Время воздействия СВЧ волн - 7 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot \sigma_p = \left( \frac{566}{1470} - \frac{967}{566} \right) 77 \cdot 2 = (0,385 - 1,7085) \cdot 154 =$$

$$= -204 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 88 + 88 \left( \frac{77}{1151} - \frac{2,6 \cdot |204|}{1151} \right) =$$

$$88 + 88(0,0669 - 0,4604) = 88 - 34 = 54 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

На рис. 5.3.2 представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения диорита Токтозанского месторождения. Сравнение результатов показывает хорошую согласованность экспериментальных и аналитических данных.

Далее, по формуле (5.3.9) определяем удельную энергоёмкость измельчения известняка Ак-Татыр, при продолжительности воздействия СВЧ волнами равным 1-ой минуте. Для этого вначале по формуле (5.3.10) определяем остаточное напряжение для температуры, соответствующей 1-й минуте СВЧ облучения. Температура разложения основного

породообразующего минерала кальцита  $T_p = 900^0 \text{ C}$  (табл. 5.3.2), прочность при одноосном растяжении известняка Ак-Татыр  $\sigma_p = 48 \text{ кГс/см}^2$  (табл. 5.3.1).



Рис. 5.3.2. Графики экспериментального -1 и аналитического -2 определения удельной энергоемкости измельчения диорита Токтозанского месторождения.

Экспериментально установлено, что при продолжительности СВЧ облучения 3 минуты удельная энергоемкость измельчения известняка Ак-Татыр имеет минимальное значение и при этом согласно расчетам  $T_m = 455^0 \text{ C}$ , а при продолжительности СВЧ облучения 1 минута -  $T_2 = 78^0 \text{ C}$  (рис. 5.2.5), следовательно по формуле (5.3.10)

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left( \frac{455}{900} + \frac{78}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 + 0,1714) \cdot 96 = 65 \text{ кГс / см}^2.$$

С учетом найденного значения остаточного напряжения по формуле (5.3.9.) определяется удельная энергоемкость измельчения известняка месторождения Ак-Татыр, продолжительность воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Для данного известняка удельная энергоемкость измельчения исходного (начального) состояния  $E_{v0} = 118,4 \text{ Дж / см}^3$ , прочность при



одноосном сжатии  $\sigma_{сж} = 931 \text{ кгс / см}^2$  (табл. 5.3.1), тогда для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 1 минута

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |65|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,1815) = 118,4 - 15,4 = 103 \text{ Джоуль / см}^3.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн- 2 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left( \frac{455}{900} + \frac{307}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 + 0,6747) \cdot 96$$

$$= 113 \text{ кгс / см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |113|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,3156) = 118,4 - 31,2 = 87,2 \text{ Дж / см}^3.$$

При времени воздействия СВЧ волн -3 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left( \frac{455}{900} + \frac{455}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 + 1) \cdot 96 =$$

$$= 145 \text{ кгс / см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |145|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,4049) = 118,4 - 42 = 76,6 \text{ Дж / см}^3.$$

Время воздействия СВЧ волн- 5 минут

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left( \frac{455}{900} - \frac{668}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 - 1,468) \cdot 96 =$$

$$= -92 \text{ кгс / см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |92|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,2569) = 118,4 - 24 = 94 \text{ Дж / см}^3.$$

При продолжительности времени воздействия СВЧ волн -7 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \left( \frac{455}{900} - \frac{799}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 - 1,756) \cdot 96 =$$

$$= -120 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |120|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,3354) = 118,4 - 21,4 = 97 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для времени воздействия СВЧ волн- 9 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \left( \frac{455}{900} - \frac{933}{455} \right) 48 \cdot 2 = (0,506 - 2,05) \cdot 96 =$$

$$= -148 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 118,4 + 118,4 \left( \frac{48}{931} - \frac{2,6 \cdot |148|}{931} \right) =$$

$$118,4 + 118,4(0,0516 - 0,4133) = 118,4 - 42,8 = 75,6 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

На рисунке 5.3.3. представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения известняка Ак-Татырского месторождения. Сравнение результатов показывает согласованность экспериментальных и аналитических данных.

Далее, определяется удельная энергоёмкость измельчения кварца Восточно-Коунрадского месторождения для продолжительности воздействия СВЧ волн равной 1-ой минуте. Также повторяются действия определения остаточного напряжения для температуры, соответствующей 1-й минуте СВЧ облучения. Температура разложения минерала кварца  $T_p = 1470^{\circ} \text{C}$  (табл. 5.3.2), прочность при одноосном растяжении кварца Восточно-Коунрадского месторождения  $\sigma_p = 60 \text{ кГс} / \text{см}^2$  (табл. 5.3.1).

Экспериментально было установлено, что при продолжительности СВЧ облучения 5 минут, удельная энергоёмкость измельчения кварца Восточно-Коунрадского месторождения, имеет минимальное значение. При этом

согласно расчетам  $T_m = 702^0 \text{ C}$ , а при продолжительности СВЧ облучения 1 минута -  $T_2 = 91^0 \text{ C}$ , следовательно по формуле ( 5.3.10)

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \left( \frac{702}{1470} + \frac{91}{702} \right) 60 \cdot 2 \quad (0,4776 + 0,1296) \cdot 120 =$$

$$= 73 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$



Рисунок 5.3.3 - Графики экспериментального -1 и аналитического -2 определения удельной энергоёмкости измельчения известняка Ак-Татырского месторождения.

С учетом найденного значения остаточного напряжения, по известной формуле, определяем удельную энергоёмкость измельчения кварца (месторождение Восточный – Коунрад) при продолжительности воздействия СВЧ волн, равной 1-ой минуте. Для данного кварца удельная энергоёмкость измельчения исходного (начального) состояния  $E_{V0} = 69 \text{ Дж} / \text{см}^3$ , прочность

при одноосном сжатии  $\sigma_{сж} = 1750 \text{ кГс} / \text{см}^2$  (табл. 5.3.1), тогда, для продолжительности времени воздействия СВЧ волн- 1 минута, получаем

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |73|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,1084) \quad 69 - 5 = 64 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн - 2 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \quad \left( \frac{702}{1470} + \frac{320}{702} \right) 60 \cdot 2 \quad (0,4776 + 0,4558) \cdot 120 =$$

$$= 112 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |112|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,1664) \quad 69 - 9 = 60 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

При продолжительности времени воздействия СВЧ волн- 3 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \quad \left( \frac{702}{1470} + \frac{484}{702} \right) 60 \cdot 2 \quad (0,4776 + 0,6894) \cdot 120 =$$

$$= 140 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |140|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,208) \quad 69 - 12 = 57 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Когда продолжительность времени - 4 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \cdot 2\sigma_p \quad \left( \frac{702}{1470} + \frac{607}{702} \right) 60 \cdot 2 \quad (0,4776 + 0,8647) \cdot 120 =$$

$$= 161 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |161|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,2392) = 69 - 14 = 55 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

При продолжительности времени -5 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \approx \sigma_p \left( \frac{702}{1470} + \frac{702}{702} \right) 60 \cdot 2 = (0,4776 + 1) \cdot 120 =$$

$$= 177 \text{ кГц} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |177|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,2629) = 69 - 16 = 53 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для времени воздействия СВЧ волн -6 минута,

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \approx \sigma_p \left( \frac{702}{1470} - \frac{702}{702} \right) 60 \cdot 2 = (0,4776 - 1,11) \cdot 120 =$$

$$= -76 \text{ кГц} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |76|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,1129) = 69 - 5,4 = 63,6 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

При времени воздействия СВЧ волн -7 минута

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) \approx \sigma_p \left( \frac{702}{1470} - \frac{702}{702} \right) 60 \cdot 2 = (0,4776 - 1,11) \cdot 120 =$$

$$= -76 \text{ кГц} / \text{см}^2;$$

$$\sigma_0 = \left( \frac{T_m}{T_n} - \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left( \frac{702}{1470} - \frac{841}{702} \right) 60 \cdot 2 = (-0,4776 - 1,198) \cdot 120 =$$

$$= -86 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_V = E_{VO} + E_{VO} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{2,6 \cdot |\sigma_0|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left( \frac{60}{1750} - \frac{2,6 \cdot |86|}{1750} \right) =$$

$$69 + 69(0,034 - 0,1278) = 69 - 6,5 = 62,5 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

На рис. 5.3.4 представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения кварца Восточно- Коунрадского месторождения. Сравнение результатов показывает согласованность экспериментальных и аналитических данных.



