

Национальная академия наук Кыргызской Республики
Институт геомеханики и освоение недр

Диссертационный Совет Д 25.16.531

На правах рукописи
УДК 531.781; 622. 02.539.37; 622.831

Акматалиева Минажат Сабыровна

**ОБОСНОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

Специальность: 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород
взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек –2017

Работа выполнена в Институте геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тажибаев Кушбакали Тажибаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Усманов Салават Фаргатович,

доктор технических наук
Бакиров Калыс Берикович

Ведущая организация: Институт горного дела и горных технологий им. У Асаналиева, город Бишкек, проспект Чуй, 215

Защита состоится «22» декабря 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.25.16.531 в Институте геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики по адресу: 720017, г. Бишкек, ул. Медерова, 98.

Факс: +996312541117 e – mail: ifmgrp@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики, г. Бишкек, ул. Медерова, 98.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д т.н.

О.В. Никольская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Остаточные напряжения как фактор геомеханической неоднородности горных пород в ряде случаев оказывают существенное влияние на их механическое поведение. Результаты проведенных многими авторами экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что остаточные напряжения в зонах их высокой концентрации являются основным фактором, определяющим процесс динамического разрушения горных пород в виде стреляний, горных ударов и т.д. При освоении минерально-сырьевых ресурсов горных территорий одной из главных задач является определение свойств и напряженного состояния горных пород. В горных сейсмоактивных регионах остаточные напряжения оказывают существенное влияние на общее напряженное состояние породного массива. В настоящее время не достаточно полно изучены закономерности формирования и распределения остаточных напряжений горных пород сейсмоактивных регионов, особенно влияние этих напряжений на деформацию и разрушение горных пород. Исследование остаточных напряжений и их механических проявлений в процессах деформации и разрушения горных пород остается актуальной, особенно для решения задач по прогнозу и предупреждению динамических разрушений в породных массивах при разработке удароопасных месторождений полезных ископаемых, расположенных в горных регионах, что характерно для Кыргызской Республики. Известные и широко распространенные методы определения действующих, в том числе остаточных напряжений путем образования новых поверхностей (методы разгрузки) имеют невысокую точность из-за неполной разгрузки существующих остаточных напряжений при образовании поверхностей (надрезов, отверстий), из-за частичного разрушения и искажения первоначальных напряжений. Известные ультразвуковые методы позволяют определить напряжения в твердых телах, если известны постоянные упругости второго и третьего порядка. Эти методы трудоемки и имеют низкую точность, из-за выполнения работ по установлению большого количества трудно определяемых характеристик упругости второго и третьего порядка, предварительного проведения дополнительных исследований механических свойств на напряженных и на свободных от внешней нагрузки (ненапряженных) образцах материала. В свободных от внешней нагрузки образцах могут иметь место остаточные напряжения, которые искажают результаты определения характеристики упругости и требуют дополнительного определения величины и знака остаточных напряжений. В связи с этим работа посвященная теоретическому и экспериментальному обоснованию ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах представляет актуальную научно-практическую задачу.

Связь темы диссертации с крупными научными программами, основными научно-исследовательскими работами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института физики и механики горных пород по проекту: «Разработка научно-методических основ и оценка устойчивости геотехнических сооружений в горноскладчатых областях», раздел «Оценка влияния остаточных напряжений на деформацию и разрушение горных пород» (№ гос. регистрации: 0002863, 2003-2005 г.), с планом научно-исследовательских работ Института геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики по проекту: «Оценка напряженного состояния горных пород и свойств грунтов породных массивов геотехнических объектов», раздел «Исследование механических свойств и остаточных напряжений горных пород рудных месторождений Кыргызской Республики» (№ гос. регистрации: 0005621, 2009-2011 г.), по проекту: «Совершенствование технологий при освоении месторождений полезных ископаемых Кыргызстана и исследование напряженного состояния горных пород», раздел «Исследование остаточных и действующих напряжений горных пород рудных месторождений Кыргызской Республики» (№ гос. регистрации: 0006583, 2013-2014 г.).

Цель диссертационной работы - разработка ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах, основанного на применении поперечных поляризованных волн.

Для достижения цели **предусмотрены решения следующих задач:**

1. Исследование скорости распространения ультразвуковой поляризованной сдвиговой (поперечной) волны в горных породах и технических материалах;
2. Исследование акустических показателей остаточных напряжений твердых материалов, в том числе горных пород с разными механическими свойствами;
3. Разработка ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах с использованием поперечных поляризованных волн;
4. Определение механических свойств и остаточных напряжений горных пород.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые в плоской модели, на основе результатов измерений скоростей взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных волн, установлено, что разность скоростей перпендикулярно и параллельно (к длинной стороне плоскости) поляризованной волны по единой для обеих волн базе измерения не зависит от наличия в пути трещин и выработки, а зависит от остаточных напряжений;

2. Установлено, что разности скоростей взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных ультразвуковых волн зависят от уровня и

знака остаточных напряжений, и остаточные напряжения, определенные на основе применения поперечной поляризованной волны хорошо согласуются с визуально наблюдаемой картиной изохром известного поляризационно - оптического метода.

3. Установлена функциональная взаимосвязь, отражающая закономерность изменения скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от остаточного напряжения в горных породах, заключающаяся в том, что остаточное напряжение приводит к пропорциональному изменению относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны.

4. Впервые экспериментально установлено, что в горных породах угол между направлением нормального максимального и минимального остаточного напряжения составляет 90^0 градусов, что согласуется с положением классической механики о взаимной перпендикулярности главных (максимальных и минимальных) нормальных напряжений твердых материалов.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

- разработана методика определения акустического параметра остаточных напряжений горных пород – разности скорости взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных ультразвуковых волн, позволяющая определить наличие или отсутствие, а также знак остаточных напряжений в горных породах;
- разработан метод определения нового механического показателя – волнового модуля напряжения горных пород, характеризующий их структуры, свойства упругости и пластичности;
- разработан поляризационно-акустический метод, позволяющий определять знак и величину остаточных напряжений в горных породах, полухрупких и пластичных твердых материалах с разными механическими свойствами;
- результаты исследований механических свойств и напряжений горных пород использованы при составлении локальных проектов рудника Кумтор «Корректировка технического проекта Центрального участка(2010г.)», «Специальный проект разработки Центрального карьера на 2016г.», «Методических указаний к курсовому проектированию», которые применяются в учебном процессе для студентов по специальности «Физические процессы горного производства» при подготовке горных инженеров в Кыргызско - Российском Славянском университете.

