

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО МОДУЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Была установлена функциональная зависимость между скоростью прохождения поляризованной сдвиговой ультразвуковой волны в твердых материалах и механическим напряжением /3/:

$$\sigma_x = \left(\frac{V_{soz}}{V_{sz}} - 1 \right) K_z; \sigma_y = \left(\frac{V_{sox}}{V_{sx}} - 1 \right) K_x; \sigma_z = \left(\frac{V_{soy}}{V_{sy}} - 1 \right) K_y, \quad (1)$$

где σ_x , σ_y , σ_z - нормальное напряжение по X, Y, Z соответственно; K_x , K_y , K_z - волновой модуль напряжения (название модуля наше) по направлениям X, Y, Z соответственно; V_{sx} , V_{sy} , V_{sz} - скорость прохождения через определенную базу нагруженного 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).

Зависимость (1) применима для определения как остаточных, так и действующих напряжений. Поскольку K имеет размерность напряжения и определяется по результатам прохождения через твердый материал ультразвуковой волны, данный модуль был назван волновым модулем напряжения.

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

Ниже приводится методика измерения скорости прохождения ультразвуковой поляризованной сдвиговой волны и определения волнового модуля напряжения K .

Для измерения скорости распространения сдвиговых (поперечных) ультразвуковых колебаний (УЗК) применялся акустополярископ и специальные преобразователи, разработанные Ф.Ф. Горбачевичем /1, 2/. Преобразователи (излучатель и приемник) имеют пьезопластины поршневого типа из аксиально-поляризованной керамики типа ЦТС и звукопровод. Звукопровод состоит из торцевой и контактной части. На контактной части находится площадка для контакта с образцом. На плоскости, соединяющейся (с пьезопластиной) части

звукопровода, производится преобразование продольных колебаний в сдвиговые таким образом, чтобы в контактной части звукопровода распространялись только сдвиговые УЗК. Преобразователь излучает интенсивные поляризованные чисто сдвиговые колебания. Частота колебаний преобразователей составляет 0,44 МГц. Для передачи сдвиговых колебаний от преобразователя к образцу в качестве контактной среды, как рекомендовано в работе /1/, нами применялся высоковязкий раствор некристаллизирующихся полисахаридов, изготовленный из искусственного меда. Время прохождения ультразвуковой волны через изучаемую базу материала определялось прибором серийного производства УК-10ПМ в автоматическом режиме с ручным контролем амплитуды первой полуволны (2 см) по картине колебаний на экране электронно-лучевой трубки прибора и отсчетом времени по цифровому индикатору. Для контроля направления поляризации на корпусе преобразователей находится отметка направления вектора поляризации (ВП). Для определения нормального напряжения по какому-либо направлению отметки вектора поляризации излучателя и приемника совмещаются между собой и направлением напряжения. Определение расстояния (базы прозвучивания) между контактными поверхностями образцов производится штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм. Точность измерения времени прохождения ультразвуковой волны прибором УК-10ПМ составляет $\pm 10^{-8}$ с.

Значение волнового модуля напряжения K определяется из опытов прозвучивания при нагрузках и разгрузке образцов (рис. 1). Проводится по 5-10 определений K при нагружении и разгрузке образца представительного объема исследуемого материала. Значение K как характеристика образца материала определяется как среднее из 5-10 единичных значений, полученных при прозвучивании в процессе нагружения и разгрузки.

Следует отметить, что K необходимо определять для характерного, представительного объема, так как данный модуль зависит от вещественного состава материала. В связи с этим для экспериментального определения K путем прозвучивания при нагружении было предложено использовать призматические образцы материалов, в том числе горных пород со следующими размерами: 5х5х10 см.; 7х7х14 см (в зависимости от таких структурных параметров материала, как средний размер зерна). Превышение в два раза высоты призмы ее поперечного размера позволяет сводить к минимуму влияние торцевых (контактных) условий передачи нагрузок на напряженное состояние и обеспечивает равномерное распределение напряжений в средней части образца, где для определения волнового модуля напряжения (K) материала проводится прозвучивание поляризованной сдвиговой ультразвуковой волной (рис. 1).