Рис. 5.3.4 - Графики экспериментального -1 и аналитического -2 определения удельной энергоёмкости измельчения кварца Восточно-Коунрадского месторождения.

Ниже, в таблице 5.3.3, в качестве примера приведены результаты аналитического и экспериментального определения величин удельной энергоёмкости измельчения для разных продолжительностей времени

воздействия СВЧ волн руды и минерала. Как видно из таблицы, отклонение расчетных данных удельной энергоемкости измельчения от экспериментальных значений, составляет в среднем 5-10 %.

Таблица 5.3.3 – Экспериментальные и расчетные значения удельной энергоемкости измельчения для разных продолжительностей времени воздействия СВЧ волн

Название и место отбора горной породы, минерала	Продолжительность возд. СВЧ волн, мин.	Удельная энергоемкость измельчения, Джоуль / см <sup>3</sup>		Отклонение расчетных значений от экспериментальных, %
		Эксперимент. значения	Расчетные значения	
Филлит темносерый, 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	60	6,4
	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	103	22,6
	2	76	87,2	14,7
	3	74,6	76,6	2,6
	5	104,5	94	10
	7	93,8	97	3,4
	9	96,9	76	21,6
Диорит, Токтозан	0	88	88	0
	1	72	74	2,8
	2	45	58	28,9
	3	32	42	31
	4	43	44	2,3
	5	57	61	7
	6	62	57	8
	7	64	54	15,6

Из результатов экспериментальных и аналитических исследований видно, что при оптимальном времени воздействия СВЧ волн (3 -5) минут происходит значительное уменьшение энергоемкости измельчения руд. Это обеспечивает существенную экономию энергозатрат. Однако, возникает закономерный вопрос о том, что, сколько дополнительной энергии расходуется при СВЧ облучении, и не превысит ли суммарная энергоемкость величину энергоемкости исходного, то есть необлученного состояния? Для определения суммарной энергоемкости измельчения руд необходимо знать удельную тепловую энергию 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  
 $E_T = N \cdot t = 700 \text{ Дж/с} \cdot 60 \text{ с} = 42000 \text{ Дж}$ .

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  
 ( $30000 \text{ см}^3$ );  $K_3$  -коэффициент заполнения объема ( $K_3 = 0,7$ ).

В нашем случае при продолжительности работы печи равной 1-й минуте  
 $E_{TV} = E_T / V_{\text{п}} = 42000 \text{ Дж} / 30000 \cdot 0,7 \text{ см}^3 = 2 \text{ Дж} / \text{см}^3$ ;  
 При : 2 минуты-  $4 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 3 минуты -  $6 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 4 минуты -  $8 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 5  
 минут -  $10 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 6 минут -  $12 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 7 минут -  $14 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 8 минут -  $16$   
 $\text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 9 минут -  $18 \text{ Дж} / \text{см}^3$  ; 10 минут -  $20 \text{ Дж} / \text{см}^3$  .

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 рисунках 5. 3.6. и 5.3.7  
 представлены графики экспериментальной и суммарной энергоемкости  
 измельчения известняка месторождения Ак-Татыр и филлита месторождения  
 Кумтор.

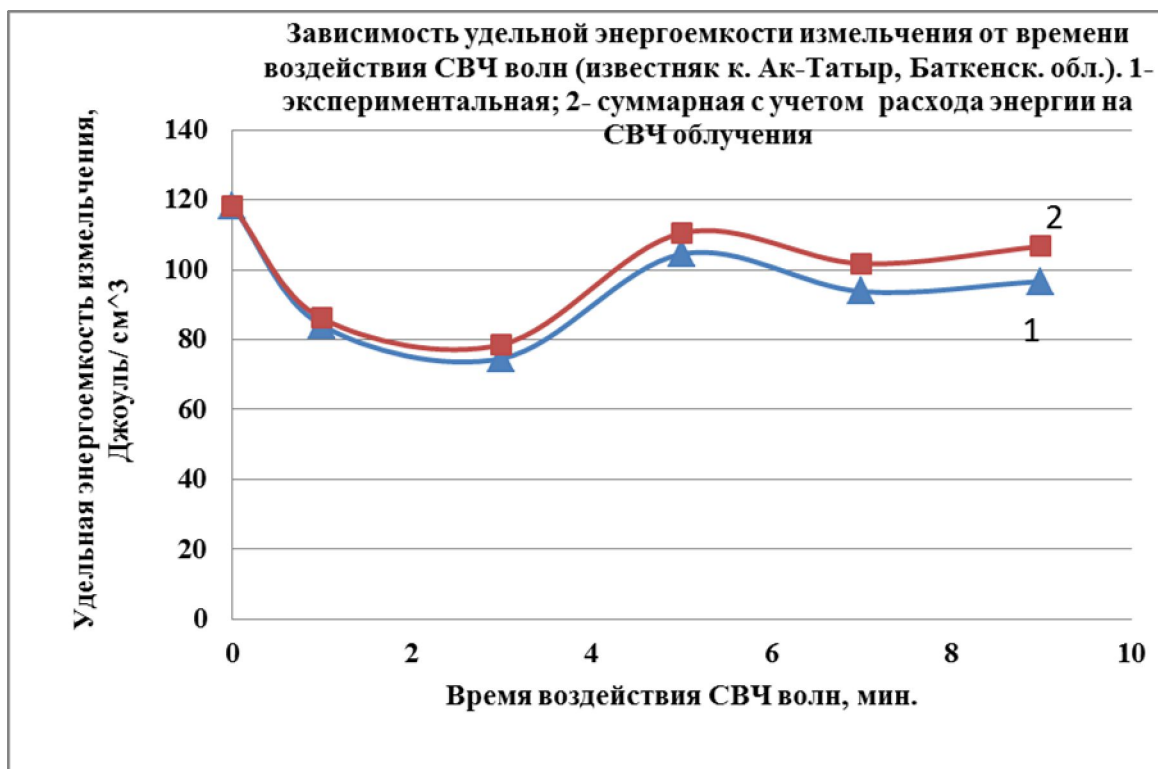


Рис. 5.3.6 – Графики удельной энергоемкости измельчения (известняк, Ак-Татыр, 1- экспериментальный, 2-суммарный).