Экономическая значимость полученных результатов состоит в использовании результатов исследований по определению механических свойств и остаточных напряжений горных пород при составлении локальных проектов разработки Кумторского месторождения, позволяющее обеспечить безопасность ведения горных работ при отработке запасов Центрального участка рудника.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Функциональная взаимосвязь, отражающая закономерность изменения скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от остаточного напряжения в горных породах, заключающаяся в том, что остаточное напряжение приводит к пропорциональному изменению относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны.
2. Новый параметр остаточных напряжений горных пород – разность скорости взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных ультразвуковых волн, отражающая наличия или отсутствия, а также знак остаточных напряжений в горных породах.
3. Метод определения нового механического показателя – волнового модуля напряжения горных пород, характеризующий их структуры, свойства упругости и пластичности.
4. Поляризационно-акустический метод определения знака и величины остаточных напряжений в горных породах, полухрупких и пластичных твердых материалах с разными механическими свойствами не нарушая целостность конструкций, образцов, изделий, позволяющий повысить точность, уменьшить трудоемкость определения остаточных напряжений в твердых материалах по сравнению с существующими методами (Способ определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах / Патент на изобретение Кыргызской Республики № 1826 от 29.01.2016).

Личный вклад соискателя состоит в: анализе методов определения остаточных напряжений; постановке цели и задач исследований, выполнении экспериментальных исследований по изучению механических свойств, остаточных напряжений горных пород ряда месторождений; принятии участия в разработке ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах по части проведения экспериментальных исследований.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, научных положений и выводов подтверждается:

- взаимным соответствием результатов экспериментального определения остаточных напряжений в горных породах и технических материалах предложенным поляризационно-акустическим методом с данными известного и наглядного поляризационно – оптического метода;
- соответствием результатов экспериментальных исследований остаточных напряжений предложенным методом с расчетными и экспериментальными данными, полученными в Институте сварки имени Е.О. Патона;
- представительностью и воспроизводимостью полученных экспериментальных результатов определения остаточных напряжений в горных породах и согласованностью этих результатов с данными метода разгрузки.

Апробации результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались на: заседаниях Ученого Совета Института геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики (г. Бишкек, 2007 -2016 гг.); Первой международной конференции инженерной академии Кыргызской Республики (г. Бишкек, октябрь, 2007г.); Международной Научно-Технической Конференции «Наука, образования, инновации» (г. Бишкек, 2009г.); 2-й Международной Научно-Практической Конференции «Перспективы развития научно-инновационной деятельности» (г. Бишкек, Ноябрь, 2010г.); Международной конференции «Проблемы геомеханики и освоения недр», посвященной 80-летию академика НАН КР И.Т. Айтматова (г. Бишкек. Июнь, 2011г.); 9-м Международном симпозиуме «Фундаментальные и прикладные проблемы науки», посвященной памяти Н.Н. Ершовой (г. Москва. 2016г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.

Результаты исследований, отражающие основное содержание диссертационной работы, опубликованы в 18 печатных работах, в научных журналах, вошедших в Перечень рецензируемых научных изданий, утвержденным президиумом ВАК Кыргызской Республики, соответствуют теме диссертации. В том числе по теме диссертации получены патенты № 1245, № 1826 Кыргызской Республики на изобретения и диплом №453 на научное открытие (в соавторстве). М. МААНОИИ, РАЕН.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, изложенных на 142 страницах, содержит 55 рисунков, 14 таблиц, и список литературы из 77 наименований.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю, д.т.н., Заслуженному деятелю науки и техники КР, профессору Тажибаеву К.Т. за внимание, советы и консультации, практическую помощь при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ современного состояния изученности остаточных напряжений в твердых материалах, рассмотрен вопрос о применимости существующих методов для определения остаточных напряжений в горных породах. Анализируются научные основы теоретических и экспериментальных исследований, результаты ультразвуковых методов определения остаточных напряжений в твердых деформируемых средах. Показано, что в сейсмоактивных горноскладчатых областях напряженное состояние породного массива в значительной мере определяется с неоднородными остаточными напряжениями слагающих горных пород, особенно магматического и гидротермального генезиса. Результаты выполненных И.Т. Айтматовым, Н. Г. Ялымовым, К.Ч. Кожогуловым, Ш.А. Мамбетовым, К.Т. Тажибаевым, Б.Ж. Жумабаевым, О. В. Рогожниковым экспериментальных и аналитических исследований напряженного состояния массива горных пород горноскладчатых областей

свидетельствуют о том, что в пределах небольших объемов породного массива горизонтальные и вертикальные напряжения по величине весьма неоднородные. Инструментальные измерения напряжений в массиве горных пород сейсмоактивных регионах показали, что весьма часто горизонтальные составляющие действующих в массиве напряжений значительно превышают вертикальную компоненту. На основе экспериментальных комплексных исследований действующих и остаточных напряжений К.Т. Тажибаевым было выявлено, что превышение горизонтального напряжения вертикальную компоненту и неоднородности напряжений породного массива связаны с неоднородными по своей природе остаточными напряжениями горных пород сейсмоактивных регионов.

В работах И.А. Биргера, Ф.Ф. Витмана, Н.П. Влоха, Н.Н. Давиденкова, А.Д. Сашурина, М.Г. Зильбершмидта, К.Т. Тажибаева, Р.М. Султаналиевой, А.А. Антонова, Г.О. Казакбаевой, А.С.Ташмаматова, А.С. Казанцева, представлены результаты исследований остаточных напряжений в технических материалах и горных породах, где использованы методы разгрузки, рентгеноскопии, голографической интерферометрии и поляризационно - оптический метод. Ультразвуковые методы исследований остаточных напряжений представлены в работах В.Н. Бакулина, Г.А. Буденкова, Ф. Ф. Горбачевича А.Н. Гузь, О.И. Гуца, К.Т.Тажибаева, Т. Токиока. Недостатками известных и широко распространенных методов определения действующих, в том числе остаточных напряжений путем образования новых поверхностей (методы разгрузки) являются их невысокая точность из-за неполной разгрузки существующих остаточных напряжений при образовании поверхностей (надрезов, отверстий), ограниченность их применения из-за частичного разрушения конструкций, искажений первоначальных напряжений. Известные ультразвуковые методы позволяют определить напряжения в твердых телах, если известны постоянные упругости второго и третьего порядка, а также, если измерены скорости распространения волн в незагруженном и загруженном состояниях тела. Недостатками вышеуказанных ультразвуковых методов и способов определения напряжений являются их высокая трудоемкость и низкая точность, из-за выполнения работ по установлению большого количества трудно определяемых характеристик упругости второго и третьего порядка, предварительного проведения дополнительных исследований механических свойств на напряженных и на ненапряженных образцах материала. В ненапряженных внешней нагрузкой образцах могут иметь место остаточные напряжения, которые искажают результаты определения характеристик упругости и требуют дополнительного определения величины и знака остаточных напряжений другим методом.

