

ISSN 1694-6065

КОМИТЕТ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ КЫРГЫЗСТАНА
ИНСТИТУТ ГЕОМЕХАНИКИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР
НАН КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ



СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

ВЫПУСК ТРИНАДЦАТЫЙ

Сборник трудов Международной конференции
«Проблемы геомеханики и освоения недр»

посвященная 50-летию Института геомеханики и освоения недр
и 80-летию академика НАН КР И.Т. Айтматова
15-17 июня, 2011 г.

Институт геомеханики и освоения недр
и 80-летие И.Т. Айтматова

национальная научная конференция
с международным участием

ИНСТИТУТ ГЕОМЕХАНИКИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР



INSTITUTE OF GEOMECHANICS AND DEVELOPMENT OF SUBSOIL
2011

БИШКЕК-2011

УДК 531
ББК 22.25
С 66

Утверждено в печати Президиумом Комитета по теоретической и прикладной механике Кыргызстана и Ученым Советом Института геомеханики и освоения недр НАН КР

Рецензенты: доктор физико-матем. наук, Бийбосунов А.И.
доктор технических наук Толобекова Б. Т

Ответственный редактор: К.Ч. Кожогулов, член-корр. НАН КР

Редакционная коллегия:

Бийбосунов Б.И. - доктор физико-матем. наук, профессор;
Никольская О.В. - доктор технических наук;
Туганбаев У.М. - доктор физико-математических наук, проф.;
Орозбекова А.К. - кандидат физико-матем. наук, с.н.с.

С 58 Современные проблемы механики сплошных сред: Вып.13:
Геомеханика массивов горных пород
/Комитет по теорет. и прикл. механике Кыргызстана, Институт
геомеханики и освоения недр НАН КР.-Б.: 2011. - 417с.

ISSN 1694-6065

Материалы сборника включают в себя материалы Международной конференции «Проблемы геомеханики и освоения недр, посвященной 50-летию Института геомеханики и освоения недр НАН КР и 80-летию академика НАН КР И.Т Айтматова.

В сборник включены, материалы планарных докладов, научные статьи, посвященные проблемам геомеханики массивов горных пород, геотехнологии освоения недр, геоэкологии горнопромышленных регионов и опытам разработки высокогорного месторождения Кумтор.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов и инженерно-технических специалистов в области геомеханики, геотехнологии и геоэкологии горнопромышленных регионов.

УДК 531
ББК 22.25

© Комитет по теоретической и прикладной
механике Кыргызстана и Институт геомеханики и
освоения недр НАН КР, 2011

К.Т. ТАЖИБАЕВ, М.С. АКМАТАЛИЕВА, Д.К. ТАЖИБАЕВ

Институт аэромеханики и основания недр НАН КР

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ И ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментальными исследованиями [2] было показано, что разность скоростей ультразвуковых сдвиговых колебаний, поляризованных в двух главных плоскостях, линейно изменяется вплоть до предела текучести материала. В связи с этим авторы данной работы считают, что такие измерения могут быть положены в основу метода определения напряжений.

В работе Гусь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуда О.И. [3] отмечается, что с увеличением растягивающих напряжений скорость волн, поляризованной вдоль напряжений, уменьшается, а скорость волн, поляризованной поперек напряжений, увеличивается. При действии скжимающих напряжений эти зависимости имеют обратный характер. С увеличением сжатия увеличивается скорость волн, поляризованной вдоль напряжений, и уменьшается скорость волн, поляризованной поперек напряжений. Такой характер изменения скоростей поляризованных сдвиговых волн, как утверждают авторы, позволяет по величине этих скоростей судить о напряжениях. Авторы отмечают, что закономерности скорости прохождения малых возмущений через характеристную базу в материалах с начальными остаточными напряжениями (гетерородиациами) определяют основные соотношения, используемые для определения величин и знаков напряжений. Вместе с тем авторы отмечают, что отсутствие единой методики определения констант упругости второго и третьего порядков приводят к большому разбросу получаемых значений этих констант, которые входят в

расчетные формулы определения остаточных напряжений, снижая точность результатов.