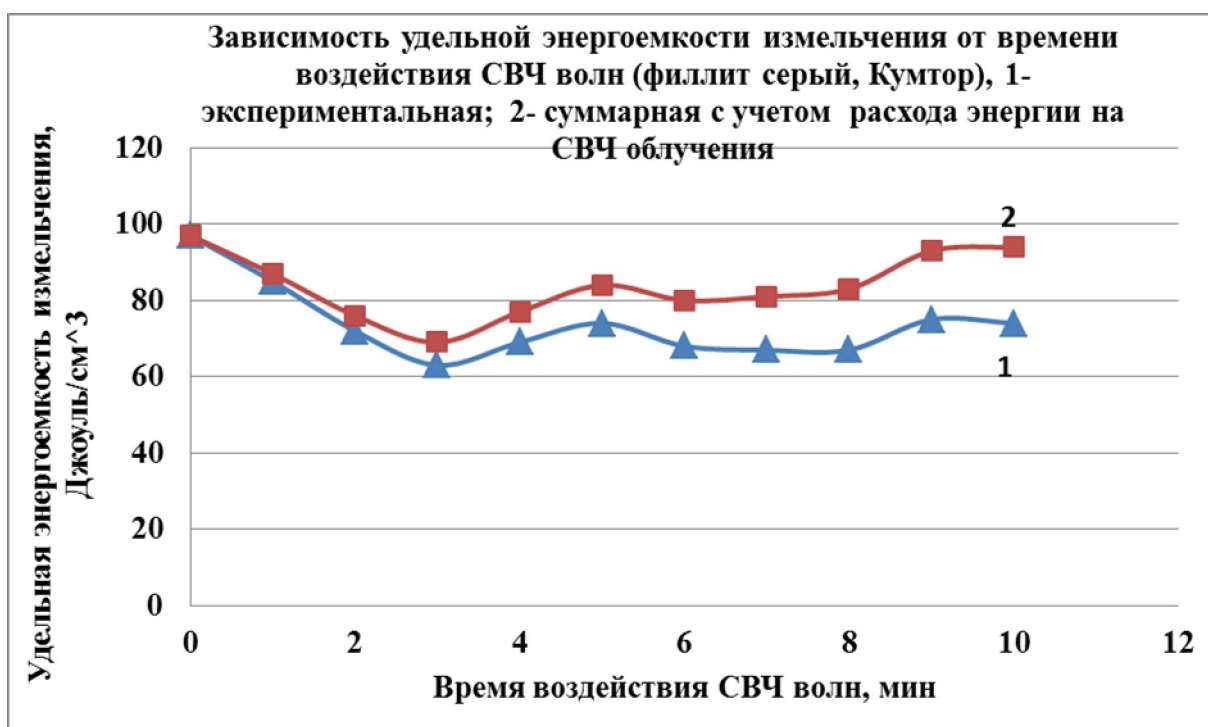


Рис. 5.3.7 – Графики удельной энергоемкости измельчения (филлит серый, Кумтор, 1- экспериментальный, 2-суммарный).

Как видно из рисунков, суммарная удельная энергоемкость измельчения руд не превышает величину удельной энергоемкости измельчения исходного, не облученного СВЧ волнами состояния. Таким образом, можно отметить, если перед измельчением крепких руд и минералов воздействовать на них оптимальным временем СВЧ облучения, то обеспечивается значительная экономия энергоресурсов.

#### **5.4. Результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ волн на энергоемкость измельчения горных пород.**

Как указано выше, вследствие кратковременности воздействия достаточно мощных импульсов, одним из эффективных способов разупрочнения крепких горных пород являются воздействия мощных электромагнитных излучений с высокими частотами (СВЧ) облучения.

В связи эффективным разупрочнением крепких горных пород были проведены экспериментальные исследования влияния остаточных напряжений на энергоемкость измельчения руд с целью управления их прочностными свойствами, используя СВЧ - облучения.

Ниже, приводятся, результаты исследования изменения удельной энергоемкости измельчения горных пород после воздействия на них мощных полей сверхвысоких частот (СВЧ). В качестве объектов изучения, как указано выше, были взяты крепкие руды с разными физико-механическими свойствами. Обычно для руд с низкой и средней прочностью производят в зависимости от прочности руды от 3 до 15 ударов. Рекомендуется увеличивать для каждой крепкой руды число ударов разрушения навески, соответствующее определенной работе  $A$ , чтобы выход пыли  $\ell$  был примерно в пределах от 20 до 70мм.

По предлагаемому нами способу определяется величина удельной энергоемкости измельчения руды -  $K$  при разных величинах длительности СВЧ воздействия экспериментально и по формуле ( 5.1.3., 5.1.4.см. раздел 5.1.)

По полученным экспериментально пяти значениям удельной энергоемкости измельчения руды определяется среднеарифметическое значение.

Исследованиями установлено, что вновь образованная при дроблении хрупкого материала поверхность складывается в основном (примерно на 90%) из поверхности мельчайших кусочков величиной менее 0,5 мм. Поэтому для значительного упрощения метода после дробления определяется поверхность только мелких фракций - менее 0,5 мм, и по данной фракции определяется величина высоты столбика пыли в объемомере, которая пропорциональна вновь образованной поверхности, полученных при измельчении.

В соответствии с предлагаемым способом, по экспериментальным данным определения удельной энергоемкости измельчения навесок руд, для разных величин длительности СВЧ воздействия и исходного состояния, строятся графики. По данным графика зависимости «удельная энергоемкость

измельчения – продолжительность времени воздействия СВЧ волн» (рисунки 5.4.1; 5.4.2; 5.4.3; 5.4.4) устанавливают оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды. В дальнейшем, установленное оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ волн принимают для обработки всей руды данного типа и размера кусков, подлежащих измельчению.

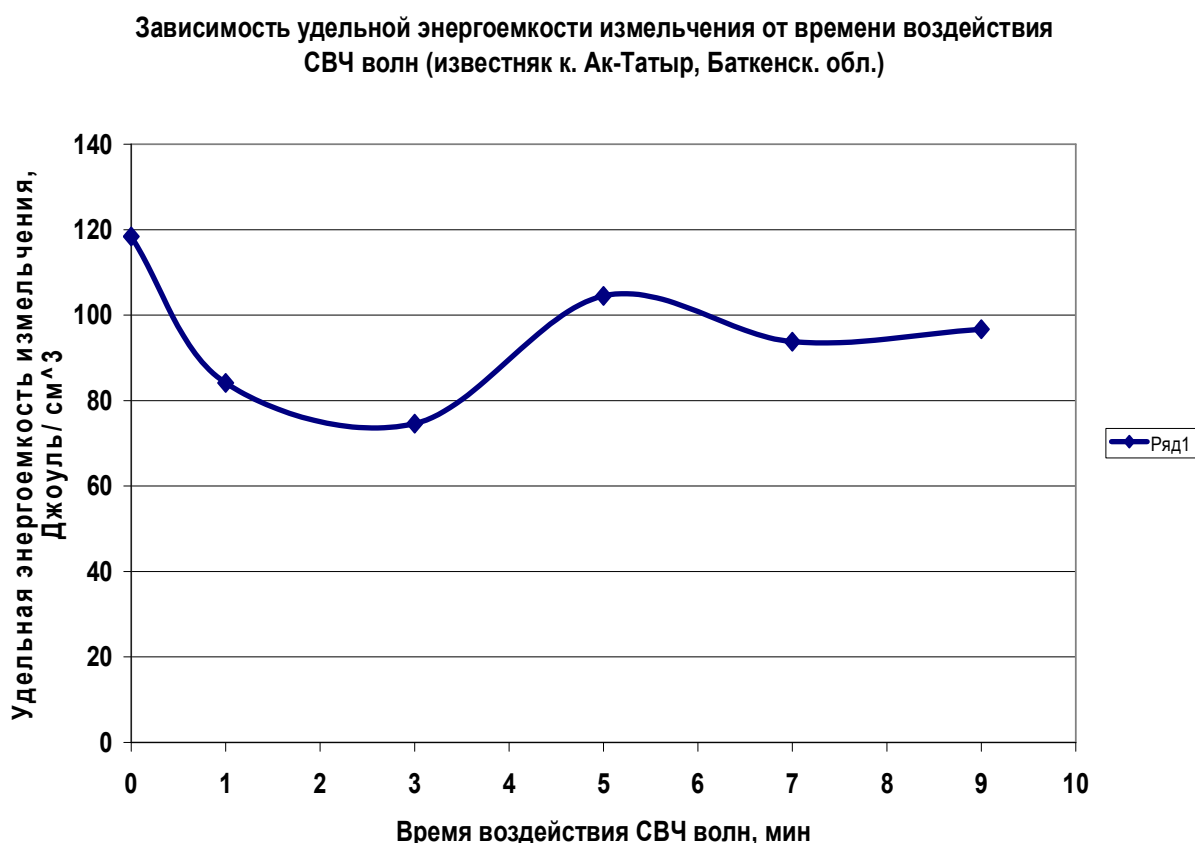


Рис. 5.4.1. График зависимости удельной энергоемкости измельчения известняка от времени воздействия СВЧ волн.

