

К.Т. Тажибаев, Д.К. Тажибаев

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ И ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Установлена закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от изменения механического напряжения в твердых материалах. Закономерность заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах, в том числе в горных породах, приводит к пропорциональному, в зависимости от величины установленной новой характеристики твердого материала – волнового модуля напряжения – K , изменению относительной величины скорости прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны в направлении перпендикулярном к направлению действия напряжения. Изменение относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны, с вектором поляризации, совпадающим с направлением напряжения, обусловлено тем, что изменение напряжения в направлении перпендикулярном к направлению прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны вызывает деформацию материала. Получены формулы, позволяющие определять знак и величину действующих и остаточных напряжений в твердых материалах по определенным направлениям для определенной базы измерения (Закон Кушбакали). На основе установленной закономерности изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от изменения механического напряжения разработан метод определения остаточных и действующих напряжений в горных породах. Приведены примеры определения действующих и остаточных напряжений.

Ключевые слова: горная порода, действующее напряжение, деформация, поляризованная сдвиговая волна, остаточное напряжение, скорость волны, модуль напряжения, вектор поляризации.

В работе А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт, О.И. Гуша [2] отмечается, что с увеличением растягивающих напряжений скорость волны, поляризованной вдоль напряжений, уменьшается, а скорость волны, поляризованной поперек напряжений, увеличивается. При действии сжимающих напряжений эти зависимости имеют обратный характер. С увеличением сжатия увеличивается скорость волны, поляризованной вдоль напряжений, и уменьшается скорость волны, 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 характерную базу в материалах с начальными остаточными напряжениями (деформациями) 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 приводит к большому разбросу получаемых значений этих констант, которые входят в расчетные формулы определения остаточных напряжений, снижая точность результатов.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследова-

ний [3] 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 О.И. Гуша [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 волны, соответствующей незагруженному 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 (толщины). 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 искажений первоначальных напряжений. Основными 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, предварительного проведения дополнительных исследований механических свойств на напряженных и на не напряженных образцах материала. В ненапряженных внешней нагрузкой образцах могут иметь место остаточные напряжения, которые искажают результаты и требуют дополнительного определения их величины и знака, что не предусмотрено указанными методами.

Нами, в результате исследования скорости поляризованных поперечных волн при разных напряжениях, была установлена закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от изменения механического напряжения в твердых материалах. Закономерность заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах, в том числе в горных породах, приводит к пропорциональному, в зависимости от величины установленной новой характеристики твердого материала

ла – волнового модуля напряжения – K , изменению относительной величины скорости прохождения ультразвуковой сдвиговой поляризованной волны в направлении перпендикулярном к направлению действия напряжения. Получены формулы, позволяющие определять знак и величину действующих и остаточных напряжений в твердых материалах по определенным направлениям для определенной базы измерения (Закон Кушбакали) [1, 7]. Формула имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_X &= \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) K_Z; \\ \sigma_Y &= \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) K_X; \\ \sigma_Z &= \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) K_Y\end{aligned}\quad (1),$$

где V_{SX} , V_{SY} , V_{SZ} – скорости прохождения поперечной поляризованной ультразвуковой волны по X , Y , Z соответственно; V_{SOX} , V_{SOY} , V_{SOZ} – скорости прохождения поперечной поляризованной волны по X , Y , Z при отсутствии напряжения (не нагруженное состояние, без остаточных напряжений); K – волновой модуль напряжения материала (название модуля наше), имеющий размерность напряжения.

Введем обозначение

$$\begin{aligned}\omega_Z &= \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right); \quad \omega_X = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right); \\ \omega_Y &= \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right),\end{aligned}$$

тогда из формулы 1

$$\sigma_X = \omega_Z K_Z; \quad \sigma_Y = \omega_X K_X; \quad \sigma_Z = \omega_Y K_Y,$$

отсюда

$$K_X = \frac{\sigma_Y}{\omega_X}; \quad K_Y = \frac{\sigma_Z}{\omega_Y}; \quad K_Z = \frac{\sigma_X}{\omega_Z}\quad (2).$$

Для изотропных материалов $K_X = K_Y = K_Z = K$. Для анизотропных (слоистых, кристаллических анизотропных) материалов значение волнового модуля напряжения K определяется по соответствующим направлениям.