В работе О.И. Гуда [4] рассмотрено состояние и перспективы ультразвукового метода определения остаточных напряжений, приведены акустические соотношения напряжений для упругих волн в линейном приближении. По данным автора приведенные соотношения позволяют решить задачу в обратной постановке – по измеренным значениям скоростей распространения упругих волн в твердом теле определить действующие в нем напряжения. Автор отмечает, что в условиях определения остаточных напряжений получить значения начальной скорости волн, соответствующей незатушенному объекту (образцу без остаточных напряжений), прямым измерением не всегда возможно, кроме того, на практике приходится измерять не скорость, а величину, пропорциональную скорости, например время, которое определяется не только действующими напряжениями, но и длиной пути (толщиной). Это начальное время (начальная скорость) может быть определено теоретически из приведенных в данной работе акустических соотношений.

Следует отметить, что при применении вышеуказанного метода для установления констант упругости для условия отсутствия остаточных напряжений необходимо применить аналитическое решение. При применении вышеуказанных подходов для определения напряжений, из-за необходимости определения комплекса характеристик и применения результатов теоретического решения задачи и теоретического определения, входящих в расчетные формулы постоянных величин, точность результатов снижается.

Недостатками известных механических методов определения напряжений путем образования новых поверхностей (методы разгрузки) являются их невысокая точность из-за неполных изменений существующих остаточных напряжений в зависимости от размеров и расположения вновь образованных поверхностей (надрезов, отверстий), ограниченность их применения из-за частичного разрушения конструкций, низкой информативности, и из-за исажений первоначальных напряжений. Основными же недостатками вышеуказанных ультразвуковых методов и способов определения напряжений являются их высокая трудоемкость и низкая точность, из-за выполнения работ по установленнию большого количества труда определениях предварительного проверения дополнительных

исследований механических свойств на напряженных и на не напряженных образцах материала. В ненапряженных винцейной нагрузкой образцах могут иметь место остаточные напряжения, которые искают результаты и требуют дополнительного определения их величины и знака, что не предусмотрено указанными методами.

Нами, в результате исследований изменений времени прохождения поларизованных поперечных волн от остаточных напряжений, были получены формулы, позволяющие определять знак и величину остаточных напряжений по определенным направлениям для определенной базы измерения [1]. Формулы после упрощений имеют следующий вид:

для плоского напряженного состояния

$$\sigma = \frac{T_{\Delta}}{T_{SC}} K \quad \text{или} \quad \sigma = \left(\frac{T_{SC} - T_{S0}}{T_{SC}} \right) K \quad (1).$$

Где σ - нормальное напряжение; K - волновой модуль напряжения материала (название выше), имеющий размерность напряжения; $T_{\Delta} = T_{SP} - T_{SC}$ - разность времени прохождения поперечных поларизованных волн с параллельным и скращенным вектором поляризации; T_{SC}, T_{SP} - время прохождения поларизованной поперечной волны со скращенным и параллельным вектором поляризации соответственно; для определения компонент напряжений

$$\sigma_x = \frac{(T_{SC} - T_{S0Z})}{T_{S0Z}} K_z; \quad \sigma_y = \frac{(T_{SC} - T_{S0X})}{T_{S0X}} K_x; \quad (2).$$

где σ_x, σ_y - нормальные напряжения по направлениям X, Y , K - волновой модуль напряжения по направлению Z .

$$\sigma_x = \left(\frac{V_{S0Z} - V_{S0X}}{V_{S0Z}} - 1 \right) K_z; \quad \sigma_y = \left(\frac{V_{S0X} - V_{S0Y}}{V_{S0X}} - 1 \right) K_x; \quad (3).$$

Для изотропных материалов $K_x = K_y = K_z = K$. Для анизотропных (стекольных, кристаллических, анизотропных) материалов значение волнового модуля напряжения K определяется по соответствующим направлениям.

Значение K определяется из опытов прозвучивания при нагружении и разгрузке образцов. Проводится по 5-10 определений значений K при нагружении и разгрузке образца представительного объема исследуемого материала. Значение K как характеристика материала определяется как среднее из 10-20 единичных значений, полученных при прозвучивании в процессе нагружения и разгрузки образца материала. Следует отметить, что величину K необходимо определять для характерного, то есть представительного объема, так как данный модуль зависит от структуры и вещественного состава материала. В связи с этим для определения величины K предлагаю следующие размеры призматического образца 5х5х10 см., 7х7х14 см.