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

1. На боковую грань призмы с размерами, указанными выше, в средней части устанавливаются излучатель и приемник сдвиговой волны, совместив их векторы поляризации между собой и с направлением сжимающего напряжения (σ_z);
2. Измеряется скорость прохождения 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 прохождения поляризованной сдвиговой волны V_{SY} (рис. 1);
4. Для каждой ступени нагрузки определяется напряжение σ_z , разделив нагрузку (по силоизмерителю прессы) на площадь поперечного сечения призмы;
5. По зависимости (1) определяются значения волнового модуля напряжения K , и среднее значение принимается для дальнейших расчетов.

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

На основе определения значений вертикальной компоненты напряжения (σ_z) по силоизмерителю прессы при ступенчатом нагружении призматических образцов и результатов измерений скорости прохождения ультразвуковых сдвиговых поляризованных волн в процессе нагружения и разгрузки (рис. 1) установлено, что для ряда горных пород и технических материалов с разными вещественными составами волновой модуль напряжения K , установленный на основе опытов и формулы (1), имеет существенно различающиеся значения.

Исследования показали, что волновой модуль напряжения таких материалов, как алюминий, пластмасса, органическое стекло, бронза имеет отрицательное значение. Это связано с тем, что V_{SY} - скорость прохождения (через определенную базу) сдвиговой поляризованной волны для этих материалов, например, по направлению Y с увеличением напряжения одноосного сжатия (σ_z) уменьшается и становится меньше, чем V_{SOY} . и по зависимости (1) волновой модуль напряжения K становится отрицательным.

По классической механике сжимающее напряжение (σ_z) имеет отрицательный знак. Значение K связано с особенностью упруго-пластической деформации при сжатии, обусловленной вещественным составом и механическими свойствами этих материалов. Действительно, алюминий, органическое стекло, бронза,

пластмасса относятся к материалам с ярко выраженными пластическими свойствами. Положительное значение волнового модуля напряжения имеется для стали 3, эпоксидной смолы и горных пород.

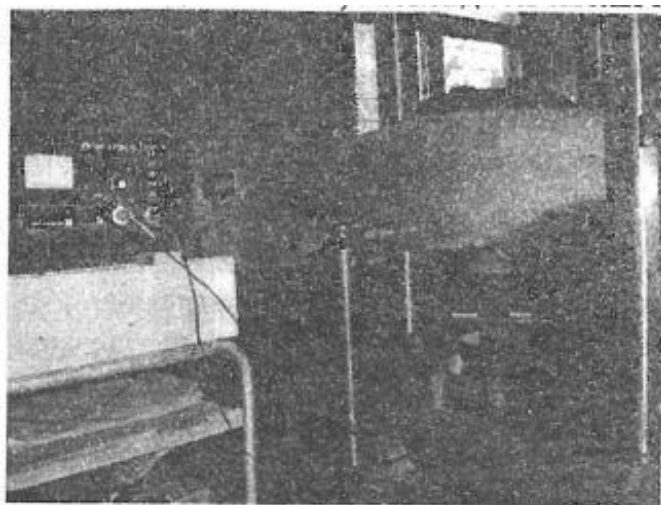


Рис. 1. Нагружение (на прессе ЦДМ-100) и прозвучивание (УК-10 ПМ) призматического образца

На рис. 2, 3 и 4 показано, как изменяется волновой модуль напряжения разных материалов в процессе нагружения. Из рис. 2 видно, что для такого однородного материала, как эпоксидная смола ЭД-6 в пределах упругости модуль напряжения K практически остается постоянным при разных уровнях нагрузки. Для мраморизованного известняка, испытанного вплоть до разрушения, вблизи предела прочности, то есть при напряжении сжатия 120 МПа (разрушение наступило при напряжении сжатия 121,3 МПа), волновой модуль напряжения резко изменяется, а при остальных нагрузках, в пределах упругости, практически остается постоянным (рис. 3). Для некоторых горных пород для разных уровней напряжения волновой модуль может изменяться, хотя эти изменения могут быть монотонными и незначительными (рис. 4). Применительно к таким материалам для повышения точности определения, для расчета напряжения нужно применить индивидуально то значение волнового модуля напряжения K , полученного на уровне напряжения, соответствующего такому же значению скорости сдвиговой волны, какое наблюдалось при первоначальном прозвучивании этого же куска (образца) материала в массиве в нагруженном состоянии. В таких материалах применение для расчетов среднего значения волнового модуля напряжения, полученного как среднее из данных других разных образцов, приведет к значительным погрешностям. В зависимости от требуемой точности для решения инженерных задач усреднение, то есть применение среднего значения волнового модуля напряжения K , допустимо только индивидуально для значений K конкретного одного рассматриваемого образца (базы прозвучивания). Экспериментальные