Значение K определяется из опытов прозвучивания при нагружениях 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 прозвучивания в процессе нагружения и разгрузке 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 предлагаем следующие размеры призматического образца $5 \times 5 \times 10$ см; $7 \times 7 \times 14$ см.

Экспериментальное определение волнового модуля напряжения материала (K) проводится в следующей последовательности:

1. На боковую грань призмы, с размерами указанной выше, в средней части устанавливается излучатель и приемник сдвиговой волны, совместив их вектора поляризации между собой и с направлением сжимающего напряжения (σ_Z);

2. Измеряется скорость ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны при отсутствии нагрузки (напряжения) – V_{SOY} ;

3. Ступенчато гидравлическим прессом нагружается призма и на каждой ступени одноосно сжимающей нагрузки (через каждый 1000 или 2000 кГс нагрузки) определяется скорость поляризованной сдвиговой волны – V_{SY} ;

4. Для каждой ступени нагрузки определяется напряжение σ_Z , разде-

лив нагрузку (по силоизмерителю прессы) на площадь поперечного сечения призмы;

5. По формуле (2) определяются значения волнового модуля напряжения K и среднее значение принимается для дальнейших расчетов.

Измерения скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны и определения значений K можно проводить также и при разгрузке.

При известном значении волнового модуля напряжения, измерив скорости сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны можно определять остаточные и действующие напряжения по формуле (1). Следует отметить, что действующее напряжение может включать в себе и остаточные напряжения (при их наличии, например, в породном массиве). В связи с этим остаточные напряжения, при необходимости, определяются отдельно в свободных от внешней нагрузки представительных кусках горной породы, отобранных из места измерения скорости волны в породном массиве. Обычно остаточные напряжения определяются в лабораторных условиях.

Действующее в породном массиве напряжение определяется по следующей методике:

1. Создаются в породном массиве гладкие параллельные к заданной оси, например к оси Z (вертикальное направление) две поверхности с расстоянием между ними 7 см (база прозвучивания) путем образования щелей (для размещения преобразователей сдвиговых волн);

2. Очищаются, высушиваются поверхности и наносится тонкий слой контактной среды (полисахариды, искусственный мед) на гладкие поверхности породы, а также и преобразователей, после чего преобразователи с векторами поляризации направленными по заданной оси (Z) слегка прижимаются (постоянной силой) к гладкой поверхности породы;

3. Преобразователи подсоединяются к ультразвуковому прибору (УК-10ПМ) и после прогрева прибора в течение 20 минут не менее 10 раз снимается отсчет времени прохождения сдвиговой волны через заданную базу (7 см) в автоматическом режиме и при точности измерения времени $\pm 0,01$ мкс, и по средней величине времени определяется скорость поляризованной сдвиговой ультразвуковой волны;

4. При проведении контроля напряжения (в случае существенного изменения напряжения вследствие быстрого продвижения очистного забоя влияющего на напряженное состояние) прибор и преобразователи оставляются на период времени контроля и периодически проводятся измерения времени прохождения сдвиговых волн по пункту 3;

5. В случае определения действующего напряжения после измерения времени прохождения сдвиговых волн по пункту 3 преобразователи снимаются, и вырезается часть породного массива (кусок) с размерами $7 \times 7 \times 15$ см в том же месте, где проводился измерение времени прохождения сдвиговой волны, сохранив базу прозвучивания (7 см);

6. Из отобранного куска изготавливается призма с размерами $7 \times 7 \times 14$ см.

Для данной призмы определяется волновой модуль напряжения K по указанной выше последовательности, прозвучивая поляризованной сдвиговой волной при разных уровнях нагрузки сжатия по заданной, то есть именно по той базе (7 см), по которой проводился прозвучивания в породном массиве.

