

УДК 622.831.32; 624.131 543 (575.2) (04)

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

К.Т. Тажибаев – докт. техн. наук,
М.С. Акматалиева – научн. сотрудник,
Д.К. Тажибаев – научн. сотрудник

On parameters of spreading of different polarizable diametrical ultrasonic waves in isotropic and quasi isotropic solid deformable mediums the directions of residual stresses are determined.

Ультразвуковые методы определения свойств и структуры анизотропных материалов, в том числе горных пород, позволяют получать результаты высокой точности и надежности на малом и большом объеме проб, особенно при акустополаризационных явлениях, сопровождающихся распространением сдвиговых (поперечных) колебаний [1, 2].

В изотропных средах вне зависимости от направления могут распространяться две объемные волны продольных и сдвиговых (поперечных) колебаний. В волне продольных колебаний направления смещения среды совпадает с направлением ее распространения. В волне сдвиговых колебаний смещение среды происходит в направлении, перпендикулярном распространению волны.

В изотропных средах в одном направлении, как правило, наблюдается распространение трех изонормальных объемных волн. Одна из них, имеющая наибольшую скорость распространения, является квазипродольной, две другие – квазисдвиговыми. В квазипродольной волне направление смещения частиц среды может отличаться от направления распространения, а в квазисдвиговых – от нормали к направлению распространения.

Схема прибора для измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний и

акустополаризационных характеристик горных пород (акустополарископ) представлена на рис. 1. Точность акустополаризационных измерений зависит от качества сборки и регулировки акустополарископа. Например, при синхронном или одиночном поворотах верхнего и нижнего преобразователей должна соблюдаться строгая параллельность между контактными поверхностями преобразователей. Для проверки соответствия этим требованиям преобразователи смазывают и соединяют, устанавливая груз. Затем их синхронно поворачивают в пределах угла 360° . На отрегулированном акустополарископе отклонение амплитуды не превышает 10%.

Для наших исследований рассматривали три объемные модели изготовленные из оптически активного однородного материала (эпоксидная смола ЭД-6): первая модель не имеет остаточных напряжений (призма: высота – $H=85$ мм, поперечный размер образца №5 – $a=b=50$ мм); вторая модель имеет плоскополаризованное генетическое остаточное напряжение (призма: высота – $H=100$ мм, поперечный размер образца №9 – $a=b=50$ мм); третья модель имеет наведенное термообработкой остаточное напряжение (призма: высота – $H=100$ мм, поперечный размер образца №8 – $a=b=50$ мм). Нами также был исследован