Как видно, из рисунков 5.4.1 - 5.4.4, оптимальное значение времени воздействия СВЧ волн известняка (Ак-Татыр) и диорита (Токтозан), филлита (Кумтор) составляет 3 минуты, а для диорита (Жети-Огуз) - 5 минут.

Для облучения горных пород и руд использовалась, как указано выше, СВЧ - печь (микроволновая печь), средняя мощность которой составляла 1,5 кВт. Пробы исходных и облученных руд измельчались на приборе ПОК по единой методике [20]. Готовый продукт представлял собой материал

крупностью класса 0,5мм. После процесса измельчения проводился ситовый анализ. Сравнения характеристик измельчения этих проб с необлученной пробой показало, что после СВЧ - облучения показатели измельчаемости (коэффициент крепости, энергоёмкость) пород изменяется значительно.



Рис. 5.4.2. График зависимости удельной энергоёмкости измельчения диорита от времени воздействия СВЧ волн.

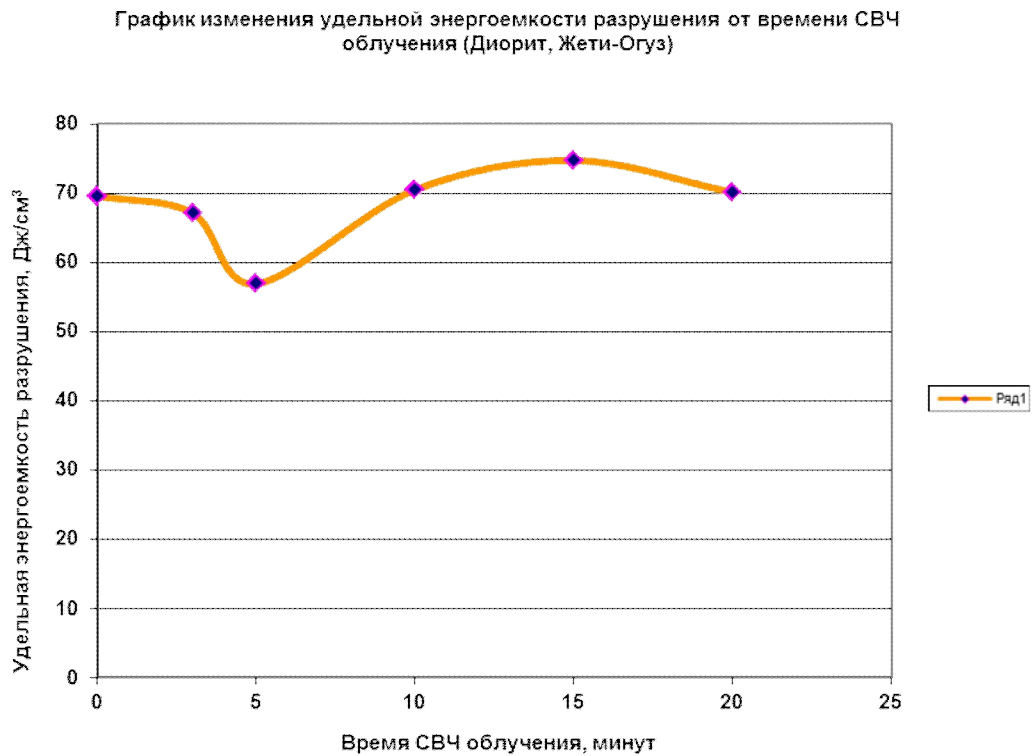


Рис.5.4.3. График зависимости удельной энергоёмкости измельчения диорита от времени воздействия СВЧ волн.

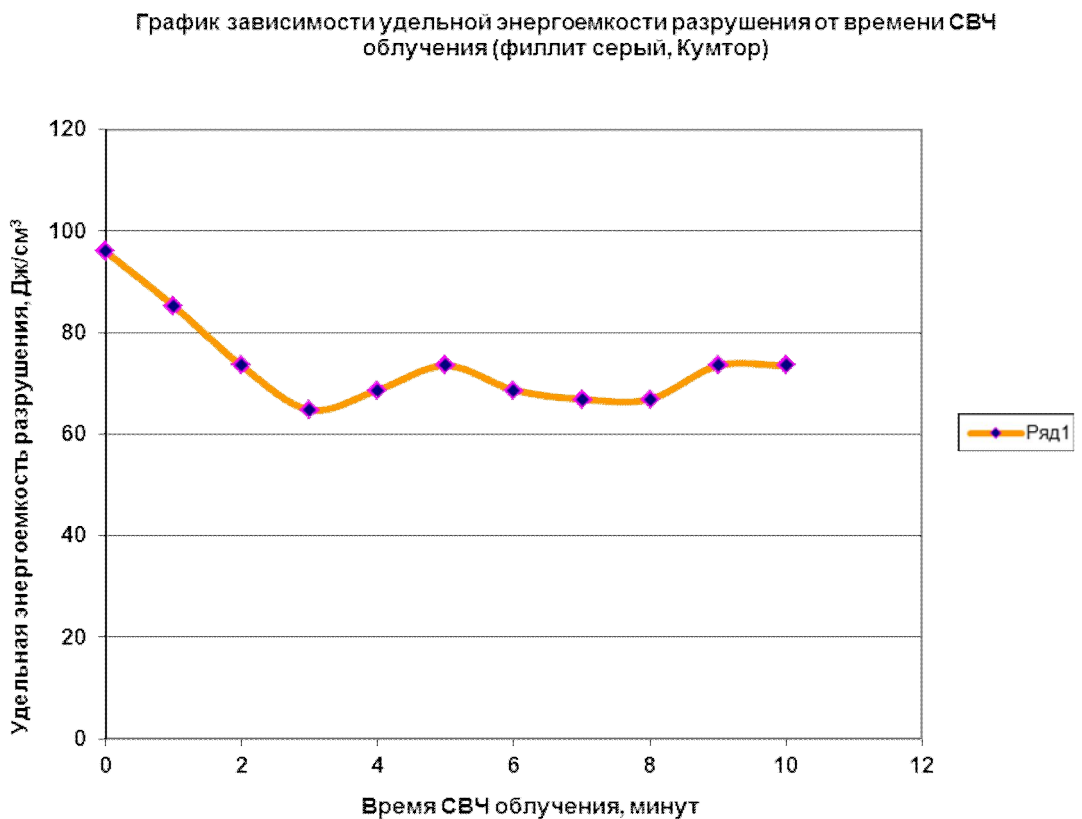


Рис.5.4.4. График зависимости удельной энергоёмкости измельчения филлита от времени воздействия СВЧ волн.

Первоначально были определены исходные данные, т.е. коэффициент крепости по толчению и удельно-объемная энергоемкость измельчения исходного состояния горных пород. Затем такие же куски из этой породы поместили в микроволновую печь. Продолжительность выдержки в печи составляла от одного до девяти минут. Результаты исследований влияния продолжительности СВЧ облучения на удельную энергоемкость измельчения горных породы руд приведены так же в таблицах 5.4.1 – 5.4.2.