7. На основе скорости поляризованной сдвиговой волны, измеренной в породном массиве и значения волнового модуля напряжения K , а также скорости поляризованной сдвиговой волны для не нагруженного состояния,

определяется, например, вертикальная составляющая нормального напряжения породного массива σ_z формуле (1). Так же определяются и другие составляющие напряжения и по другим направлениям.

Для определения остаточных напряжений в горной породе, измерения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны в кубическом образце с размерами $7 \times 7 \times 7$ см, свободном от внешней нагрузки, необходимо проводить в следующей последовательности.

1. Пропуская ультразвук по направлениям через каждый 1° или 10° от нуля до 180° , поворачивая излучатель и приемник акустополярископа [5], определяются значения скорости прохождения поляризованной сдвиговой волны V_{SI} для параллельного и перпендикулярного (к рассматриваемому направлению) вектора поляризации для каждого направления по трем ортогональным плоскостям.

2. По признаку равенства времени или скорости прохождения параллельных V_{SP} и перпендикулярных V_{SC} сдвиговых поляризованных волн для заданной базы прозвучивания определяется скорость прохождения сдвиговой волны для случая отсутствия остаточных напряжений – V_{SOI} (один из признаков отсутствия остаточных напряжений – $V_{SP} = V_{SC}$).

3. В случае не обнаружения направления или участка без остаточных напряжений фиксируется все значения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны по всем вышеуказанным направлениям и по трем ортогональным плоскостям, а затем полностью выводятся (устраняются) из образца остаточные напряжения известными методами (отжиг, импульсное многократное нагружение [6]).

4. Определяется скорость ультразвуковой сдвиговой поляризованной

волны для образца без остаточных напряжений (после снятия остаточных напряжений) – V_{SOI} и среднее значение волнового модуля напряжения K по вышеуказанной последовательности.

5. На основе значений скоростей волн для разных направлений и плоскостей, а также значения скорости для не нагруженного состояния V_{SOI} и среднего значения волнового модуля напряжения определяются по формуле (1) значения остаточных напряжений.

Пропуская ультразвук по направлениям Z, Y, X , а именно ультразвуковых поляризованных сдвиговых волн можно определить по ортогональным к указанным направлениям нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и главные нормальные напряжения по соответствующим плоскостям путем поворота излучателя и приемника поляризованной сдвиговой волны через каждый 1° или 10° от нуля до 180° , синхронно поворачивая излучатель и приемник акустополярископа. После определения главных нормальных (максимальных и минимальных) напряжений можно определить и максимальное касательное напряжение.

Ниже приведены результаты определения остаточных и действующих напряжений предложенным поляризационно-акустическим методом, основанным на закономерности изменения относительной величины скорости поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения. Следует отметить, что выявление указанной закономерности и разработка поляризационно-акустического метода стали возможными благодаря разработкам Ф.Ф. Горбачевича: акустополярископа, излучателей и приемников сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны [5]. На рис. 1 в качестве примера представлены результаты определения остаточных напряжений в образце метасамотита месторождения

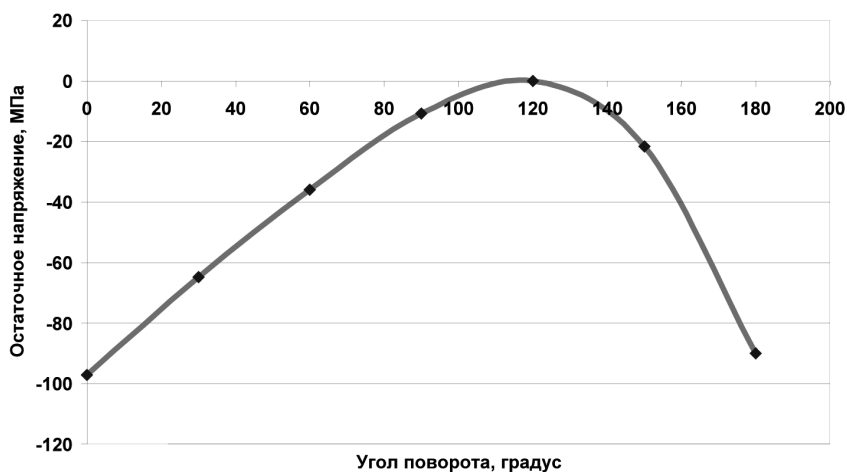


Рис. 1. Значения остаточных напряжений образца метасоматита (по одной плоскости, рудник Кумтор, проба RS № 5, обр. 3-4)