На основе анализа существующих механических и неразрушающих методов определения остаточных напряжений твердых материалов показано, что из всех методов, для исследования остаточных напряжений в горных породах, наиболее подходящим по информативности, оперативности и

точности методом является метод ультразвукового исследования остаточных напряжений, основанный на измерении скорости прохождения поперечных поляризованных волн во взаимно перпендикулярных направлениях. Исходя из этого, сформулированы цель и задачи исследований по теме диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты определения деформационных свойств горных пород, исследований остаточных напряжений технических материалов и горных пород с применением поляризованных поперечных ультразвуковых волн. Обоснован ультразвуковой параметр остаточных напряжений, позволяющий на начальной стадии исследований определять наличие или отсутствие остаточных напряжений и их знаки. На пластинках (эпоксидная смола ЭД-6, плоская модель), показано, что по разности скорости или времени прохождения через определенную базу (по ширине) параллельных (вектор поляризации параллельны к длинной стороне пластинки) и перпендикулярных (вектор поляризации по толщине пластинки) сдвиговых (поперечных) поляризованных ультразвуковых волн, то есть по значению

$$T_{\Delta_s} = T_{sp} - T_{sc} \quad (1)$$

можно определять знак и величину остаточного напряжения для плоского напряженного состояния, где T_{Δ_s} - разность времени прохождения ультразвуковых сдвиговых поляризованных волн; T_{sc} , T_{sp} - соответственно

время прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны (по ширине) с перпендикулярным (по толщине) и параллельным к длинной стороне пластинки вектором поляризации излучателя и приемника.

Как известно, при плоском напряженном состоянии считается, что в перпендикулярном к рассматриваемой плоскости направлении напряжение отсутствует. Экспериментально установлено, что изменение указанной в формуле 1 разности происходит в зависимости от знака и величины остаточных напряжений (рисунки 1; 2).

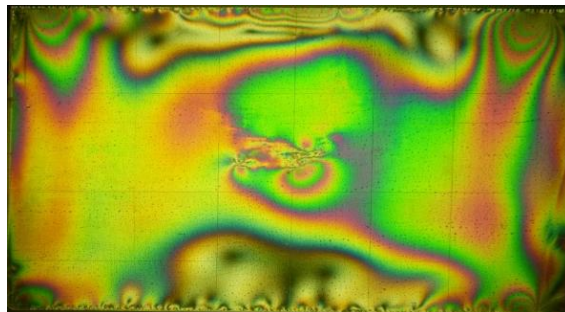
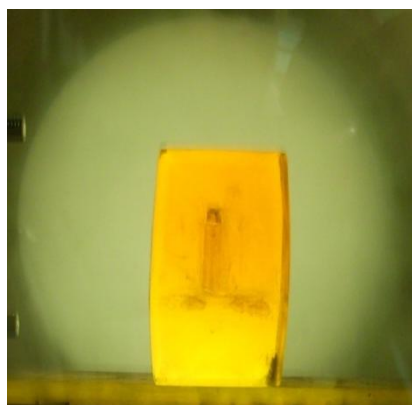


Рис. 1. Пластика с наведенными остаточными напряжениями (снимок сделан в поляризованном свете, ЭД-6, модель 2-08, после термической обработки).



Рис. 2. График разности времени прохождения ультразвуковых сдвиговых поляризованных волн с параллельным (по ширине) и перпендикулярным (по толщине) к длинной стороне пластинки вектором поляризации излучателя и приемника (ЭД-6, модель 2-08, после термической обработке).

В объемных образцах (эпоксидная смола ЭД-6) также установлено, что по разности времени прохождения через определенную базу твердого материала параллельных и перпендикулярных сдвиговых (поперечных) поляризованных ультразвуковых волн можно определить наличия или отсутствия, а также и знак остаточных напряжений (рис. 3; 4).



А



Б

Рис. 3. А - образец №5 (призма, ЭД-6, после пластической деформации) без остаточных напряжений. Б - образец №9 (призма, ЭД-6) с остаточными напряжениями (снимки сделаны в поляризованном свете).

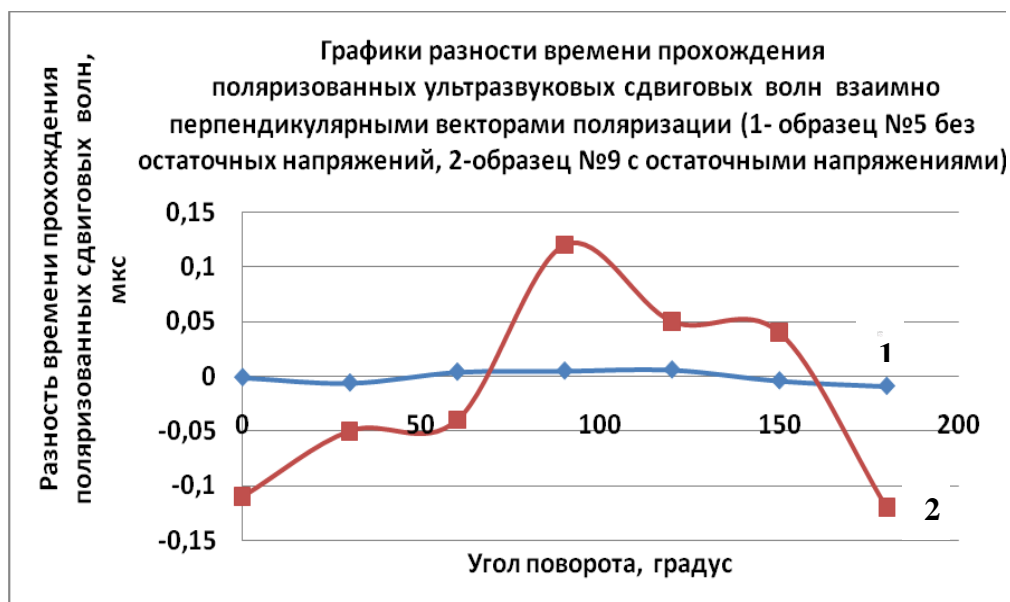


Рис. 4. Графики разности времени прохождения взаимно перпендикулярных поляризованных поперечных волн по разным направлениям (эпоксидная смола ЭД-6, 1- для образца №5 без остаточных напряжений; 2 – для образца №9 с остаточными напряжениями).

