

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ И ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ

Тажибаяев К.

ИГиОН НАН КР, Бишкек, Кыргызстан, kushbak@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены основные теоретические положения механики деформируемого твердого тела.

Ключевые слова: Материалы однородные и сплошные, ультразвуковая поляризованная сдвиговая волна.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BASES OF THE POLARIZATION-ACOUSTIC METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL AND EXISTING STRESSES IN SOLID MATERIALS

Tazhibayev K.

Institute of geomechanics and subsoil development of the NAS KR, Bishkek, Kyrgyzstan

Abstract: The main theoretical positions of the mechanics of a deformed solid are considered.

Key words: Materials are homogeneous and continuous, ultrasonic polarized shear wave.

Известно, что инженерные расчеты прочности деталей, механизмов, устойчивости сооружений, конструкций твердых материалов проводятся на основе определения величин и знака действующих на момент расчета напряжений, в том числе и остаточных (при наличии генетических, или технологических, наведенных, сварочных). Парадоксально, но факт, что напряжения, особенно остаточные, экспериментально (методы полной и частичной разгрузки, рентгеноскопии, голографической интерферометрии и т.д.) определяются в весьма редких случаях. Обычно ограничиваются расчетами этих напряжений на основе закона Гука и теоретических положений классической механики деформируемого твердого тела.

Основные теоретические положения механики деформируемого твердого тела выведены на основе предположения о том, что твердые материалы однородные и сплошные (континуум), тогда как объективно, в реальности многие твердые материалы (горные породы, композитные, строительные и др.) неоднородные и дискретно связанные, имеют нарушения сплошности различного масштабного уровня [11].

Численные и аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния твердых материалов могут дать близкие к реальности данные только для ограниченного количества однородных и плотных твердых материалов. Обычно, только в исключительно редких случаях теоретические данные проверяются экспериментальными измерениями напряжений. Это, прежде всего, связано с трудоемкостью экспериментального определения напряжений существующими методами, которые имеют свои недостатки. Например, несмотря на высокую точность, метод рентгеноскопии позволяет определять напряжения только вблизи поверхности, так как рентгеновские лучи в твердых материалах могут проникать на не большие глубины (мм., см.), поляризационно-оптический метод применим только для прозрачных материалов, методы разгрузки, голографической интерферометрии и др. весьма трудоемкие. В связи с этим в последнее время интенсивно исследовались возможности определения напряжений, в том числе остаточных, на основе применения поляризованной поперечной (сдвиговой) ультразвуковой волны и теоретических расчетов. Основными недостатками предлагаемых ультразвуковых способов и подходов по определению остаточных и действующих напряжений [3,4,5] 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 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 подходами.

Нами в результате экспериментальных исследований скорости поляризованных волн при разных уровнях нагрузки, была установлена закономерность изменения относительной величины скорости ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны от механического напряжения в твердых материалах [6,7]. Закономерность заключается в том, что изменение механического напряжения в твердых материалах приводит к пропорциональному, в зависимости от величины волнового модуля напряжения – K , изменению относительной величины скорости 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 [6,7]. Формула имеет следующий вид:

$$\sigma_X = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right) K_Z \quad \sigma_Y = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right) K_X$$

$$\sigma_Z = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right) K_Y \quad (1),$$

где V_{SX} , V_{SY} , V_{SZ} – скорости поперечной поляризованной ультразвуковой волны по направлению X, Y, Z соответственно; V_{SOX} , V_{SOY} , V_{SOZ} – скорости 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 $\omega_Z = \left(\frac{V_{SOZ}}{V_{SZ}} - 1 \right)$ $\omega_X = \left(\frac{V_{SOX}}{V_{SX}} - 1 \right)$ $\omega_Y = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1 \right)$,

тогда из формулы $\sigma_X = \omega_Z K_Z$ $\sigma_Y = \omega_X K_X$ $\sigma_Z = \omega_Y K_Y$, 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 в процессе нагружения и разгрузки образцов. Проводится по 10-20 определений значений K при нагружении и разгрузке образца представительного объема исследуемого материала. Значение K как характеристика материала определяется как среднее из единичных значений. 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 7x7x14 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 поляри-

зации 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 , разделив 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.

На основе установленной закономерности изменений относительной величины скорости поперечной (сдвиговой) поляризованной волны от механического напряжения нами разработан поляризационно-акустический метод определения напряжений в горных породах. Метод был назван поляризационно-акустическим в связи с использованием поляризованной поперечной ультразвуковой волны. Сущность метода заключается в определении механических напряжений в зависимости от изменений относительной величины скорости поперечной поляризованной волны при разных значениях этих напряжений.