Кумтор (размер 11,2×7,27×3,43 см, база прозвучивания 7,27 см).

Нами в качестве модели остаточных напряжений, образованных при неравномерном остывании расплавленного материала исследовались сварочные остаточные напряжения. Была изготовлена стальная плита (размеры: 220×245×20 мм) со сварным швом в центральной части. Результаты определения сварочных остаточных напря-

жений по формуле (1) представлен на рис. 2.

Результаты исследований остаточных напряжений в стальной плите со сварным швом поляризационно-оптическим методом показали, что в зоне и вблизи сварочного шва имеются значительные растягивающие остаточные напряжения. С удалением от сварочного шва растягивающее остаточное напряжение уменьшается и переходит в

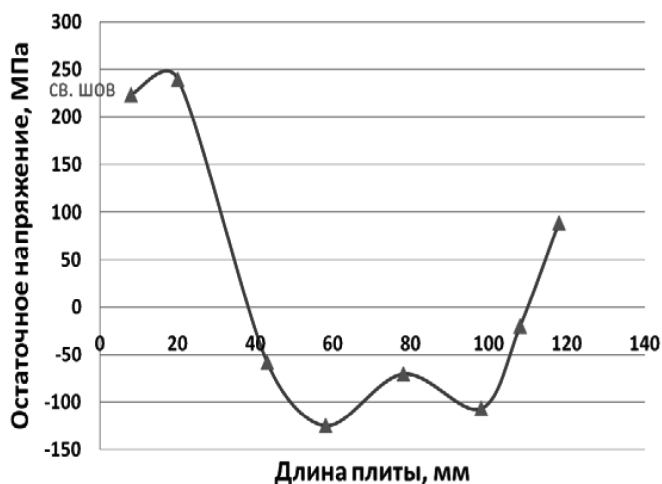


Рис. 2. График остаточного напряжения в правой от сварного шва части стальной плиты

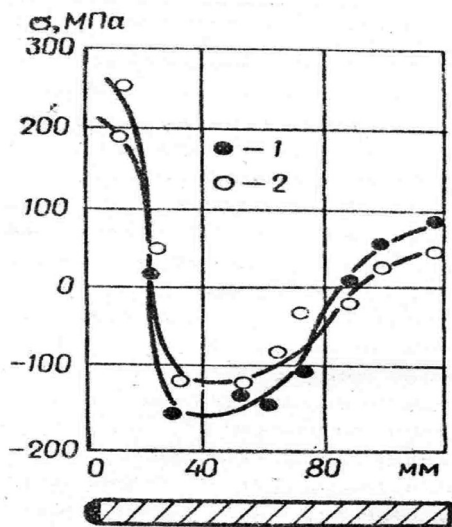


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений в образце с наплавкой, измеренных ультразвуком (1) и методом разгрузки (2); сталь 09Г2С (Институт сварки имени Е.О. Патона [2])

сжимающее, причем тоже далее уменьшается с удалением от шва и с приближением к свободной боковой поверхности, а вблизи свободной поверхности наблюдается снова растягивающее напряжение (рис. 2). Результаты определения сварочных остаточных напряжений полученные путем прозвучивания поляризованной поперечной (сдвиг-

вой) волной и на основе установленной закономерности хорошо согласуется с данными сварочных остаточных напряжений полученными в Институте электросварки им. Е.О. Патона [2] методом разгрузки, а также ультразвукового прозвучивания и теоретических расчетов (рис. 3).