Из рисунков 1;2;3;4 видно, что разности времени прохождения взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных волн изменяются в зависимости от остаточных напряжений и в соответствии с их концентрациями, визуально наблюдаемыми с помощью картины изохром поляризационно-оптического метода. Исходя из этого, и в соответствии с полученными экспериментальными данными исследования остаточных напряжений в пластинках (плоских моделях) и образцах поляризационно-активного материала, для плоского напряженного состояния получили следующую формулу:

$$\sigma = \frac{T_{\Delta S}}{T_{SC}} K \quad (2) \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{(T_{SP} - T_{SC})}{T_{SC}} K \quad (3),$$

где K – волновой модуль напряжения (название наше) материала; σ – нормальное остаточное напряжение направленное по вектору поляризации сдвиговой волны, проходящая по перпендикулярному к напряжению направлению.

Третья глава посвящена разработке поляризационно - акустического метода определения остаточных напряжений горных пород. В этой главе приведены методика и результаты определения акустического параметра остаточных напряжений горных пород, метод и результаты определения волнового модуля напряжения.

Были получены формулы, выражающие функциональную зависимость остаточного напряжения от разности времени прохождения взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных ультразвуковых волн (см.

формулу 2 и 3). Заменяя время прохождения ультразвуковой сдвиговой волны T_s через скорость $V_s = \frac{L}{T_s}$, где L - база прозвучивания, из формулы 3

получим $\sigma = (\frac{1}{V_{SP}} - \frac{1}{V_{SC}})V_{SC} K$ (4) или $\sigma = (\frac{V_{SC}}{V_{SP}} - 1) K$ (5),

где σ - нормальное остаточное напряжение, направленное по вектору поляризации сдвиговой (поперечной) волны;

V_{SC} , V_{SP} - соответственно скорость прохождения через заданную базу (по ширине) пластинки ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны с перпендикулярным (по толщине) и параллельным к длинной стороне пластинки вектором поляризации излучателя и приемника.

Формулы 4 и 5 применимы для определения остаточных напряжений первого рода при плоском напряженном состоянии в плоских телах, где в перпендикулярном к плоскости направлении напряжения отсутствуют (плоское напряженное состояние). В реальных объемах твердых материалов встречается двусосное и трехсосное напряженное состояние.

В таких двух и трехмерных случаях для определения остаточных напряжений в первую очередь необходимо определить время прохождения сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны (через заданную, изучаемую базу) для случая когда нет остаточных напряжений (ненагруженное состояние), т.е необходимо определить - T_{so} , а затем с этим временем сравнивать время прохождения сдвиговой поляризованной волны через заданную базу в напряженных зонах, то есть разность времени прохождения сдвиговых поляризованных волн через изучаемую базу материала необходимо определять по формулам для направлений X, Y, Z:

$$T_{\Delta sx} = T_{sx} - T_{sox}; \quad T_{\Delta sy} = T_{sy} - T_{soy}; \quad T_{\Delta sz} = T_{sz} - T_{soz},$$

где $T_{\Delta sx}$, $T_{\Delta sy}$, $T_{\Delta sz}$ - разность времени прохождения сдвиговых поляризованных волн напряженного и ненапряженного состояния (без остаточных напряжений) для направления X, Y, Z соответственно; T_{sx} , T_{sy} , T_{sz} - время прохождения сдвиговой поляризованной волны через напряженные зоны (при наличии остаточных напряжений) по направлению X, Y, Z соответственно; T_{sox} , T_{soy} , T_{soz} - время прохождения сдвиговой поляризованной волны по X, Y, Z при отсутствии остаточного напряжения.

Следует отметить, что для определения нормального напряжения по направлению Z необходимо прозвучивать по направлению X или Y, направляя вектор поляризации сдвиговой волны по Z, то есть направление прозвучивания должно быть перпендикулярным к направлению определяемого напряжения, а вектор поляризации - параллельным.

Тогда исходя из формулы 3

$$\sigma_x = \frac{(T_{sz} - T_{soz})}{T_{soz}} K_z; \quad \sigma_y = \frac{(T_{sx} - T_{sox})}{T_{sox}} K_x; \quad \sigma_z = \frac{(T_{sy} - T_{soy})}{T_{soy}} K_y \quad (6) \text{ или}$$

$$\sigma_x = \left(\frac{T_{SZ}}{T_{SOZ}} - 1 \right) K_z \quad \sigma_y = \left(\frac{T_{SX}}{T_{SOX}} - 1 \right) K_x \quad \sigma_z = \left(\frac{T_{SY}}{T_{SOY}} - 1 \right) K_y \quad (7).$$

При выражении равенства 7 через скорость получена (совместно с Т.К. Тажибаевым) формула

$$\sigma_x = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) K_z \quad \sigma_y = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) K_x \quad \sigma_z = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) K_y \quad (8),$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - нормальное напряжение по X, Y, Z соответственно; K_x, K_y, K_z - волновой модуль напряжения по направлениям X, Y, Z соответственно; V_{SX}, V_{SY}, V_{SZ} - скорость прохождения через определенную базу напряженного материала сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны по направлениям X, Y, Z соответственно; $V_{SOX}, V_{SOY}, V_{SOZ}$ - скорость прохождения сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны по направлениям X, Y, Z соответственно при отсутствии напряжения (не нагруженное состояние, без остаточных напряжений).

Для определения волнового модуля напряжения K введем обозначение

$$\omega_z = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) \quad \omega_x = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) \quad \omega_y = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) \quad (9), \text{ тогда из}$$

формулы 8 $\sigma_x = \omega_z K_z$; $\sigma_y = \omega_x K_x$; $\sigma_z = \omega_y K_y$, откуда

$$K_x = \frac{\sigma_y}{\omega_x} \quad K_y = \frac{\sigma_z}{\omega_y} \quad K_z = \frac{\sigma_x}{\omega_z} \quad (10).$$

Для рассмотренных изотропных технических материалов и квазиизотропных горных пород $K_x = K_y = K_z = K$. Для анизотропных (слоистых, кристаллических анизотропных) горных пород и технических материалов значение волнового модуля напряжения – K_i экспериментально определяется по соответствующим направлениям (например, для направлений вдоль и перпендикулярно слоистости).

Для предварительного определения знака (направления) и порядка остаточных напряжений сначала необходимо определять акустический параметр остаточных напряжений, а затем после определения волнового модуля напряжения K определяется величины остаточных напряжений по разным направлениям. Следует отметить, что для определения акустического параметра напряжения важно более точно определять скорость поляризованной сдвиговой волны для ненагруженного состояния (для направления, где остаточное напряжение отсутствует, или близко к нулю) V_{SO} . Как указано выше, по признаку равенства скорости во взаимно перпендикулярных направлениях при постоянной базе измерения сдвиговых поляризованных волн определяется скорость прохождения сдвиговой волны для случая отсутствия остаточных напряжений - V_{SOI} (один из признаков

отсутствия остаточных напряжений - $V_{SP} = V_{СП}$). Для нахождения направлений, где остаточное напряжение отсутствует или близко к нулю, прозвучивания проводится по разным направлениям, синхронно поворачивая направления вектора поляризации преобразователей через 1 или 10^0 от нуля до 360 градусов.