путь, пройденный волной, невозможно точно определить. На практике часто используются скорости прохождения волн. Замена базой прозвучивания, пройденной волной истинного пути в постоянных материалах, не приводят к существенным ошибкам, и к тому же в формулу определения напряжений входит отношение определяющих величин, то есть относительные величины времени. Поэтому для решения инженерных задач указанная выше замена и использования скорости прохождения волн, определяемого на основе измерения времени прохождения волн через определенную базу прозвучивания вполне приемлема. Поэтому наряду с формулой 2 можно применять следующую формулу, выраженную через скорости прохождения волн.

Одним из признаков отсутствия остаточных напряжений в однородных технических материалах и квазизеротных горных породах является равенства времени прохождения волн во взаимно перпендикулярных направлениях в разных участках, то есть $\tau_{3x} = \tau_{3y}$ или $\tau_{xy} = 0$ (см. рис. 1 и зависимость 2 рисунка 3). Как видно из рисунков 1 и 3, в образце, где остаточные напряжения были выведены путем деформирования за пределами упругости (рис. 1), ультразвуковой параметр - разность времени прохождения взаимно перпендикулярных поларизованных поперечных волн практически во всех рассматриваемых плоскостях призматического образца (5х5х10 см) практически равно нулю (рис. 3 зависимость 2). А в образце с остаточными напряжениями (рис. 2) разность времени прохождения взаимно перпендикулярных поларизованных поперечных волн в рассматриваемых плоскостях призматического образца (5х5х10 см) изменяется существенно и изменяется в соответствии с картиной изюром остаточных напряжений (рис. 2, зависимость 1 рисунок 3).

Из формулы 1 и результатов экспериментальных исследований следует, что знак остаточных напряжений для плоского напряженного состояния зависит от разности времени прохождения взаимно перпендикулярных поларизованных поперечных волн, то есть от $\Delta\tau = \tau_{3x} - \tau_{3y}$. Например, как видно из рисунков 1; 2; 3, в указанных образцах разность времени прохождения взаимно перпендикулярных поларизованных поперечных волн по направлению оси определена изменяется в соответствии с картиной изюром остаточных напряжений. Данные экспериментальные результаты свидетельствуют о согласованности данных ультразвукового неразрушающего метода с данными известного метода фотопропусткости.

Прозумчива по направлениям Z, Y, X с помощью поларизованных поперечных волн можно определить по перпендикулярным к указанным направлениям нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и главные нормальные и касательные напряжения по соответствующим плоскостям.



Рис. 1. Образец №5 (призма, ЭД-6) без остаточных напряжений, после пластической деформации в поларизованном свете (бочкаобразование).



Рис. 2. Образец №9 (призма, ЭД-6) с остаточными напряжениями.

График разности времени прохождения взаимно перпендикулярных поперечных волн в зависимости от времени прохождения

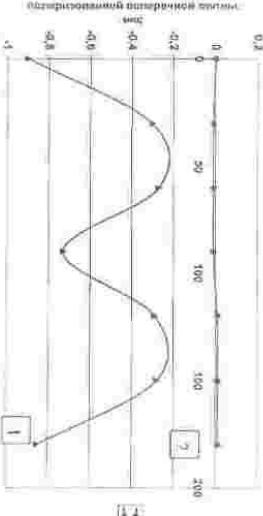


Рис. 3. Графики разности времени прохождения взаимно перпендикулярных поларизованных поперечных волн по разным направлениям по соответствующим плоскостям.

направлениям (1- для образца №9 с остаточными напряжениями, 2 – для образца №5 без остаточных напряжений).

Для определения касательных напряжений определяются главные нормальные напряжения для каждой взаимно перпендикулярной поверхности путем поворота излучателя и приемника поляризованных поперечных волн акустополарископа. Акустополарископ описан в работе Ф.Ф. Горбачевича [5].

Положение и величина главных нормальных напряжений определяется по результатам проверки через каждый 1° или 10° от нуля до 180° для параллельного и скрещенного состояния преобразователей [6]. Следует отметить, что величины определяемых предлагаемым методом напряжений представляют собой средние значения нормального остаточного напряжения для заданной базы проверки.