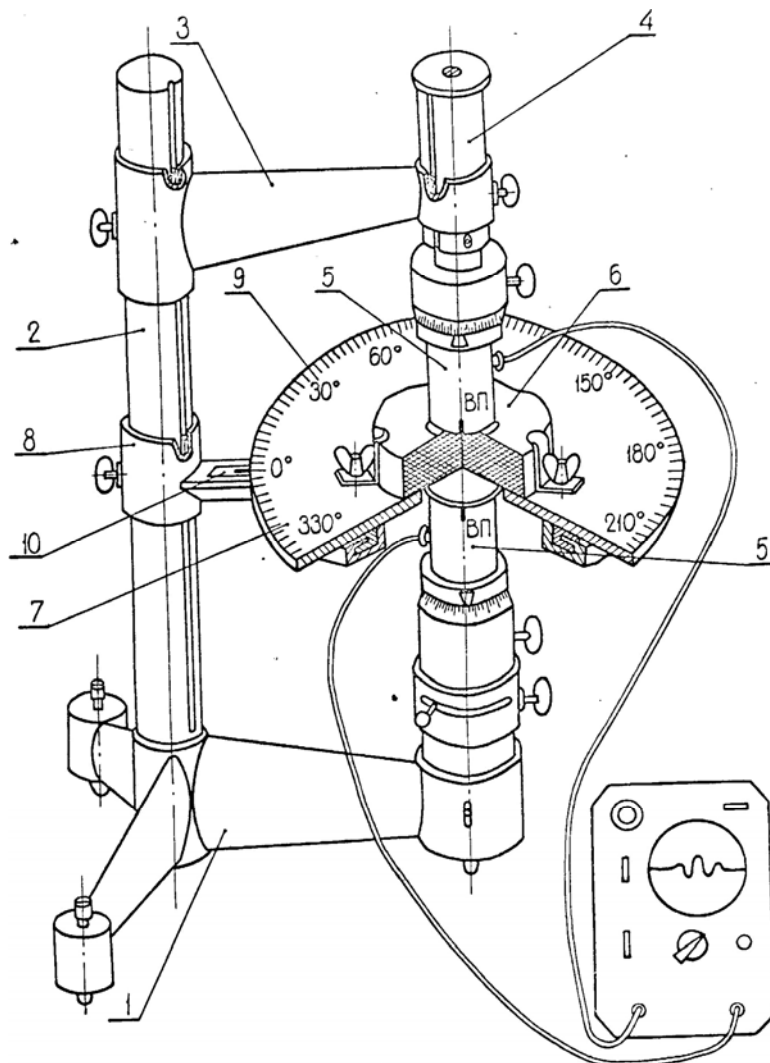


Рис.1. Конструкция акустополарископа с поворотной платформой:
1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – подвижный шток;
5 – преобразователи; 6 – образец; 7 – поворотная платформа;
8 – дополнительный кронштейн; 9 – шкала углов; 10 – указатель

цилиндрический образец квазиизотропной (не слоистой) горной породы Кумторского месторождения (метасамотит, скважина D778, глубина 131 м, диаметр образца 60 мм, высота 156 мм) и образец горной породы месторождения Ингичке (мраморизованный известняк, неоднородный, с прослойками, диаметр цилиндрического образца 60 мм, высота 89 мм).

Установлено, что в однородных моделях остаточные напряжения пропорциональны

разности времени прохождения ортогонально поляризованных поперечных ультразвуковых волн, тогда

$$T_{\Delta} = T_{\Delta(BB)} - T_{\Delta(BП)}, \quad (1),$$

где $T_{\Delta(BП)}$, $T_{\Delta(BC)}$ – соответственно время прохождения поперечной волны через определенную базу при параллельных и скрещенных векторах поляризации излучателя и приемника. В соответствии с этим можно записать

$$\begin{aligned} T_{\Delta(X)} &= X \sigma_{cp(X)} \frac{\lambda}{fK_T}, \\ T_{\Delta(Y)} &= Y \sigma_{cp(Y)} \frac{\lambda}{fK_T}, \\ T_{\Delta(Z)} &= Z \sigma_{cp(Z)} \frac{\lambda}{fK_T}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_{cp(X)}, \sigma_{cp(Y)}, \sigma_{cp(Z)}$ – среднее значение напряжений по направлению и расстоянию X, Y, Z соответственно; λ, f – длина и частота ультразвуковой волны; K_T – коэффициент имеющий размерность силы.

При прозвучивании поляризованной поперечной волной, путем поворота излучателя и приемника, устанавливались положения вектора поляризации и измерялись время $T_{\Delta(BП)}$, $T_{\Delta(BC)}$ и скорости прохождения поляризованной поперечной волны для параллельного $Vs(n)$ и скрещенного $Vs(c)$ состояния преобразователей. При этом для каждой стороны AB (1); BC (11); CD (111); DA (1V) поперечного сечения призмы (модели ЭД-6) проводили измерения времени прохождения поляризованной поперечной волны через каждый 30° , начиная от 0° до 360° по часовой стрелке. Отсчет при 0° соответствует перпендикулярному положению к рассматриваемой стороне, например AB (1), а при измерениях в образце 8 (с наведенными остаточными напряжениями) отсчет при 0° соответствует диагонали поперечного сечения призмы из угловой точки, например A .

Для определения направления и знака напряжения (сжимающий –, растягивающий +) путем прозвучивания поляризованной поперечной ультразвуковой волной можно принять следующие правила.