Величина волнового модуля напряжения горной породы (K) определяется экспериментально, то есть путем прозвучивания образца при его ступенчатом нагружении и разгрузке (рисунок 5). Проводится по 5-10 определений K при нагружении и разгрузке образца представительного объема исследуемого материала. Значение K как характеристика горной породы, материала определяется как среднее из 5-10 единичных значений, полученных при прозвучивании в процессе нагружения и разгрузки.

Следует отметить, что волновой модуль напряжения (K) необходимо определять для характерного, представительного объема, так как данный модуль зависит от вещественного состава и структуры материала. В связи с этим для экспериментального определения величины K путем прозвучивания при ступенчатом нагружении и разгрузке было предложено использовать призматические образцы материалов, в том числе горных пород со следующими размерами - 5x5x10 см.; 7x7x14 см (в зависимости от такого структурного параметра материала, как средний размер зерна).

Превышение в два раза высоты призматического образца ее поперечного размера позволяет сводить к минимуму влияния торцевых (контактных) условий передачи нагрузок на напряженное состояние и обеспечивает равномерное распределения напряжений в средней части образца, где для определения волнового модуля напряжения (K) горной породы, материала проводится прозвучивания поляризованной сдвиговой ультразвуковой волной (рисунок 5).



Рис. 5. Нагружение (на прессе ЦДМ-100) и прозвучивание (УК-10 ПМ) призматического образца.

Значение и знак волнового модуля напряжения K связано с особенностью упруго пластической деформации при статическом сжатии, обусловленной вещественным составом, структурой и механическими свойствами этих материалов. Действительно, некоторые материалы, например, пластмасса, которые имеют отрицательный знак волнового модуля напряжения, относятся к материалам с ярко выраженными пластическими свойствами. Положительное значение волнового модуля напряжения имеется для стали 3, эпоксидной смолы ЭД-6 и для всех исследованных горных пород (таблица 1).

Таблица 1 – Средние значения волнового модуля напряжения K и деформационных характеристик горных пород и технических материалов.

Название (и место отбора) горной породы, технического материала	Волновой модуль напряжения, $K \cdot 10^4$ МПа	Козф. Пуассона μ	Модуль упругости, $E \cdot 10^4$ МПа	Модуль сдвига, $G \cdot 10^4$, МПа
Эпоксидная смола ЭД-6	0,4552	0,267	0,6376	0,1557
Сталь 3	4,3023	0,166	21,962	6,1036
Алюминий пористый (литьё)	-2,0189	0,202	10,451	2,7795
Пластмасса	-0,7745	0,341	0,2980	0,0654
Органическое стекло	-1,9613	0,269	0,8929	0,2178
Мрамор (Кемин)	0,0345	0,208	5,2220	1,3770
Мрамор тонкоз. (Токтогул)	0,0542	0,201	6,9787	1,8585
Гранодиорит	0,5974	0,190	6,6915	1,8066
Метасамотит (Кумтор) RS №5	1,0424	0,233	8,0797	2,0645
Гнейс (Жеты-Огуз)	0,2113	0,109	0,7177	2,1368
Бронза	-1,4574	0,17	27,4	7,5
Мраморизованный известняк	0,4328	0,219	4,31	1,12
Мрамор крупнозерн. (Кемин)	0,2296	0,17	7.6	2.1

После определения волнового модуля напряжения можно определять остаточные напряжения. В качестве примера, на рисунке 6 представлены результаты определения остаточных напряжений поляризационно-акустическим методом в призматическом образце метасамотита рудника Кумтор и в цилиндрическом образце, не имеющем остаточные напряжения мраморизованного известняка месторождения Ингичке. Из этого рисунка видно, что в образце мраморизованного известняка Ингичке по всем направлениям скорости поперечной поляризованной волны при поворотах преобразователей волн через 30^0 градусов практически равные, и поэтому поляризационно-акустический метод показывает практически нулевой результат остаточных напряжений (зависимость 2), хотя по неоднородности вещественного состава и структурных особенностей данная порода сильно не отличается от метасамотита рудника Кумтор.

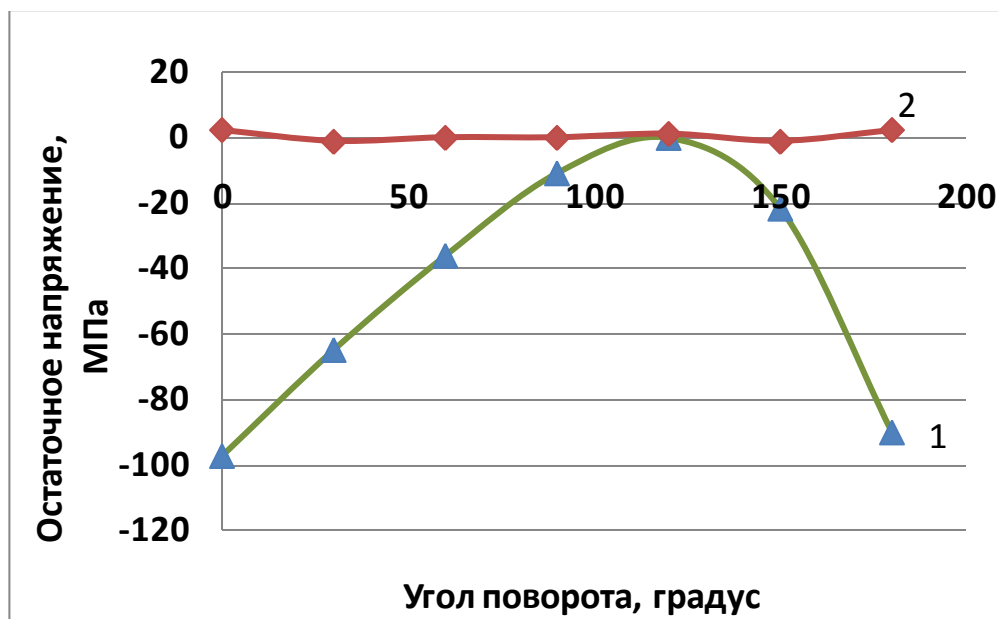


Рис. 6. Графики остаточных напряжений: 1 - метасамотит (рудник Кумтор, проба RS № 5, обр. 3 - 4), 2 - мраморизованный известняк (месторождение Ингичке, обр. 1).

В образце метасамотита рудника Кумтор имеются значительные сжимающие остаточные напряжения (зависимость 1), достигающие до 100 МПа. Из рисунка 6 также видно, что угол между направлением максимального (100 МПа) и минимального (11 МПа) остаточного напряжения составляет 90° градусов, что согласуется с положением классической механики о взаимной перпендикулярности главных (максимальных и минимальных) нормальных напряжений твердых материалов.