Экспериментальными исследованиями напряжений при ступенчатом нагружении приматических образцов разных материалов одновременным сжатием и при измерении времени прохождения поперечных полипризованных волн в процессе нагружения установлено, что для ряда твердых материалов с разными вещественными составами и структурой, волновой модуль напряжения K имеет следующие значения: для отверженной эпоксидной смолы ЭД-б $K = 4552,8$ МПа; для статьи 3 $K=43023,1$ МПа; для мрамора (Токтогул) $K=1132,11$ МПа; для гнейса (Жети-Огуз) $K=2113,12$ МПа. После установления входящих в формулу характеристик остаточные напряжения определяются по формуле 1.2 или 3. Знак остаточных напряжений (растяивающий – положительный, скрывающий – отрицательный) определяется, например, для направления X перпендикулярной к направлению Z , в соответствии со знаком величины

$$T_{xz} = T_{yz} - T_{xz}$$

Дальнейшая задача заключалась в проверке применимости формул 2 и 3 для определения не только остаточных но и действующих напряжений. Для проверки применимости установленной закономерности изменения скорости прохождения полипризованных поперечных волн от напряжений для различных материалов с разноотличающимися механическими свойствами и для определения не

изменения скорости прохождения полипризованных волн через прямые симметричные образцы отверженной смолы ЭД-б, статьи 3, мрамора (Токтогул) и гнейса (Жети-Огуз) при статической сжатии.

Размеры приам. ширина 7 см., толщина 2 см., высота 14 см. Нагружение образцов проводилось ступенчато – через каждый 136 кгс (1333,7 Н) с помощью установки БУ-39 для малых нагрузок – до 2 тонны, и 30 тонного гидравлического пресса – через каждый 1500 кгс (14709,9 Н). Нагружение для образца сталь 3 проводилось до 9000 кгс (88259,4 Н). При каждой ступени нагрузки измерялись время и скорость прохождения полипризованной поперечной волны. Измерение времени прохождения продольных и полипризованных поперечных волн проводилось с использованием ультразвукового прибора УК-10 ПМ. Точность измерения времени прохождения волн по данным прибора УК-10 ГМ составляет $\pm 0,001$ мк. секунд (10^{-9} секунд). Частота поперечных (сдвиговых) колебаний 60000 Гц.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований и данные сплошного значений действующих напряжений, определяемых прямым экспериментальным методом (рисунки 4, 5, 7, 8), и по формуле 3 отражаящий закономерность изменения скорости прохождения полипризованных поперечных волн от напряжений (рисунки 4, 6, 7, 8). Из рисунков 4, 5, 6 видно, что для таких материалов, как отверженная эпоксидная смола ЭД-б и сталь 3, расчетно-экспериментальные ультразвуковые значения напряжений практически совпадают с данными напряжений полученных прямым измерением по данным сканометра нагрузжающего устройства (БУ-39 и 30 тонный пресс). Для мрамора (Токтогул) и гнейса (Жети-Огуз) расчетно-экспериментальные ультразвуковые значения напряжений в Абсолютной Мере согласуются с данными напряжений полученных прямым измерением по данным сканометра нагрузжающего устройства (рисунок 7, 8). Следует отметить, что хорошее соответствование расчетно-экспериментальных ультразвуковых значений напряжений, с данными напряжений полученных прямым измерением по данным сканометра нагрузжающего устройства прослеживается также и при разрушении образцов коследованных материалов.

Зависимость напряжения образца от нагрузки при одностороннем сжатии (диаметр прутка, нагружение, 1-го спирального, 2-го спирального поликристаллической стали ферроуглеродистой)

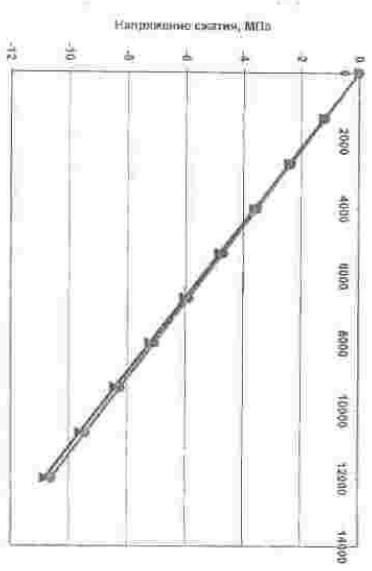


Рис. 4 Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения от нагрузки

Зависимость напряжения образца от нагрузки при одностороннем сжатии (сталь 3, пруток, нагружение, 1-го спирального, 2-го спирального поликристаллической стали ферроуглеродистой)