Действующее в породном массиве напряжение определяется по следующей последовательности [8] (рисунок 1):

1. Создаются в горной выработке 1 (в целике) пройденном в породном массиве два гладкие параллельные к заданной оси, например к оси Z (вертикальное направление) поверхности с расстоянием между ними 7-10 см (L-база прозвучивания) путем образования щелей 2 для размещения преобразователей сдвиговых волн: излучателя - И, приемника - П;

2. Очищаются, высушиваются поверхности щелей и наносятся тонкий слой контактной среды (полисахариды) на торцевой поверхности преобразователей. Излучатель – И, а также приемник – П ультразвуковой поляризованной сдвиговой (поперечной) волны располагаются в щели с помощью досылника 6, после чего преобразователи с векторами поляризации направленными по заданной оси (Z) слегка прижимаются к гладкой поверхности щели (постоянной силой) с помощью воздушной подушки 3, подсоединенной к шлангу 4 с вентилем 5 путем накачки воздуха;

3. Преобразователи подсоединяются к ультразвуковому прибору - УП (УК- 10ПМ) с помощью электропровода 7, и после прогрева прибора в течение 15 минут не менее 10 раз снимается отсчет времени прохождения поляризованной сдвиговой волны через заданную базу L (7см.) в автоматическом режиме и при точности измерения времени $\pm 0,01$ мкс. 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 7х7х15 см. в том же месте, где проводился измерение времени прохождения сдвиговой волны, сохранив базу прозвучивания (7см.);
6. Из отобранного куска изготавливается призма с размерами 7х7х14 см.

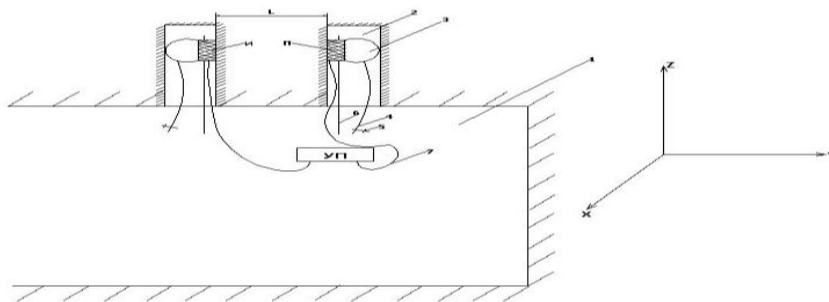


Рис.1 - Схема измерения действующих напряжений в массиве горных пород. 1- горизонтальная горная выработка; 2- щель; 3- воздушная подушка; 4- шланг; 5- вентиль; 6- досылник; 7- электропровод; И - излучатель поляризованной сдвиговой волны; П – приемник поляризованной сдвиговой волны; УП – ультразвуковой прибор; L – база измерения.

Для данной призмы определяется волновой модуль напряжения K , прозвучивая поляризованной сдвиговой волной при разных уровнях нагрузки сжатия по заданной, то есть именно по той базе (7см.), по которой проводился прозвучивания в породном массиве. 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 по формуле 1.

Так же определяются и другие составляющие напряжения и по другим направлениям. С целью приспособления плоских преобразователей ультразвуковых волн для измерения напряжений между параллельными скважинами (шпурами) нами разработаны и усовершенствованы конструкции преобразователей сдвиговых волн.

Ниже, в качестве примера, приводятся результаты сравнения значений фактического действующего напряжения σ_z , определяемые прямыми экспериментальными измерениями нагружающего устройства (силоизмеритель гидравлического пресса), со значениями действующего напряжения полученными по формуле 1 для образца мрамора в условиях нагружения (рис. 2).

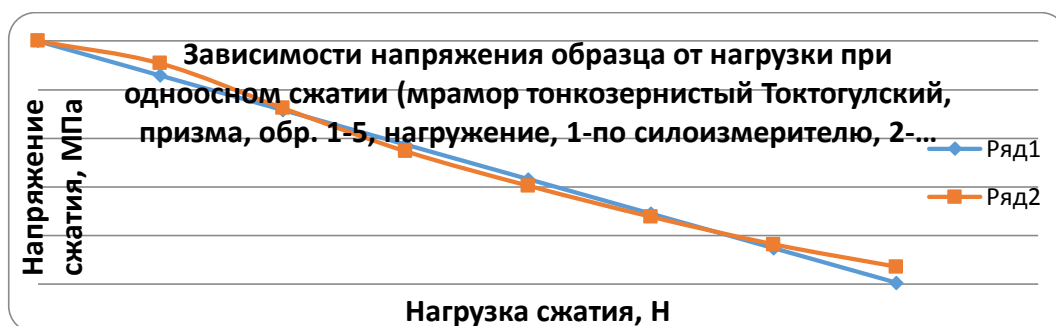


Рис.2 – Графики вертикальной компоненты напряжения σ_z (1 - по силоизмерителю, 2 - по формуле 1, нагружение, тонкозернистый мрамор, Токтогул, обр. 1-5).

Как видно из рисунка 2, ультразвуковые значения действующего напряжения, полученные по формуле 1, хорошо согласуются со значениями напряжений прямых измерений по силоизмерителю пресса. В пределах упругости имеются хорошая согласованность значений напряжений определяемые по силоизмерителю пресса и акустического метода для многих горных пород и технических материалов, причем и для случаев разгрузки.