В четвертой главе приведены результаты исследований остаточных напряжений в технических материалах и горных породах предложенным поляризационно – акустическим методом. Нами для сравнения и в качестве модели остаточных напряжений, образованных при неравномерном остывании расплавленного материала исследовались также сварочные остаточные напряжения.

Экспериментально, и на основе формулы 8 были получены значения остаточных напряжений в стальной плите со сварным швом (рис.8). Наши результаты определения остаточных напряжений, полученные путем прозвучивания поляризованной поперечной (сдвиговой) волной и на основе установленной закономерности (формулы 8) хорошо согласуются с данными остаточных напряжений полученными в Институте электросварки им. Е.О. Патона методом разгрузки, а также ультразвукового прозвучивания и теоретических расчетов.

На рисунке 7 -8 представлены результаты определения остаточных напряжений в горных породах месторождения Кумтор и Макмал.

На рисунке 7 представлена зависимости остаточных напряжений от угла поворота вектора поляризации поперечной волны для образца Д780 метасамотита месторождения Кумтор и образца №1 мраморизованного известняка месторождения Ингичке (для сравнения). Как видно из рисунка 7, в мраморизованном известняке остаточные напряжения отсутствуют по всем направлениям (зависимость 2), тогда как в метасамотите Кумторского месторождения имеются значительные остаточные напряжения разного знака. Сравнивая остаточные напряжения метасамотита месторождения Кумтор (рис.7,зависимость 1) и окварцованного метасамотита месторождения Макмал (рис.8) можно отметить, что в метасамотитах месторождения Кумтор остаточные напряжения значительно выше, чем в метасамотите Макмальского месторождения. Данный факт можно объяснить тем, что метасамотит Макмальского месторождения имеет значительную микротрещиноватость, и в трещинах, как известно, интенсивно происходят процессы релаксации остаточных напряжений и снижения их уровня.

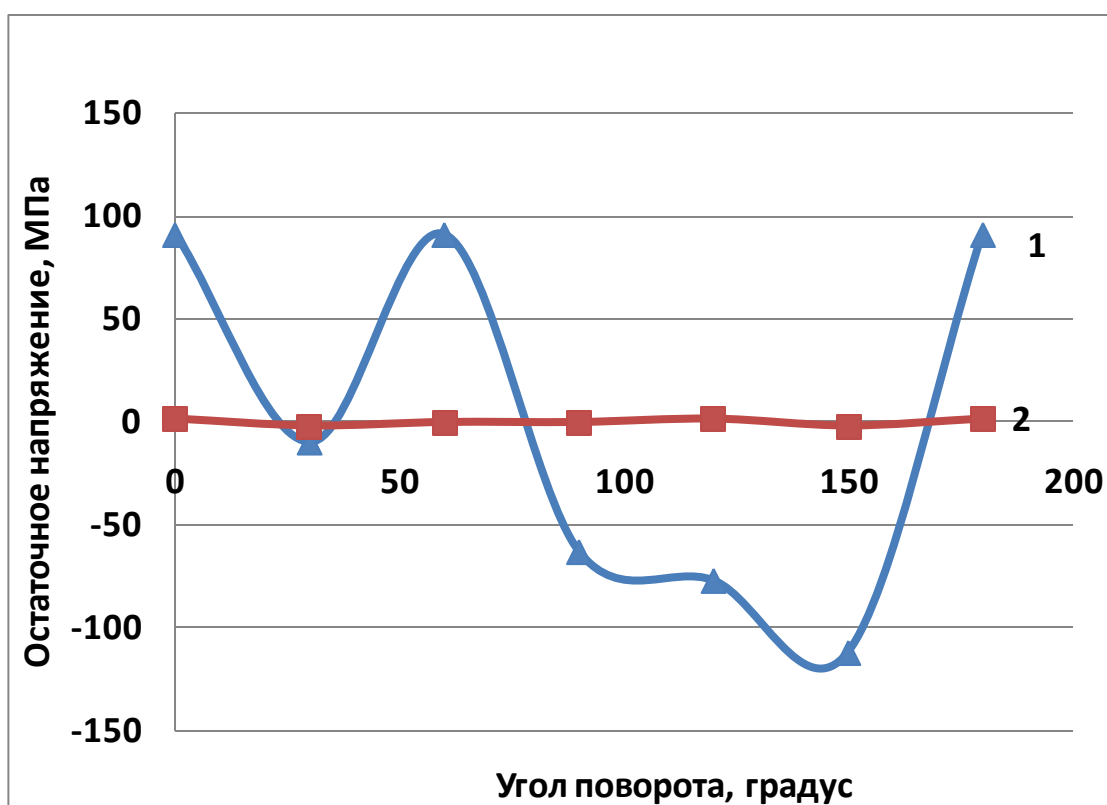


Рис. 7. Графики остаточных напряжений для разных направлений образца (1-метасамотит, скважина Д780, Кумтор; 2- мраморизованный известняк, Ингичке, обр. 1).



Рис. 8. График остаточных напряжений для разных направлений образца (окварцованный метасамодит, штольня 6, скреперный штрек 604, рудник Макмал).

Таким образом, можно отметить, что поляризационно-акустический метод позволяет определять знак и величину остаточных напряжений в горных породах, и других полухрупких материалах с разными механическими свойствами не разрушая конструкцию. При этом весьма важно точное определение волнового модуля напряжения исследуемого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-технической задачи – теоретическое и экспериментальное обоснование ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах, заключающееся в разработке поляризационно-акустического метода определения остаточных напряжений, основанного на применении поляризованной ультразвуковой поперечной волны.

Результаты выполненных исследований позволяют отметить следующие **основные выводы**:

1. Установлено, что остаточные напряжения, измеренные ультразвуковым методом, имеют более достоверные и высокие значения, чем значения напряжений, полученные методом разгрузки, что связано с не полной разгрузкой остаточных напряжений при образовании новой поверхности (резание, бурение) из-за структурной связанности этих напряжений, занижением результатов по методу разгрузки по сравнению с имеющимся напряжением.
2. В плоской модели, на основе результатов измерений скоростей взаимно перпендикулярно поляризованных ($V_s(n)$ -вектор поляризации параллельный и $V_s(c)$ - перпендикулярный к длинной стороне плоскости)