результаты свидетельствуют о том, что волновой модуль напряжения нельзя рассматривать как строго постоянную величину материала для разных уровней напряжения и разных его кусков (частей), хотя данный модуль имеет свои характерные значения для каждого материала. Данный модуль может служить как характеристика материала подобно модулю деформации, значения которой при разных уровнях напряжения могут изменяться (в начале нагружения и вблизи разрушающей нагрузки) и могут оставаться постоянными (модуль упругости) в пределах упругой деформации. В целом, о том, что волновой модуль напряжения K может служить как характеристика материала, свидетельствует линейный характер изменения относительной величины скорости прохождения поляризованной сдвиговой ультразвуковой волны от напряжения для разных по свойствам материалов в пределах их упругости. Как указано выше, для расчетов принимается среднее значение волнового модуля напряжения конкретно для изучаемой базы прозвучивания (для конкретного образца). После установления значения K и скорости прохождения сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны напряжение (как остаточное, так и действующее) определяется по зависимости 1. Знак напряжений (растягивающий – положительный, сжимающий – отрицательный, как это принято в классической механике) определяется в соответствии со знаком величины K и относительной величины скорости прохождения поляризованной сдвиговой ультразвуковой волны (функциональная зависимость 1).

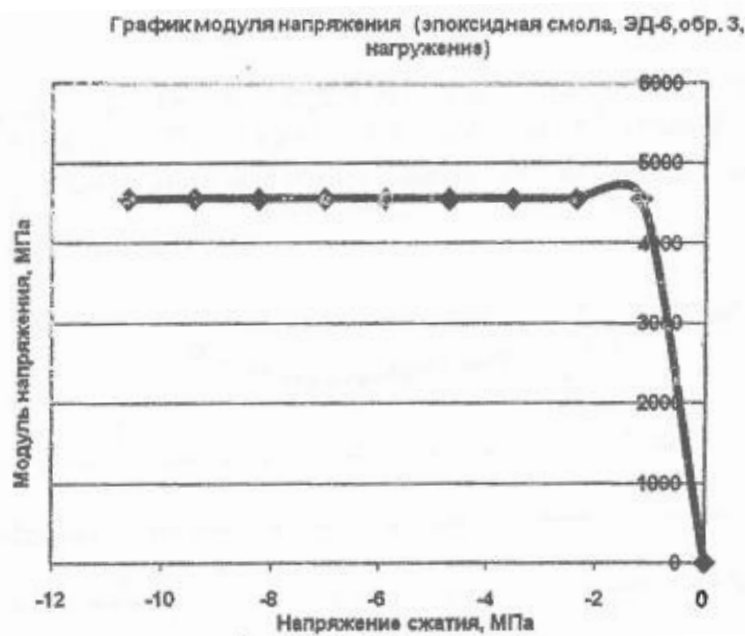


Рис. 2. График значений волнового модуля напряжения при разных уровнях нагрузки одноосного сжатия

При известном значении волнового модуля напряжения, измерив скорости прохождения сдвиговой поляризованной ультразвуковой волны, можно определять остаточные или действующие напряжения по установленной функциональной зависимости 1. Следует отметить, что действующее напряжение может включать в себя 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.