Таблица 5.4.1- Показатели коэффициента крепости и удельно-объемной энергоемкости измельчения диорита при разных значениях времени воздействия СВЧ волн

Название и место отбора горной породы	$l$ (мм) высота фракции	К Кэфф. крепости по толчению	V (см <sup>3</sup> ) Объем фракции (размер 0,5 мм)	E · n Энергия разру- шения (Джоуль)	E <sub>y</sub> Удельно- объемная энергоемкость измельчения, Дж/см <sup>3</sup>
Диорит (Жети-Огуз) исходный	6	50	2,49	220,7	88,63
	20	30	8,3	441,45	53,2
	18	34,4	7,47	456,16	61,1
	20	35	8,3	515,02	62,05
	15	46,6	6,22	515,02	82,8
Среднее значение		39,2			69,56
ср.кв.откл.		7,7			13,66
коэфф.вар,%		19			19

То же время выдержки 3 мин.	17	41,2	7,05	515,02	73,05
	20	35	8,3	515,02	62,05
	17	41,2	7,05	515,2	73,05
	19	36,8	7,88	515,02	65,36
	20	35	8,3	515,02	62,05
Среднее значение		37,8			67,11
ср.кв.откл.		2,82			4,99
коэфф.вар.		7			7
время выдержки 5 мин.	23,2	29,5	9,75	515,02	52,82
	22	32,8	9,13	515,02	56,43
	23	34,8	9,54	588,6	61,69
	22	31,8	9,13	515,02	56,41
Среднее значение		31,97			56,88
ср.кв.откл.		1,68			2,82
коэфф.вар.		4			4
время выдержки 10 мин.	20	35	8,3	515,02	62,05
	15	46,6	6,22	515,02	82,8
	19	36,8	7,88	515,02	65,36
	17	41,2	7,05	515,02	73,05
	18	38,9	7,47	515,02	68,94
Среднее значение		39,7			70,44
ср.кв.откл.		4,02			7,18
коэфф.вар.		10			10
время выдержки	15	46,6	6,22	515,02	82,8
	14	50	5,81	515,02	88,64



15 мин.	19	36,8	7,88	515,02	65,36
	20	35	8,3	515,02	62,05
Среднее значение		42,1			74,71
ср.кв.откл.		5,67			10,07
коэфф.вар.		13			13
время выдержки 20 мин.	18	38,9	7,47	515,02	68,94
	16	43,7	6,64	515,02	77,56
	20	35	8,3	515,02	62,05
	17	41,2	7,05	515,02	73,05
	18	38,9	7,47	515,02	68,94
Ср.значение		39,5			70,11
ср.кв.откл.		2,88			5,13
коэфф.вар.		7			7

Таблица 5.4.2-Показатели коэффициента крепости и удельно-объемной энергоемкости измельчения известняка при разных значениях времени СВЧ воздействия

Название и место отбора горной породы	$l$ (мм) Высота измельченной фракции	К Коэф. крепости	V (см <sup>3</sup> ) Объем фракции (размер 0,5 мм)	E · n Энергия разрушения (Джоуль)	E <sub>y</sub> Удельно- объемная энергоемкость измельчения, Дж/см <sup>3</sup>
Известняк (к.Ак- Татыр, Баткенск. обл.) исходный	4,5	66	1,8	211	117,2
	5	60	2	211	105,5
	6	50	2,37	211	89
	5	60	2,1	211	105,5
	3	100	1,2	211	175

Среднее значение		67,2			118,4
ср. кв. откл.		16,2			23,1
коэфф. вар.		24,1			19,5
время выдержки 1 мин.	5	60	2	211	105,5
	6	50	2,37	211	89
	7	42,8	2,8	211	75,35
	7	42,8	2,8	211	75,35
	7	42,8	2,8	211	75,35
Среднее значение		51			84,11
ср. кв. откл.		2,2			12,5
коэфф. вар.		4,3			14,9
время выдержки 3 мин.	7	42,8	2,8	211	75,35
	7	42,8	2,8	211	75,35
	6,5	46,1	2,6	211	81,15
	8	37,5	3,2	211	65,94
	7	42,8	2,8	211	75,95
Среднее значение		42,4			74,62
ср. кв. откл.		1,84			3,32
коэфф. вар.		4,3			4,4
время выдержки 5 мин.	5	60	2	211	105,5
	5	60	2	211	105,5
	6	50	2,37	211	89
	4,5	66	1,8	211	117,2
	5	60	2	211	109,5
Среднее значение		59			104,5

ср. кв. откл.		3,2			5,1
коэфф. вар.		5,4			4,9
время выдержки 7 мин.	7	42,8	2,8	211	75,35
	4,5	66	1,8	211	117,2
	5,5	54,5	2,2	211	95,9
	7	42,8	2,8	211	75,35
	5	60	2	211	105,5
Среднее значение		53			93,8
ср. кв. откл.		9			9,2
коэфф. вар.		16,9			9,8
время выдер.9мин.	6	50	2,37	211	89
	5	60	2	211	105,5
	6	50	2,37	211	89
	5,5	54,5	2,2	211	95,9
	5	60	2	211	105,5
Среднее значение		54,9			96,9
ср. кв. откл.		4			1,87
коэфф. вар.		7,2			1,9

Результаты исследований влияния СВЧ волн на прочность и удельную энергоёмкость измельчения горных пород показали что, для большинства горных пород, когда время облучения составляет 3-5 минут, удельная энергоёмкость измельчения исследуемых пород уменьшаются до минимума (рис. 5.4.1; 5.4.2; 5.4.3; 5.4.4) а дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ волн приводит к упрочнению горной породы. Например, для диорита (Токтозан) коэффициент крепости и удельная энергоёмкость измельчения уменьшаются до минимума при длительности СВЧ облучения 3 минут, а

дальнейшее увеличение времени облучения приводит к упрочнению данной горной породы (рис. 5.4.2)

Эти экспериментальные результаты свидетельствует о том, что для каждой горной породы имеется свое оптимальное время облучения СВЧ-волнами. При оптимальном времени облучения происходит неравномерное поглощение электромагнитной энергии СВЧ излучения, достаточной для максимального разупрочнения горной породы. Для исследованных руд и пород, хотя они, по физико-механическим свойствам значительно отличаются друг от друга, диапазон оптимального времени облучения не велик и составляет 3-5 минут. Для выяснения механизма неоднозначного влияния СВЧ волн на показатели измельчаемости горных пород при разной длительности облучения, как указано выше, были исследованы изменения модуля упругости и акустической жесткости горных пород, от длительности СВЧ облучения.

Было установлено, что характер изменения модуля упругости совпадает с характером изменения показателей измельчения. Указанные экспериментальные результаты свидетельствуют о достоверности полученных данных разными методами с одной стороны, и о наличии оптимального времени облучения для целесообразного глубокого изменения механических свойств и структурного состояния горных пород - с другой. Породы, содержащие металлы, как известно, сильно поглощают СВЧ - поле и являются источниками тепла вызывающие нарушение сплошности горных пород. С увеличением времени воздействия СВЧ излучения градиент температуры по всему объему образца выравнивается и снимается температурное напряжение. Это приводит к восстановлению крепости горных пород. Обоснованный выбор времени температурного режима нагревания с СВЧ излучением приводит к существенному разупрочнению минерала. СВЧ - обработка позволяет повысить степень раскрываемости зерен и тем самым, одновременно уменьшая прочность, увеличивает выход полезного компонента. При СВЧ воздействии, в неоднородных участках горной породы происходит интенсивный нагрев и это приводит к структурным преобразованиям. Эффективность разупрочнения

определяется неоднородностью свойств породы и температурой. Например, при воздействии СВЧ- импульса происходит резкий нагрев и растрескивание пустой породы, в результате чего рудный компонент становится доступным для извлечения.

В целом для рассмотренных горных пород более длительное СВЧ излучение (более 5 минут) приводит к восстановлению и увеличению энергоемкости измельчения породы (рис. 5.4.2; 5.4.3). Это объясняется тем, что исследуемые горные породы по вещественному составу квазиоднородные, в них поглощение энергии СВЧ волн, при длительном излучении, по всему объему образца происходит равномерно, и по всей вероятности при длительном облучении формируются сжимающие остаточные напряжения.