- поперечных волн установлено, что разность скорости перпендикулярно и параллельно (к длинной стороне плоскости) поляризованной волны по единой для обеих волн базе измерения не зависит от наличия в пути трещин и выработки, а зависит от остаточных напряжений.
3. Установлено, что при наличии в пределах плоской модели выработки (пустоты) и при отсутствии остаточных напряжений, скорости прохождения параллельно $-Vs(n)$ и перпендикулярно $-Vs(c)$ поляризованных поперечных волн одинаково уменьшаются в зоне выработки (пустоты), и по этому их разность равно нулю, а при наличии остаточных напряжений данная разность изменяется значительно, причем разность может иметь как положительное, так и отрицательное значение.
 4. На основе исследований влияния механического напряжения на скорость поляризованной ультразвуковой поперечной волны разработана методика определения акустического параметра остаточных напряжений - разности скорости взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных волн, позволяющая определить наличия или отсутствия, а также знак остаточных напряжений в горных породах.
 5. Разработан метод определения нового механического показателя – волнового модуля напряжения горных пород, характеризующий их структуры, свойства упругости и пластичности.
 6. Установлено, что разности скоростей взаимно перпендикулярно поляризованных поперечных ультразвуковых волн изменяются в зависимости от уровня и знака остаточных напряжений, и остаточные напряжения, определенные на основе применения поперечной поляризованной волны хорошо согласуются с визуально наблюдаемой картиной изохром известного поляризационно - оптического метода.
 7. Установлена функциональная взаимосвязь, отражающая закономерность изменения скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от остаточного напряжения в горных породах, заключающаяся в том, что остаточное напряжение приводит к пропорциональному изменению относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны.
 8. На основе применения поляризованных поперечных волн для определения остаточных напряжений впервые экспериментально установлено, что в горных породах угол между направлением нормального максимального и минимального остаточного напряжения составляет 90^0 градусов, что согласуется с положением классической механики о взаимной перпендикулярности главных (максимальных и минимальных) нормальных напряжений твердых материалов.
 9. Разработан поляризационно-акустический метод, позволяющий определять знак и величину остаточных напряжений в горных породах с разными механическими свойствами.
 10. Результаты определения остаточных напряжений, полученные предложенным поляризационно-акустическим методом, хорошо

согласуются с данными остаточных напряжений полученными для аналогичных условий в Институте электросварки им. Е.О. Патона методом разгрузки, а также ультразвукового прозвучивания и теоретических расчетов.

11. Установлено, что в метасамотитах месторождения Кумтор величины остаточных напряжений (100 - 80 МПа) значительно превышают величины таких напряжений (10 - 15 МПа) окварцованного метасамотита Макмальского месторождения, что обусловлено микротрещиноватостью окварцованного метасамотита, приводящей к релаксации остаточных напряжений и снижению их уровня.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Акматалиева М.С. Ультразвуковой способ определения остаточных напряжений [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев. // Вестник Кыргызско - Российского Славянского университета, - Бишкек: 2006. том 6, №7, - С. 30-35.
2. Акматалиева М.С. Оценка остаточных напряжений ультразвуковым методом [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев. // Наука, техника, технология. –Бишкек: Материалы первой международной конференции ИА КР, 4-5 октябрь 2007. - С.10-15.
3. Акматалиева М.С. Результаты исследования остаточных напряжений в твердых материалах поляризованными ультразвуковыми волнами [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. –Бишкек: 2008. Том 8, №10 - С.71-80.
4. Акматалиева М.С. Влияние остаточных напряжений на акустические характеристики и прочность твердых деформируемых сред [Текст]: / К.Т. Тажибаев, Г.О. Казакбаева, Р.М. Султаналиева. // «Известия» КГТУ. Материалы Международной Научно-Технической Конференции. Наука Образования Инновации. –Бишкек: 2009, №17, - С. 358-362.
5. Пат. 1245. Кыргызская Республика, G01B 5/30 (2009.01). Способ определения остаточных напряжений в твердых материалах. [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев; Заявл. 08.07.2008; опубл. 31.03.2010. Бюл. №3, -7с.: ил. 3
6. Акматалиева М.С. Результаты исследования остаточных напряжений с применением поляризованных поперечных ультразвуковых волн [Текст] Известия НАН КР/ М.С. Акматалиева. – Бишкек: 2011. - №1 – С.67-74.
7. Акматалиева М.С. Неразрушающий метод определения остаточных и действующих напряжений твердых материалов [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев. // Материалы Международной конференции «Проблемы Геомеханики и Освоения Недр» к 80-летию академика НАН И.Т. Айтматова. –Бишкек: Июнь 2011, - С.164-175.

8. Акматалиева М.С. Результаты исследования свойств известняка карьера Ак-Татыр и влияния СВЧ волн на его структурное состояние [Текст] Вестник Казахского национального технического университета им. К.И.Сатпаева / М.С. Акматалиева. –Алматы: 2011. -№ 6 (88) - С.169-172.
9. Акматалиева М.С. Методика и результаты определения волнового модуля напряжения твердых материалов [Текст]: / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С.Акматалиева. //Сб. трудов «Современные проблемы механики сплошных сред». –Бишкек: 2012, №16, - С.245-250.
10. Акматалиева М.С. Метод определения остаточных и действующих напряжений в горных породах, основанный на законе изменения скорости поперечной поляризованной ультразвуковой волны от напряжений в твердых материалах [Текст]: / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С.Акматалиева. //«Известия» НАН КР. – Бишкек: 2012 №3, - С. 31-36.
11. Акматалиева М.С. Результаты исследования СВЧ волн на структурное состояние горных пород [Текст] / М.С. Акматалиева // В сборнике «Современные проблемы механики сплошных сред».– Бишкек: 2013. №17, - С. 88-94.
12. Метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов [Текст] / [К.Т. Тажибаев, Р.М.Султаналиева, М.С.Акматалиева и др.]– Бишкек: «Известия» КГТУ им. И.Раззакова, №29, 2013, - С. 303-309.
13. Акматалиева М.С. Болот плитасындагы ширетүүдөн калган калдыктуу чыңалууну изилдөө [Текст] / М.С. Акматалиева // В сборнике «Современные проблемы механики сплошных сред». Газодинамика, геомеханика и геотехнологии. Комитет по теоретической и прикладной механике Кыргызстана, Институт геомеханики и освоения недр НАН КР. – Бишкек: 2014. №19, - С. 99-104.
14. Акматалиева М.С. О методологии определения остаточных и действующих напряжений в горных породах с применением поляризованных ультразвуковых волн [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С.Акматалиева, Д.К. Тажибаев. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки, Том 2. Материалы Кыргызской секции 9 -го Международного симпозиума, посвященного памяти референта МСНТ Н.Н. Ершовой. –М.: РАН, 2016. -С. 39 -46.
15. Пат. 1826. Кыргызская Республика, G01B 5/30 (2015.01). Способ определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах. [Текст]: / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С.Акматалиева; Заявл.23.10.2014; опубл. 29.02.2016. Бюл.№2, -8с.: ил. 3.
16. Акматалиева М.С. Основы поляризационно-акустического метода определения действующих напряжений в горных породах [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С.Акматалиева, Д.К. Тажибаев. //Научный форум: Технические и физико-математические науки. Сборник статей по материалам II-й Международной заочной научно-практической конференции №1(2), -М.:Изд. МЦНО, 2017. - С.52-58.