Ниже приводятся также результаты сравнения значений фактического напряжения σ_z , определяемые прямыми экспериментальными измерениями нагружающего устройства, со значениями полученными по формуле (1). Для тонкозернистого мрамора (Токтогул) ультразвуковые значения напряжения, полученные по формуле (1), хорошо согласуются со значениями напряжений полученных прямым измерением по измерителю силы прессы (рис. 4).

Следует отметить, что величины напряжений, определяемых на основе формулы (1), представляют собой средние (результатирующие) значения напряжения для заданных баз прозвучивания.

Дальнейшие исследования в данном направлении необходимо проводить в анизотропных слоистых и трещиноватых горных породах. Слоистая или трещиноватая порода имеет свой волновой модуль напряжения K , так

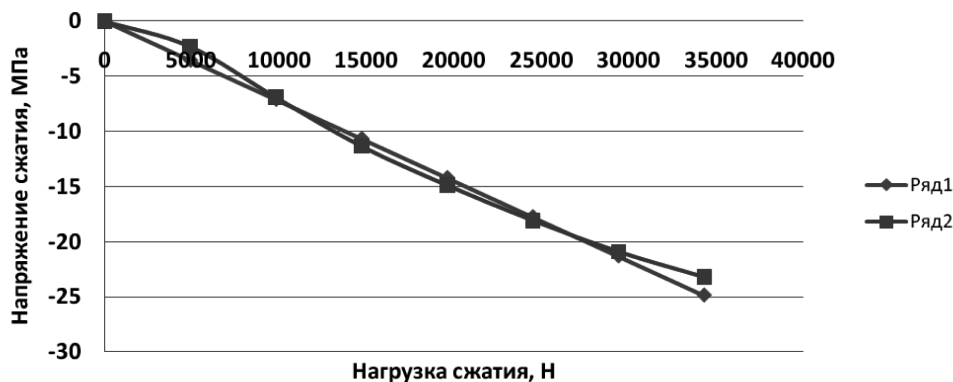


Рис. 4. Графики вертикальной компоненты напряжения σ_z (1 - по силоизмерителю, 2 - по формуле 1, нагружение, тонкозернистый мрамор, Токтогул, образец 1-5)

как данный модуль зависит от структуры материала. Например, значение данного модуля вдоль слоистости горной породы будет больше чем поперек слоистости и напряжения в таких анизотропных горных породах могут быть определены с учетом их структуры и текстуры.

Предложенным методом, основанным на установленной закономерности изменения скорости прохождения поляризованной поперечной волны от напряжений можно определять и контролировать действующие напряжения в целиках и стенках горных выработок в квазиоднородных горных породах, а также и в твердых конструкциях, состоящих из однородных технических

материалов. При этом необходимо решить технические задачи образования гладких поверхностей в целиках и стенках горных выработок для установления излучателя и приемника волн, определения и контролирования компонент напряжений по соответствующим направлениям. Поскольку в формулу определения напряжений входят относительные величины скорости (времени) прохождения поляризованных поперечных волн и база измерения в лабораторных и натуральных опытах не отличаются между собой, измерение напряжений в массиве горных пород данным методом представляется возможным после решения указанных выше технических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тажибаев К.Т. Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – т. 11. – № 11. – С. 151–156.
2. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуша О.И. Введение в акустоупругость. – К.: Наукова думка, 1977. – 152 с.
3. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуша О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – К.: Наукова думка, 1974. 108 с.
4. Гуша О.И. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений. Состояния и перспективы / Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений. – К., 1983. – С. 77–81.