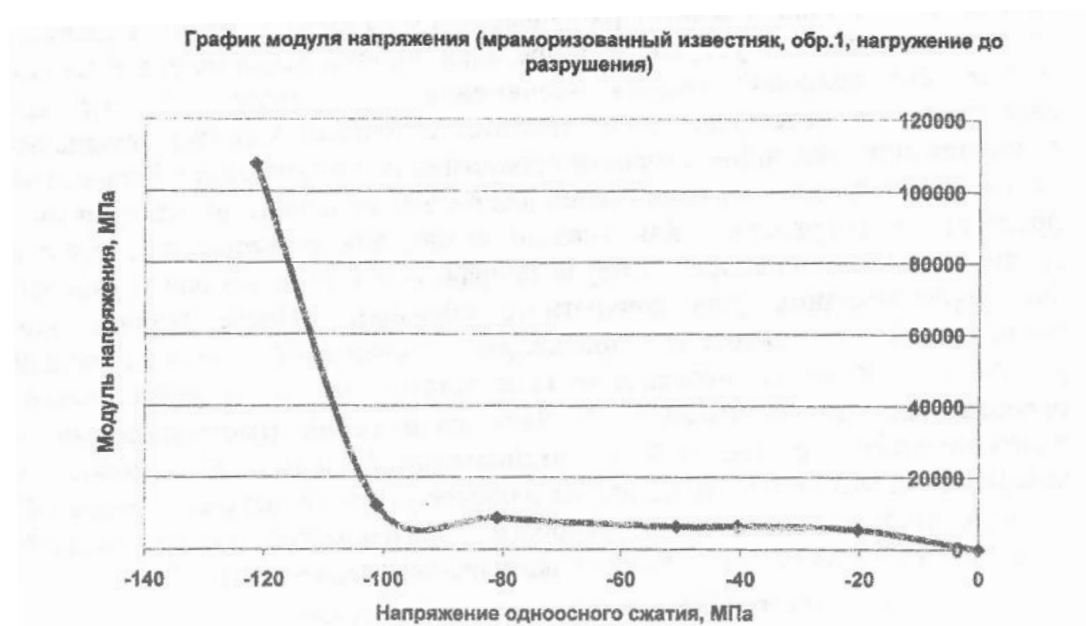


Рис. 10. График значений волнового модуля напряжения при разных уровнях нагрузки одноосного сжатия (мраморизованный известняк, образец № 1)

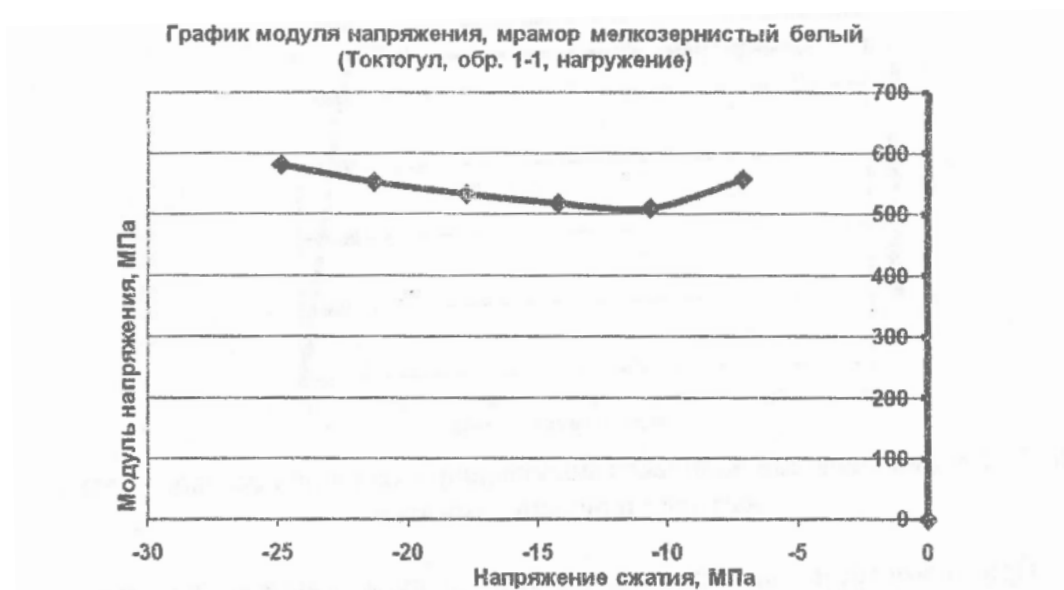


Рис. 11. График значений волнового модуля напряжения при разных уровнях нагрузки одноосного сжатия (мрамор тонкозернистый, Токтогул, образец № 1-1)

Список литературы

1. Горбацевич Ф.Ф. Акустопляризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Апатиты: Кольский научный Центр РАН, 1985. – 30с.
2. Горбацевич Ф.Ф. Акустоплярископия породобразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. – 140 с.
3. 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. – Том 11. – №11. – С. 151-156.