Следует отметить, что экономия энергии на помоле при предварительном воздействии СВЧ волнами, должна не только компенсировать энергозатраты на нагрев при предварительном СВЧ воздействии, но и обеспечить существенную экономию энергии. При этом также обеспечивается уменьшение расхода металла за счет уменьшения износа металлических частей мельниц, обеспечивается увеличение выхода полезного компонента (извлекаемого металла), за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен, так как, при оптимальной продолжительности воздействия на руду СВЧ волнами, происходит существенное разупрочнение руды (прочность и удельная энергоемкость измельчения уменьшается до 2 раза).

Судя по снижению прочности можно отметить, что уменьшение износа, следовательно, расхода металла в мельницах тоже будет значительным. Структурный анализ показывает, что при воздействии СВЧ волн, улучшается раскрываемость зерен извлекаемых металлов и минералов, за счет чего увеличивается выход извлекаемого компонента. Как показывают наши опыты и расчеты, для диорита месторождения Токтозан удельная энергоемкость измельчения в исходном состоянии составляет  $87 \text{ Дж/см}^3$ , а после 3-х минут воздействия СВЧ волн –  $30 \text{ Дж/см}^3$ . Расход энергии при мощности печи  $0,7 \text{ кВт}$  и в течении 3 минуты составляет  $0,7 \cdot 0,05 \text{ ч} = 0,035 \text{ кВт час}$  или  $35 \text{ Вт час} \cdot 3,6 \cdot 10^3$

= 126000 Дж. При полезном объеме печи 30000 см<sup>3</sup> удельный расход энергии на 3-х минутное СВЧ облучение составляет 126000 / 30000 = 4,2 Дж/см<sup>3</sup>. С учетом расхода энергии на СВЧ облучение общая удельная энергоемкость измельчения составляет 30+4,2 = 34,2 Дж/см<sup>3</sup>. Таким образом, экономия энергии при оптимальном СВЧ облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием, составляет 87-34,2 = 52,8 Дж/см<sup>3</sup>, или экономия энергии при измельчении диорита (Токтозан) после СВЧ облучения составляет 60,7%.

Для известняка (карьер Ак-Татыр) удельная энергоемкость измельчения в исходном состоянии составляет 120 Дж/см<sup>3</sup>, а после 3 минуты воздействия СВЧ волн – 73 Дж/см<sup>3</sup>. С учетом расхода энергии на СВЧ облучение, общая удельная энергоемкость измельчения составляет 73+4,2 = 77,2 Дж/см<sup>3</sup>. Экономия энергии при оптимальном СВЧ облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием для известняка, составляет 120-77,2 = 42,8 Дж/см<sup>3</sup>. В процентном выражении экономия энергии при измельчении известняка после СВЧ облучения составляет 35,7 % . Следует отметить, что чем больше неоднородность руды, тем больше получается эффект разупрочнения и экономится энергия при измельчении. После оптимального режима СВЧ облучения, неоднородность вещественного состава и структуры приводит к неоднородному нагреванию и формированию термонапряжений, способствующих росту микротрещин.

Экономический эффект от применения способа достигается за счет уменьшения энергоемкости измельчения руд и минералов – это приводит сокращению расхода металла, за счет уменьшения износа металлических частей мельниц. Увеличивается выход полезного компонента за счет улучшения раскрываемости зерен, так как при оптимальной длительности воздействия на руду СВЧ волнами, как указано выше, происходит существенное разупрочнение руды.

## 5.5. Выводы

1. Установлено, что при увеличении продолжительности действия СВЧ волн более 1 минуты, температура горной породы повышается не строго по линейному закону и поэтому необходимо определить зависимости температуры от продолжительности воздействия СВЧ волн для каждой разновидности руды и минерала.
2. На основе экспериментальных и аналитических исследований получена формула зависимости удельной теплоемкости горных пород от продолжительности воздействия СВЧ волн, которая позволяет определить температуру.
3. Установлено переломное время воздействия СВЧ волн и характерная для данной горной породы температура, при которой реализуется эффективное измельчение руд и минералов, достигается минимум энергоемкости их измельчения.
4. Для определения изменений удельной энергоемкости измельчения (по сравнению с удельной энергоемкости измельчения исходного состояния) от продолжительности воздействия СВЧ волн на горные породы (руды) получена зависимость, которая описывает изменение данного показателя от продолжительности воздействия СВЧ волн, и от температуры.
5. Получена эмпирическая зависимость определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы при тепловом воздействии СВЧ волн, с последующим охлаждением в воздухе.

## **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, а 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Азизбекян Л.А.** Перераспределение остаточных напряжений при помощи ультразвуковой волновой обработки [Текст] /Л.А. Азизбекян. Тр. 5-й научно-техн. конф. физ. мат. знаний. посвящ. 50-летию Куйбышевского политехн ин-та,; май 1980.- Ч.1.-С.151-154.// Рук. деп. ВИНТИ 3 марта.- 1982.- №895-82.
2. **Блинов Л.М.** О возможности комбинированного плазменно-волнового воздействия на горные породы [Текст] /Л.М. Блинов, В.М. Ковальчук // Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 5.- Днепропетровск, 1972.-С. 55-57.
3. **Вернигоров Н.С.** Дефектная структура меди после воздействия мощного импульсного электромагнитного излучения СВЧ диапазона [Текст] / Н.С. Вернигоров, А.Н. Диденко, Ю.П. Шаркеев //Доклады РАН, 1994.
4. **Гетрик В.И.,** Механика композитных материалов [Текст] / В.И. Гетрик, В.Я. Котосонов //Реф.журнал, Деп. ВИНТИ, 1985. №5025-85 деп.
5. **Гончаров С.А.** Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей [Текст] / С.А. Гончаров, П.П. Ананьев, В.Ю. Иванов.- М.:Издат. МГГУ, 2006.
6. **Давиденков Н.Н.** Об измерении остаточных напряжений [Текст] / Н.Н.Давиденков // Заводская лаборатория, №2.-1950.- С.188-192.
7. **Дверес М.Н.** Моделирование остаточных напряжений методом дополняющих деформаций. Методы исследований напряжений в конструкциях

энергетического оборудования [Текст] / М.Н. Дверес, А.В. Фомин.-М.: 1983.- С.24-29.

8. **Диденко А.Н.** СВЧ – энергетика [Текст] / А.Н. Диденко, Б.В. Зверев.- М.: Наука, 2000.

9. **Диденко А.Н.** О возможности использования мощных СВЧ-колебаний для технологических целей [Текст] / А.Н. Диденко // Доклады РАН, 1993, т. 331, № 5.-С. 571-572

10. **Дмитриев А.П.** Физические свойства горных пород при высоких температурах [Текст] / А.П. Дмитриев, Л.С. Кузьяев. - М.: Недра 1969.

11. **Дмитриев А.П.** Термодинамические процессы в горных породах [Текст] / А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров.- М.: Недра, 1990. –С. 360.

12. **Емелин М.А.** и др. Новые методы разрушения горных пород [Текст] / М.А. Емелин.- М.: Наука, 1996.

13. **Заворыкина Т.К.** Разработка метода управления селективным раскрытием минеральных сростков окисленной железной руды высокочастотным электромагнитным воздействием [Текст] / Т.К. Заворыкина // Автореферат дисс. канд. техн. наук. –М.: МГИ, 1909.С. -17.

14. **Зецер Ю.И.** и др. Применение СВЧ-нагрева для рудоподготовки железистых кварцитов Михайловского горно-обогатительного комбината перед их обогащением [Текст] / Ю.И. Зецер // Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Тезисы докл., Саратов, 1991. С.- 98-100.