5. Горбачевич Ф.Ф. Акустополаризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Апатиты: КНЦ РАН, 1985. – 30 с.
6. Тажибаев К.Т., Ташмаматов А.С. Способ определения остаточных напряжений в горных породах. Патент Кыргызской Республики: № 658, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Кыргызской Республики 31.03. 2004.
7. Тажибаев К.Т., Тажибаев Д.К., Акматалиева М.С. Закономерность изменения относительной величины скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах (закон Кушбакали). Диплом № 453 на научное открытие от 3 октября 2013 года, г. Москва. Международная академия авторов научных открытий и изобретений, Российская академия естественных наук. **ПАТЕНТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тажибаев Кушбакали Тажибаевич – доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: kushbak@yandex.ru,
Тажибаев Данияр Кушбакалиевич – кандидат технических наук, зав. лабораторией, e-mail: dantaji@rambler.ru,
Институт геомеханики и освоения недр НАН КР,
Кыргызская Республика, Бишкек.

POLARISATION-ACOUSTIC METHOD OF DEFINITION OF THE RESIDUAL AND ACTING STRESSES OF ROCKS

Tazhibayev K.T.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Laboratory, e-mail: kushbak@yandex.ru,

Tazhibayev D.K.¹, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory,
e-mail: dantaji@rambler.ru,

¹ Institute of Geomechanics and Development of Bowels
of National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic,
720052, Bishkek, Kyrgyz Republic.

The law of change of a relative rate of speed of passage of the ultrasonic polarized shift wave from change of mechanical stress in firm materials is installed. The law consists that change of mechanical stress in firm materials, including in rocks, leads proportional, depending on magnitude of the installed new characteristic of a firm material – the wave module of stress – K , to change of a relative rate of speed of passage of an ultrasonic shift polarized wave in a direction perpendicular to a direction of act of stress. Change of a relative rate of speed of passage of the ultrasonic polarized shift wave, with the vector of polarization coinciding with a direction of stress, is caused by that stress excursion in a direction perpendicular to a direction of passage of an ultrasonic shift polarized wave calls material deformation. The formulas are gained, allowing to define a sign and magnitude acting and residual stresses in firm materials in certain directions for certain baseline of measurement (Law of Kushbakali). On the basis of the installed Law of change of a relative rate of speed of passage of the ultrasonic polarised shift wave from change of mechanical stress the method of definition of the residual and acting stresses in rocks is developed. Instances of definition acting and residual stresses are resulted.

Key words: rock, acting stress, deformation, polarized shift wave, residual stress, speed of the wave, the stress module, polarization vector.

REFERENCES

1. Tazhibayev K.T. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*. 2011, vol. 11, no 11, pp. 151–156.
2. Guz' A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I. *Vvedenie v akoustoprugost'* (Introduction to acousto-elasticity), Kiev, Naukova dumka, 1977, 152 p.
3. Guz' A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I., Lebedev V.K. *Osnovy ul'trazvukovogo nerazrushayushchego metoda opredeleniya napryazheniy v tverdykh telakh* (Principles of ultrasonic non-destructive stress test for solids), Kiev, Naukova dumka, 1974, 108 p.
4. Gushcha O.I. *Eksperimental'nye metody issledovaniy deformatsiy i napryazheniy* (Experimental procedures of strain and stress analysis), Kiev, 1983, pp. 77–81.
5. Gorbatshevich F.F. *Akustopolyarizatsionnye izmereniya kharakteristik anizotropii gornykh porod* (Acousto-polarization measurements of rock anisotropy characteristics), Apatity, KNTs RAN, 1985, 30 p.
6. Tazhibayev K.T., Tashmamatov A.S. *Patent of Kyrgyz Republic 658*, 31.03.2004.
7. Tazhibayev K.T., Tazhibayev D.K., Akmataliyeva M.S. *Zakonomernost' izmeneniya odnositel'noy velichiny skorosti prokhozheniya ul'trazvukovoy polyarizovannoy sdvigovoy volny ot mekhanicheskogo napryazheniya v tverdykh materialakh (zakon Kushbakali)* (Mechanism of change in relative value of ultrasonic polarized rotational wave subject to mechanical stress in solid materials (Kushbakali law)), Diploma No. 453 on scientific discovery from 3.10.2013, Moscow. International Academy of Authors of Scientific Discoveries and Inventions, Russian Academy of Natural Sciences.



У хорошего лектора студенты вопросов не задают.