Следует отметить, что определение напряжений акустическим методом, стала возможным благодаря результатам исследований Ф.Ф. Горбачевича, разработавшим преобразователей сдвиговых волн и акустополярископа [1,2].

Горные породы представляют собой сложные гетерогенные природные образования. В таких многокомпонентных средах, образовавшихся из высокотемпературных расплавленных магм и термальных растворов, при последующем неравномерном охлаждении формируются остаточные напряжения. Такие напряжения при нарушениях их равновесного состояния могут привести к динамическим, взрывоподобным разрушениям горных пород в зонах их высокой концентрации, обуславливая горный удар или землетрясения [9,11]. Поэтому определения остаточных напряжений в горных породах удароопасных месторождений и сейсмоактивных участков весьма важно для прогноза и предотвращения указанных катастроф [11].

По предлагаемому нами поляризационно-акустическому методу для определения остаточных напряжений в горной породе, измерения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны в кубическом образце с размерами 7х7х7см, свободном от внешней нагрузки, необходимо проводить в следующей последовательности.

1. Пропуская ультразвук по направлениям через каждый 1° или 10° от нуля до 180° , синхронно поворачивая, с совмещенными направлениями векторов поляризации, излучатель и приемник акустополярископа, определяется значения скорости поляризованной сдвиговой волны V_{SI} для каждого направления (при постоянной базе).

2. По признаку равенства скорости в направлении параллельном к вектору поляризации направлению V_{SP} и в перпендикулярном к этому направлению скорости V_{SC} сдвиговой волны (с совмещенными направлениями векторов поляризации излучателя и приемника), для заданной базы прозвучивания, определяется скорость 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 [10]).

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.

На рисунке 3 представлены результаты определения остаточных напряжений поляризационно - акустическим методом, основанным на закономерности изменения относительной величины скорости поляризованных поперечных волн от напряжений

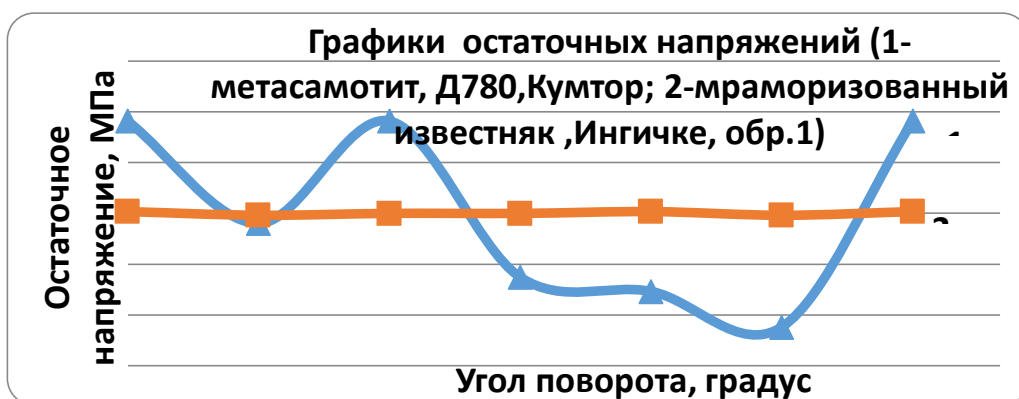


Рис.3. Зависимость остаточных напряжений от направления вектора поляризации поперечной волны. (1-метасомтит, Д780, Кумтор; 2- мраморизованный известняк,Ингичке, обр. 1)

(формула 1) для образца Д780 метасамотита месторождения Кумтор и образца №1 мраморизованного известняка месторождения Ингичке.

Как видно из рисунка 3 в визуально неоднородном мраморизованном известняке остаточные напряжения отсутствуют по всем направлениям (зависимость 2), тогда как в более однородном метасамотите Кумторского месторождения имеются значительные остаточные напряжения разного знака (зависимость 1).

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 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.

Использованная литература

1. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия порообразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 140 с.
2. Горбачевич Ф.Ф. Акустополаризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Апатиты: Кольский Научный Центр РАН, 1985. – 30с.
3. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – Киев, “Наукова думка”, 1977. – 152 с.
4. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – Киев, “Наукова думка”, 1974. – 108 с.
5. Гуца О.И. Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений. Сост. и персп. // Экспер. Методы исслед. деформаций и напряжений. – Киев, 1983. – С. 77-81.
6. Тажибаев К.Т. Закон изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2011г., том 11, №11, – Бишкек. – С. 151-156.
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. // Научные открытия - 2013. Сборник кратких описаний. – М.: РАЕН, 2014г. – С 48-50.
8. Тажибаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Способ определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах / Патент Кыргызской Республики: № 1826, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Кыргызской Республики 29.01.2016 г.
9. Тажибаев К.Т., Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. – Фрунзе. 1989. – С.180.
10. Тажибаев К.Т., Ташмаматов А.С. Остаточные напряжения в горных породах и метод их определения. – Бишкек: Издательство “Текник”, 2014. – 126 с.
Тажибаев К.Т. Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород. 2- тома. Т.1 – Бишкек: Издательство “Алтын Принт”, 2016. – 352 с.