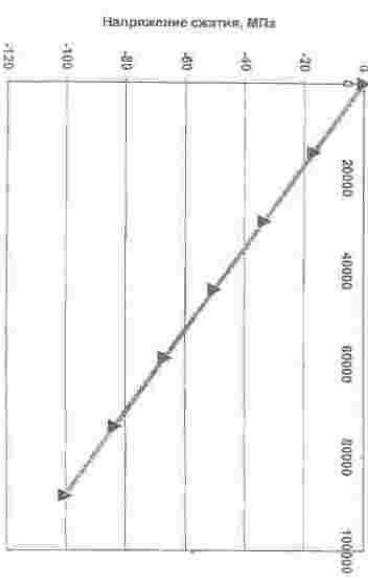


Рис. 6 Ультразвуковая зависимость напряжения от нагрузки
Зависимость напряжения образца от нагрузки при одностороннем сжатии (сталь 3, пруток, нагружение, 1-го спирального, 2-го спирального поликристаллической стали ферроуглеродистой)

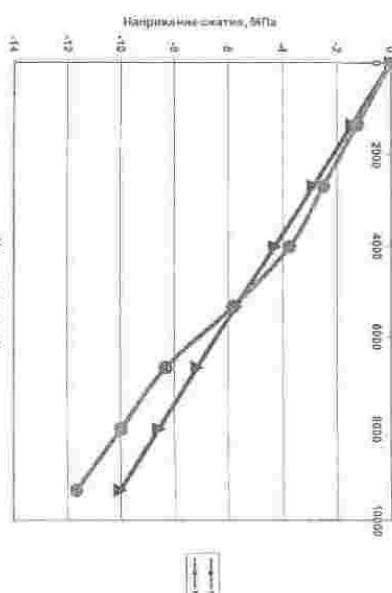


Рис. 7 Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения от нагрузки

Рис. 5 Экспериментальная зависимость напряжения от нагрузки.

Зависимость напряжения образца от нагрузки при одностороннем сжатии (сталь 3, пруток, нагружение, 1-го спирального, 2-го спирального поликристаллической стали ферроуглеродистой)



Рис. 5 Экспериментальная зависимость напряжения от нагрузки

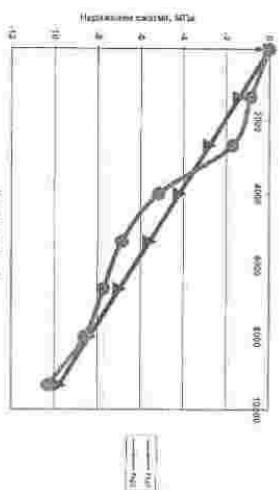


Рис. 8 Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения от нагрузки.

Предложенным методом, основанным на установленной закономерности изменения скорости прохождения поляризованной поперечной волны от напряжений можно определять и контролировать действие напряжения в цепиках и стенах горных выработок в квазидиородных горных породах, а также и в твердых конструкциях, состоящих из однородных технических материалов. При этом необходимо решить технические вопросы образования гладких поверхностей в цепиках и стенах горных выработок для установления излучателя и приемника волн; дальнейшее исследование в данном направлении необходимо проводить в анизотропных стенах и трещиноватых горных породах. Сложенная или трещиноватая порода будет иметь свой волновой модуль напряжения K , так как данный модуль в значительной мере зависит от структуры материала. Например, значение данного модуля вдоль стволости горной породы будет больше, чем поперек слоистости и напряжения в таких анизотропных горных породах могут быть определены с учетом их структуры и текстуры. Поскольку в формулу определения напряжений входит относительные величины скорости (времени) прохождения поляризованных поперечных волн и база измерения в пабораторных и натурных опыта сильно не отличаются между собой, измерение напряжений в массиве горных пород данным методом представляется возможным после решения указанной выше технической задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тажибайев К.Т. Закон изменения времени прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений в твердых средах. Известия НАН КР №3, 2010 г. – с. 36-44.
2. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуша О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового ненарушенного метода определения напряжений в твердых телах. Киев, "Наукова Думка", 1974. 108 с.
3. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуша О.И. Введение в акустоупругость. К., "Наукова Думка", 1977. 152 с.
4. Гуша О.И. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений. Состояния и перспективы //Экспер. Методы исследований деформаций и напряжений. – Киев, 1983. – С. 77-81.
5. Горбачев Ф.Ф. Акустополяризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Алматы: Кольский Научный Центр РАН, 1985. – 30с.
6. Тажибаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Способ определения остаточных напряжений в твердых материалах. / Патент № 1245 КР от 26 февраля 2010 года.