15. **Зильбершмидт М.Т.** Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии. «Физические процессы в горных породах» [Текст] / М.Т. Зильбершмидт // Материалы всесоюзной конференции. М.: 1984.

16. **Зильбершмидт М.Г., Заворыкина Т.К.** Методы анализа структурного состояния горных пород [Текст] / М.Т. Зильбершмидт, Т.К. Заворыкина. Ч.1- М.: МГИ 1980,-с.88.

17. **Зильбершмидт М.Г.** Рентгеновские методы исследования горных пород [Текст] / М.Г. Зильбершмидт С.В. Ржевская.- М.: 1981.

18. **Зинер К.** Упругость и неупругость металлов. Сб. «Упругость и неупругость металлов» [Текст] / К.Зинер // Перевод с английского. Металлургиздат, 1964.

19. **Зноева В.А.** Вопросы эксплуатации, долговечности и живучести конструкции летательных аппаратов [Текст] / В.А. Зноева.- Киев: 1982. – С. 66-68.

20. **Ильницкая Е.И.** Свойства горных пород и методы их определения [Текст] / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш. -М.: Недра.-1969. С.– 452.

21. **Ильченко В.С.** Собственные СВЧ-диэлектрические потери в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 300-1000 К [Текст] / В.С. Ильченко // Физ. твердого тела, 1989, т. 31, № 7.- С. - 135-138.

22. **Казанцев А.С.** Способ определения остаточных напряжений в образцах А.с. СССР. [Текст] / А.С. Казанцев, В.П. Первухин, С.И. Иванов // № 684288.-1979.
23. **Карташов Ю.М.** Прочность и деформируемость горных пород. [Текст] / Б.В. Матвеев. М., Недра, 1979.
24. **Кобранова В.Н.** Физические свойства горных пород [Текст] / В.Н. Кобранова // Изд-во физ.-мат. лит., 1962.
25. **Козикаев Д.М.** Возможность исследования оптической голографии при изучении процессов деформирования горных пород [Текст] / Д.М. Козикаев, В.Я. Анцибор // Горн. ж.-1983.-№2. – С.49-51.
26. **Коробской В.К.** СВЧ-установка для исследования воздействия электромагнитной энергии на материалы [Текст] / В.К. Коробской // Труды 2-й научно-технич. конф. по применению СВЧ-энергетики в народном хозяйстве, для исслед. целей и интенсификации технологич. процессов, Саратов, 1977.- С. 11-12.
27. **Коробской В.К.** Исследование электромагнитных характеристик магнетитовых руд в СВЧ-диапазоне радиоволн [Текст] / В.К. Коробской, Е.Б. Абкин, В.В. Чельшкина // Изв. вузов. Горный журнал, 1988.- № 8.- С. 113-116.
28. **Кондрашов В.А.** Исследование прочности крепких горных пород при облучении их энергией СВЧ [Текст] / В.А. Кондрашов, А.Н. Москалев // Сб. "Физика горных пород и процессов". М., 1971. – С. 179-180.
29. **Кошкин Ю.И.** Новая методика определения остаточных напряжений магнитоупругим способом [Текст] / Ю.И. Кошкин, А.С. Крыжановский, А.Т. Кучер, В.Н. Семькин //Прогрессивная технология в варочном производстве. – Воронеж, 1985.- С.20-25
30. **Красновский С.С.** Исследование возможности снижения энергоемкости разрушения горных пород при воздействии мощных потоков СВЧ-энергии миллиметрового диапазона [Текст] / С.С. Красновский, А.П. Уваров // Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Саратов, 1991. – С. 49-51, 139-140.
31. **Курец В.И.** Электроимпульсная дезинтеграция - оптимальная технология высвобождения зерен акцессорных минералов [Текст] / В.И. Курец, Н.С. Рудашевский // Доклады АН СССР, 1991, т. 322, № 6.-С.1086-1089.
32. **Кэ Тин – Суй.** Релаксация напряжения на границах зерен в металлах [Текст] /Кэ Тин – Суй . Сб. «Упругость и неупругость металлов» // Металлургиздат, 1964.
33. **Лобанов Л.Н.** Определения остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы [Текст] / Л.Н. Лобанов // ДАН СССР.- 1983.-271, №3. – С. 557-561.
34. **Максименко А.Г., Уваров А.П.** Исследование комбинированного СВЧ - механического воздействия на горные породы [Текст] / А.Г. Максименко, А.П. Уваров // Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Саратов, 1991. – С. 71-73.

- 35. Микловиц Д.** Влияние остаточных напряжений на сопротивление материалов при высокоскоростных ударных нагрузках [Текст] /Д. Микловиц // Остаточные напряжения, Сборник статей под ред. В.Р. Осгуда. Изд. Иностранной литературы, М.: 1957.- С. 223-242.
- 36. Москалев А.Н.** Способы разупрочнения крепких горных пород [Текст] / А.Н. Москалев /Разрушение горных пород. /сб. науч. трудов. АН УССР. Институт геотехн. механики –Киев Науково думка 1988.- С.3-6 .
- 37. Москалев А.Н.** и др. Способ разрушения горных пород электромагнитными волнами [Текст] / А.Н. Москалев и др. Авт. св. СССР № 724731, кл. E21C 37/18, 1977.
- 38. Москалев А.Н.** и др. Породоразрушающее ЭТМ-устройство с СВЧ-экраном на основе заграждающих структур [Текст] /А.Н. Москалев. Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород". Киев, Наукова думка, 1976.- С. 103-105.
- 39. Новик Г.Я.,** Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горного производства [Текст] / Г.Я. Новик, М.Г. Зильбершмидт. - М., Недра, 1994.
- 40. Образцов А.П.,** Красновский С.С. К определению эффективного режима воздействия плоской электромагнитной волны СВЧ на горную породу [Текст] / А.П. Образцов, С.С. Красновский //Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 2. Днепропетровск, 1972.- С. 69-72.
- 41. Образцов А.П.** Исследование эффекта объемного разрушения горных пород в сильных СВЧ-полях [Текст] /А.П. Образцов, А.П. Уваров, А.Г. Максименко // Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород". Киев, Наукова думка, 1976.- С. 149-150.
- 42. Образцов А.П.** Экспериментальное исследование "взрывного" разрушения горных пород в электромагнитном поле СВЧ [Текст] / А.П. Образцов, Л.М. Блинов, С.С. Красновский //Сб. "Термомеханические методы разрушения горных пород", ч. 5. Днепропетровск, 1972. - С. 49-52.
- 43. Приходько П.С.** Методика контроля стойкости интегральных микросхем к внешним воздействующим факторам в процессе производства [Текст] /П.С. Приходько, С.А. Малюдин, В.А. Вавилов, А.Б. Баринов // Информост, 2002.
- 44. Петров В.М.** Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ [Текст] / В.М. Петров // Информост, 2002.
- 45 Ржевский В.В.** Основы физики горных пород [Текст]: Учебник для вузов / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1984. - С.359.
- 46. Ржевский В.В.** Электрическое разрушение горных пород. [Текст] / Протасов Ю.И. // М., Наука, 1972.
- 47. Соловьев В.И.** Взаимодействие мощных СВЧ-полей метрового диапазона с рудными породами различного состава [Текст] / В.И. Соловьев // Обогащение руд, 2001.- № 2.- С.13-14.