17. Акматалиева М.С. Метод и результаты определения акустического параметра остаточных напряжений и волнового модуля напряжения горных пород [Текст]: / К.Т. Тажибаев, М.С.Акматалиева, Д.К. Тажибаев. //Материалы 7 –й международной научно-практической конференции «Современные инновации: фундаментальные и прикладные исследования». -М.: 17 февраль, 2017. - С. 11-15.

18. Диплом №453 на научное открытие от 3 октября 2013 года, г. Москва. Закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали). [Текст]: / К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев, М.С.Акматалиева. //Научные открытия -2013.–М.РАЕН, 2014г. –С 48-50.

Акматалиева Минажат Сабыровнанын 25.00.20 «Геомеханика, тоо тектерин жардыруу менен талкалоо, рудник аэрогазодинамикасы жана тоо-кен жылуулук физикасы» адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн «Тоо тектериндеги калдыктуу чыңалууларды ультраүн менен аныктоо ыкмасын негиздөө» деген темада жазылган диссертациясынын РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: тоо тектери, калдыктуу чыңалуу, ультраүн, уюлдашкан толкун, чыңалуунун толкундук модулу, поляризация вектору, туурасынан таралган толкун.

Изилдөө объектиси: рудалуу кендердин тоо тектери.

Изилдөөнүн максаты: тоо тектериндеги калдыктуу чыңалууларды аныктоо үчүн туурасынан таралган уюлдашкан толкундарды колдонууга негизделген ультраүн ыкмасын иштеп чыгуу.

Изилдөөнүн ыкмалары: тоо тектеринин, техникалык материалдардын акустикалык, деформациялык касиеттерин изилдөө ыкмалары, тоо тектериндеги калдыктуу чыңалууну аныктоочу поляризациялык - акустика ыкмасы, тажырыйбалык жыйынтыктардын статистикалык мүнөздөмөлөрүн талдоо ыкмасы.

Изилдөө жабдыктары: ультра үндүү прибор УК-10ПМ, акустополярископ, жүктөөчү жабдыктар ЦДМ-100 жана ЦДМ-30.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңычылдыгы:

тоо тектериндеги калдыктуу чыңалуулардын бар же жок экендигин жана белгисин аныктоо мүмкүнчүлүгүн камсыздоочу калдыктуу чыңалуунун акустикалык көрсөткүчүн аныктоочу ыкманы иштеп чыгуу аткарылды; тоо тектеринин серпилгичтик касиетин, ийкемдүүлүгүн жана алардын ички түзүлүшүн мүнөздөөчү жаңы механикалык көрсөткүч болуп эсептелген чыңалуунун толкундук модулу аныктоочу ыкма сунушталды; поляризацияланган туурасынан таралган ультра үн толкундарынын ылдамдыгынын калдыктуу чыңалууга жараша өзгөрүү закон ченемдүүлүгүн чагылдырган функционалдык өз ара байланыш көз карандылыгы аныкталды; тоо тектериндеги калдыктуу чыңалуунун белгисин жана чоңдугун аныктоону камсыз кылган поляризациялык - акустика ыкмасын иштеп чыгуу аткарылды.

Колдонуу тармагы: иштелип чыккан ыкмалар жер силкинүү активдүүлүгү бар аймактардын, тоо-тектеринин капыстан жарылуу кооптуулугу бар пайдалуу кен байлыктар табылган жерлердин тоо тектеринде калдыктуу чыңалууларды аныктоого багытталган.

РЕЗЮМЕ

диссертации Акматалиевой Минажат Сабыровны на тему: «Обоснование ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Ключевые слова: горная порода, остаточное напряжение, ультразвук, поляризованная волна, волновой модуль напряжения, вектор поляризации, поперечная волна.

Объект исследования: горные породы рудных месторождений.

Цель исследования: разработка ультразвукового метода определения остаточных напряжений в горных породах, основанного на применении поперечных поляризованных волн.

Методы исследования: методы определения акустических, деформационных свойств горных пород, поляризационно-акустический метод определения остаточных напряжений твердых материалов, метод анализа статистических характеристик экспериментальных данных.

Аппаратура исследований: ультразвуковой прибор УК-10ПМ, акустополярископ, нагружающие установки ЦДМ – 100 и ЦДМ – 30.

Полученные результаты и их новизна:

разработана методика определения акустического параметра остаточных напряжений, позволяющая определить наличия или отсутствия, а также знак остаточных напряжений в горных породах; разработан метод определения нового механического показателя – волнового модуля напряжения горных пород, характеризующий их структуры, свойства упругости и пластичности; установлена функциональная взаимосвязь, отражающая закономерность изменения скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от остаточного напряжения в горных породах; разработан поляризационно-акустический метод, позволяющий определять знак и величину остаточных напряжений в горных породах с разными механическими свойствами.

Область применения: разработанные методы ориентированы для определения остаточных напряжений в горных породах удароопасных месторождений полезных ископаемых, сейсмоактивных зон.

RESUME

dissertation of Akmatallieva Minazhat Sabyrovna on a theme: «Substantiation of an ultrasonic method of definition of residual stresses in rocks» on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci., specialty 25.00.20 - «Geomechanics, destruction of rocks by explosion, miner aerogas dynamics and mountain thermal physics»

Keywords: rock, a residual stress, ultrasound, a polarized wave, the wave module of pressure, a polarization vector, a transverse wave.

Subject of researches: rocks of ore fields.

The purpose of research: working out of an ultrasonic method of definition of residual stresses in the rocks, based on application of the transverse polarized waves.

Research methods: methods of definition of acoustical, deformation properties of rocks, polarization-acoustic method of definition of residual stresses of firm materials, a method of the analysis of statistical characteristics of experimental data.

Equipment of researches: ultrasonic device UK-10PM, acoustical polariscope, loading installations ZDM - 100 and ZDM - 30.

The gained results and their novelty:

the technique of definition of acoustical parameter of the residual stresses is developed, allowing to define presence or absence, and also a sign on residual stresses in rocks; the method of definition of a new mechanical parameter - the wave module of pressure of rocks, characterizing their structures, properties of elasticity and plasticity is developed; the functional interconnection reflecting regularity of change of speed of an ultrasonic polarized shift wave from a residual stress in rocks is installed; the polarization-acoustic method is developed, allowing to define a sign and magnitude of residual stresses in rocks with different mechanical properties.

Application area: the developed methods are oriented for definition of residual stresses in rocks dangerous mineral deposits on blows, active region on seismicity.