1. Для случая, когда вектор поляризации преобразователей (излучателя и приемника) параллельны (ВП), максимальное значение времени прохождения волны через постоянную базу (при разных углах поворота) соответствует максимальному значению сжимающего напряжения, а минимальное – максимальному значению растягивающего напряжения;

2. Для случая, когда вектор поляризации преобразователей (излучателя и приемника) скрещены (ВС), максимальное значение времени прохождения волны через постоянную

базу (при разных углах поворота) соответствует максимальному значению растягивающего напряжения, а минимальное – максимальному значению сжимающего напряжения.

Результаты определения времени прохождения поляризованных поперечных волн в моделях, не имеющих и имеющих генетические и наведенные остаточные напряжения, а также в образцах горных пород месторождений Кумтор и Ингичке приведены на рис. 2–6.

В пределах моделей, содержащих остаточные напряжения, в рассматриваемых направлениях значения разности (T_{Δ}) времени прохождения “перпендикулярно” поляризованной (скрещенной) поперечной волны – $T_{\Delta(BC)}$ и “параллельно” поляризованной поперечной волны – $T_{\Delta(BП)}$, изменяются существенно (рис. 3, 4). Например, линейное изменение разности времени прохождения ортогонально поляризованных волн (T_{Δ}) связано только наличием во второй модели (образец №5) неоднородных остаточных напряжений, так как в этой однородной, фотоупругой, прозрачной модели нет никаких трещин и выработки (рис. 2). Поэтому указанную разность мы назвали показателем напряженности – dVs (с,п), тогда

$$T_{\Delta} = T_{\Delta(BC)} - T_{\Delta(BП)}.$$

Результаты первого этапа исследований, когда во всех трех моделях отсутствовали остаточные напряжения, показали, что указанная разность (показатель напряженности) во всех измерениях (в продольном и поперечном направлениях) равно нулю. Это свидетельствует о том, что разность скоростей ортогонально поляризованных поперечных волн действительно отражает механическую напряженность, в данном случае уровень остаточных напряжений среды.

При наличии в пределах модели выработки (пустоты) и отсутствии остаточных напряжений, скорости прохождения параллельно – $Vs(n)$ и перпендикулярно – $Vs(c)$ поляризованных поперечных волн одинаково уменьшаются в направлении напротив выработки (пустоты) и поэтому их разность равна нулю, а при наличии остаточных напряжений данная разность изменяется значительно, причем она может приобретать как положительное, так и отрицательное значение.