48. **Справочник** (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протоद्याконова М.: «Недра», 1975.- С.279. (Темп. Плавления, удельная теплоемкость горных пород).
49. **Султаналиева Р.М.** Результаты определения параметров структуры и остаточных напряжений горных пород методом рентгеновской дифрактометрии [Текст] / Р.М. Султаналиева, К.Т. Тажибаев, Т.К. Загорыкина, М.Г. Зильбершмидт // Геомеханическое обоснование методов расчета устойчивости обнажений.-Бишкек: Илим, 1992.- С. 107-110.
50. **Тажибаев К.Т.** Деформация и разрушение горных пород [Текст] / К.Т. Тажибаев // “Илим”, Фрунзе, 1986.- С.106.
51. **Тажибаев К.Т.** Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов [Текст] / К.Т. Тажибаев. - Фрунзе: Илим, 1989. – С.180.
52. **Тажибаев К.Т.** Структурно-механическая модель напряженно-деформированного состояния неоднородной твердой среды [Текст] / К.Т.Тажибаев, Р.М. Султаналиева // Геомеханическое обоснование методов расчета устойчивости обнажений.-Бишкек: Илим, 1992. – С.99-107.
53. **Тажибаев К. Т.** Остаточные напряжения разных масштабных структурных уровней и анализ их изменения на основе структурно-механической модели неоднородного твердого материала [Текст] /К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева //Известия НАН КР №2.- 2011. - С . 110-114
54. **Тажибаев К.Т.** Способ измельчения руд и минералов [Текст] /К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев // Патент на изобретение КР № 1503.-2012.
55. **Фокеев В.М.** О некоторых причинах изменения механических свойств горных пород при термическом воздействии и последующем охлаждении [Текст] / В.М. Фокеев //Изв. вузов «Геология и разведка», 1965.
56. **Чельшкина В.В., Коробской В.К.** Разработка технологии разупрочнения композиционных материалов в электромагнитных полях СВЧ [Текст] / В.В. Чельшкина, В.К. Коробской // Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Тез.докл. Саратов, 1991.-С. 51-52.
57. **Чернышев Г.Н., Антонов А.А., Морозов В.К.,** Способ определения внутренних остаточных напряжений [Текст] / Г.Н. Чернышев, А.А. Антонов, В.К. Морозов // А.С. СССР №807038.- С. 1981.
58. **Цыганенко С.М., Ваганов Л.И.** СВЧ-устройство для термомеханического разрушения горных пород [Текст] / С.М. Цыганенко, Л.И. Ваганов //Сб. "Термомеханич. методы разрушения горных пород", ч. 5. Днепропетровск, 1972.- С. 53-55.
59. **Цыганенко С.М.** Передача энергии СВЧ в горные породы при электротермомеханическом разрушении в режиме резонанса электромагнитных волн [Текст] /С.М. Цыганенко //Сб. "Комплексные исследования физич. свойств горных пород". Тез.докл. М., МГИ. 1977. С- 76.

- 60. Шмырев В.В.** Окно для загрузки и разгрузки СВЧ-камеры нагрева [Текст] /В.В. Шмырев, М.Н. Молохов // Авт. св. СССР № 1123118, кл. H05B 6/64, 1976.
- 61. Явтушенко О.В.,** Коробской В.К. Исследование воздействия СВЧ-энергии на некоторые горные породы [Текст] / О.В. Явтушенко, В.К. Коробской //Сб. "Механика и разрушение горных пород", ч. 4. Киев, 1976.- С. 142 – 144
- 62. Ямщиков В.С.** Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов [Текст] /В.С. Ямщиков.- Москва, «Недра», 1982.
- 63. Badhurst D.H.** et al. The applications of microwave energy in mineral processing and pyrometallurgy in Australia. SPRECHSAAL, 1990, 123, № 2, 194-197.
- 64. Bond F.C.** Crushing and grinding calculations. Brit. Chem. Eng., 1960, 6, 378-385, 543-548.
- 65. Clark D.E.** Microwave processing of materials. Annu.Rev. Mater. Sci, 1996, v. 26, 299-331.
- 66. Evans A.G.** Residual stress measurement using aconstir emission. J.Amer.Germ.Soc., 1975, 58, N. 5-6. 239-243.
- 67. Freedman M.** X-ray analysis of residual elastic strein in quartzoce rocks.- Proc.10<sup>th</sup> Symp.Roc.Meck. Austintex, New Jork,1972.
- 68. Hanl V.,**Vaessen G.,Weber B/ Die Rentgenographiche Ermittuing der Eigenspannugen in Stahlen mit Waltexur Harteer –Techn.1985, 40,№3 s. 122-123.
- 69. Gazzara Charles P.** X-ray residual Stress measurement Saistem for armi material problems. “Residual stress roloxat/ Proc. “ Sagamore Army Mater. Res. Conf. Lake, Placid, N V., 13-17, July, 1981, New – York, London, 1982, p. 369-388.
- 70. Lindroth D.P.,** Morell R.J., Blair J.R. Microwave assisted hard rock cutting. US Pat. № 5003144, cl. 219/10.55A (H05B 6/80), 1991.
- 71. Macherlauch Eckard.** Eigenspannungen «Materialprufing» 1978, 20, N1, p. 28-33.
- 72. McGill S.L.,** Walkiewicz J.W., Smyres G.A. The effects of power level on the microwave heating of selected chemicals and minerals. Proc. Materials Res. Soc. Symp. Microwave Processing Materials, Reno, 1988, 124, 247-253.
- 73. Morgental L.,** Schott G.A. A Barkhausen-Ranspannungessungzumnachweis won Eigenspannugen. 8th Cogr. Mater. Test., Budapest, 1982, 28Sept.-10 Oktober 1982, Lectures Vol.3, Budapest, 1982, S.1246-1250.
- 74. Nistaioka K,** Havabusa T., Fijiwara Y. Theory of the X-ray residual stress analysis. “Sch. Met.” 1974,8,n,p. 13491350.
- 75. Noronha P.L.,** Wort I.I. An ultrasonic techique for the measurement of residual Stress.I. Test. And Eval, 1975, 3, N2, p.147-152.
- 76. Nukn-Lari A.** Les contraintesresiduelles en mechaniqueGalvano-Organo-Treit. Sufrace, 1985,54, N 556, p.481-483.
- 77. Reik G.** Residuelle Spannungen in quarzreichen Gesteinen Rontgendiffraktometrishe Messung. –«Geologische Rundschau», 1976, Vol.65,№/1, s.66-83.



- 78. Pintschovins L.** Vohringer Determination of residual stress distributins in the interior of technical narts bu mens of neutron diffraction. «Resudual Sagamore Mater». Conf., Laik Placid, N.p. 13-17 Yuly 1981, New York, p.467-482.
- 79. Reiter A.,** Lode W. X-ray Strain field of las «Stain», 1985,21, №1,p.71.
- 80. Salsman J.B.** et al. Short-pulse microwave treatment of disseminated sulfide ores. MineralsEng., 1996, v. 9, No 1, 43-54.
- 81. Tietz Horet-Dieter/** Eigenspannungen “Difinition-Messen-Bewerten” Sitzungsber. Akad. Wiss. DDr, Math-Natur-Wiss.- Techn., 1977, N6, p.1-29.
- 82. Tranquilla J.M.** Microwave treatment of metal bearing ores and concentrates. US Pat. № 5824133, cl. 75/10.13 (H05B 6/80), 1998.
- 83. Vernigorov N.S.,** Didenko A.N., Sulakshin A.S., Koslov E.V., SharkeevYu.P. Dislocation structure of copper after exposure by high power pulse microwave. // Proc. of 10-th Int. Conf. onHighPowerParticleBeams. SanDiego, USA, July, 1994.
- 84. Walkiewicz J.W.,** Clark A.E., McGill S.L. Microwave-assisted grinding. IEEE Trans. on Industry Appl., 1991, 27, № 2, 239-243.
- 85. Wernicke G.,** Trager J. Ermittlung von Eigenspannugtn mit Hilfe der holographischen Interferometrie. Maschinenbautechnik,1977,26,№11,s.521-524,482.
- 86. Zhon R.I.,** Pense A.W., Baschore M.L., Lions D. H. “WELD, RES. Counc. Bull”, 1995, N 302, p . 23-32, A study of residual stress in pressure vesels steels.