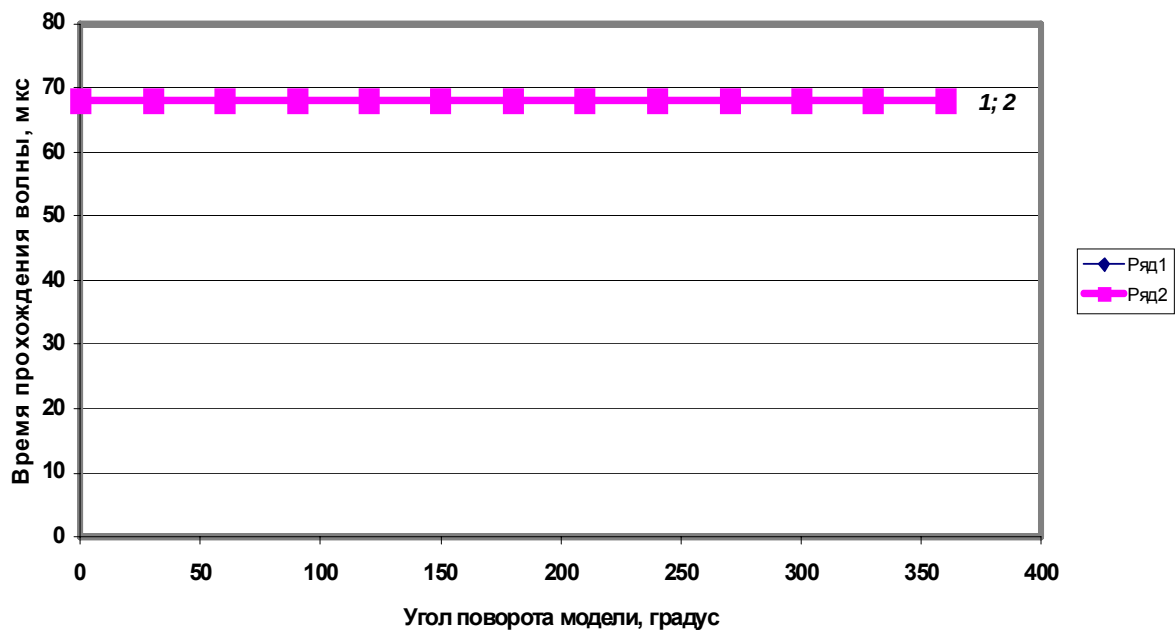


Рис. 2. Зависимости времени прохождения поляризованных поперечных волн (ВП; ВС) от угла поворота модели (призма, ЭД-6, обр. 5, без остаточных напряжений, высота 85 мм, сторона АВ)

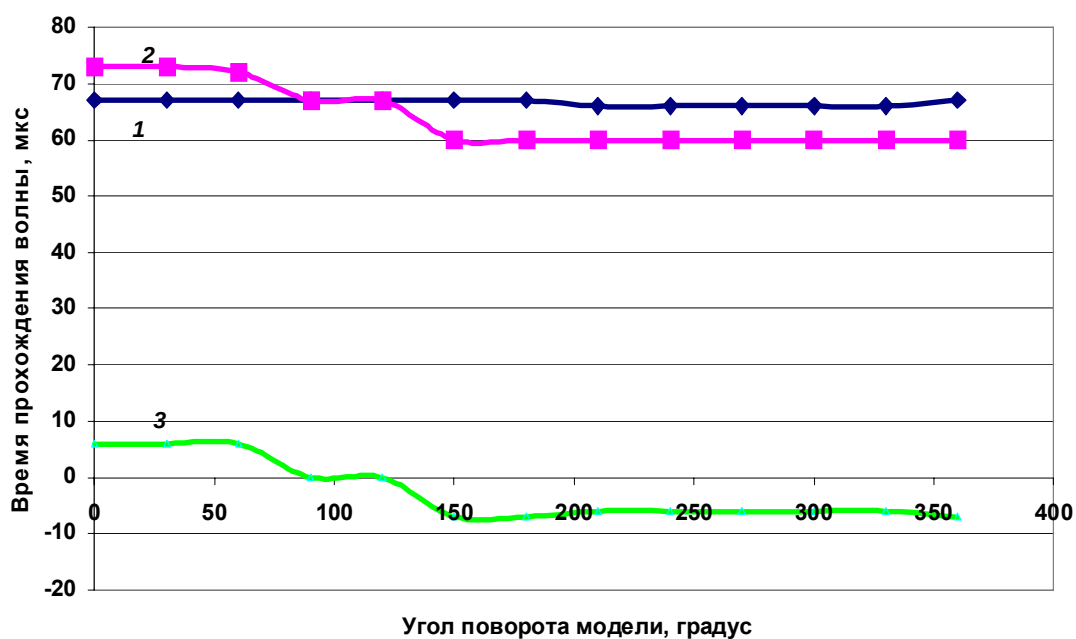


Рис. 3. Зависимости времени прохождения поляризованных поперечных волн (1-ВП; 2-ВС) и их разности (3-Тсп) от угла поворота модели (призма, ЭД-6, обр. 9 с несимм. остат. напряж., высота 100 мм, сторона АВ)

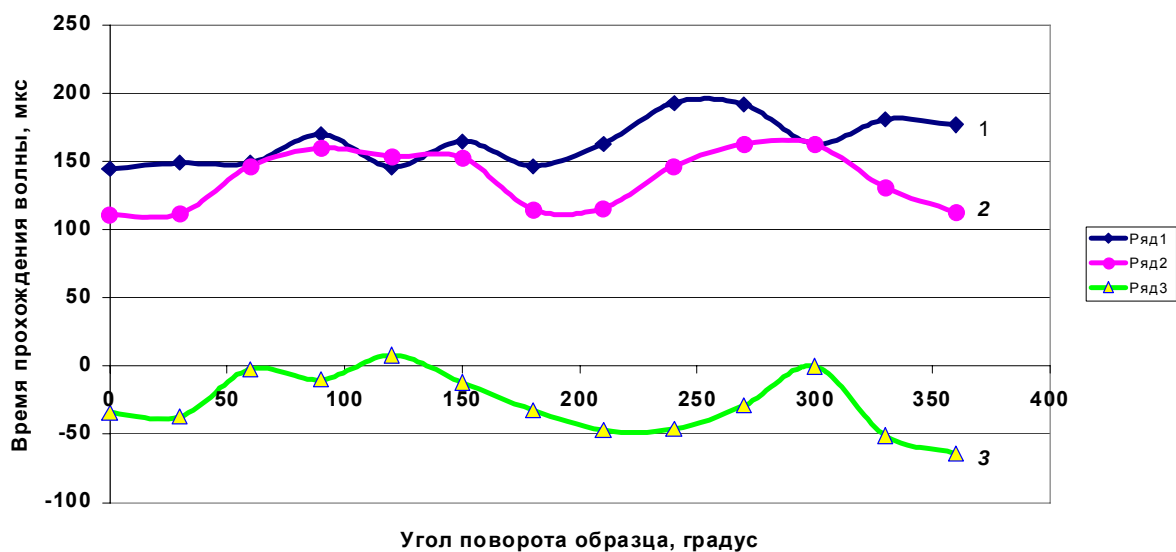


Рис. 4. Зависимости времени прохождения поляризованных поперечных волн (1-ВП; 2-ВС) и их разности (3-Тсп) от угла поворота модели (призма, ЭД-6, обр.8 с наведенными остаточн. напряж., высота 100 мм, попер. размера $a=v=50$ мм, диагональ Д)

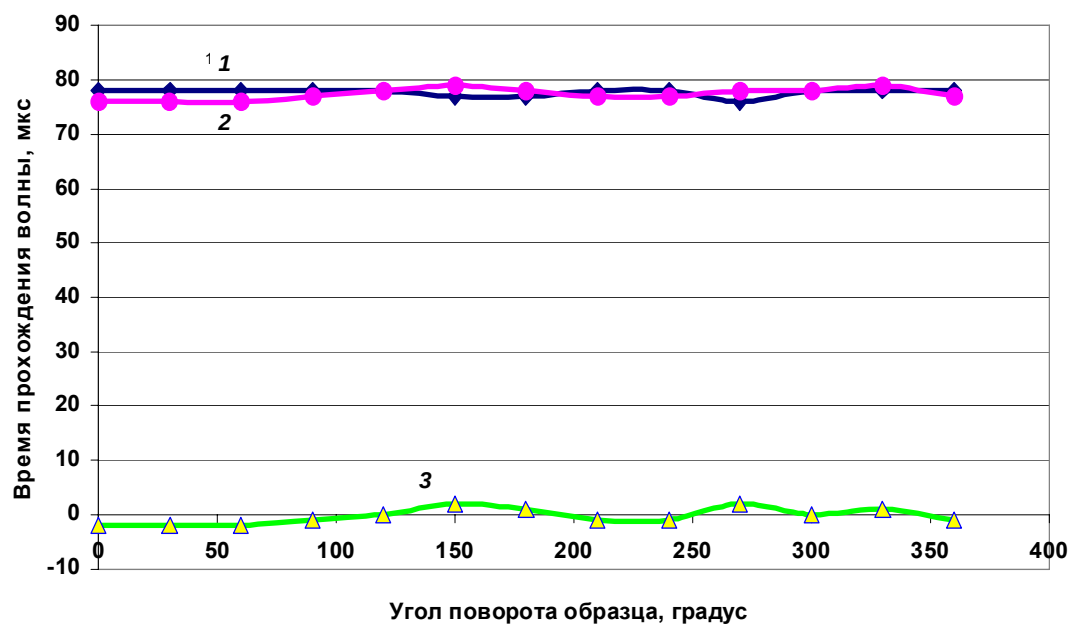


Рис. 5. Зависимости времени прохождения поляризованных поперечных волн (1-ВП; 2-ВС) и их разности (3-Тсп) от угла поворота образца (мраморизованный известняк, Ингичке, обр.3, высота 89 мм, диаметр 60 мм, сторона С, середина)

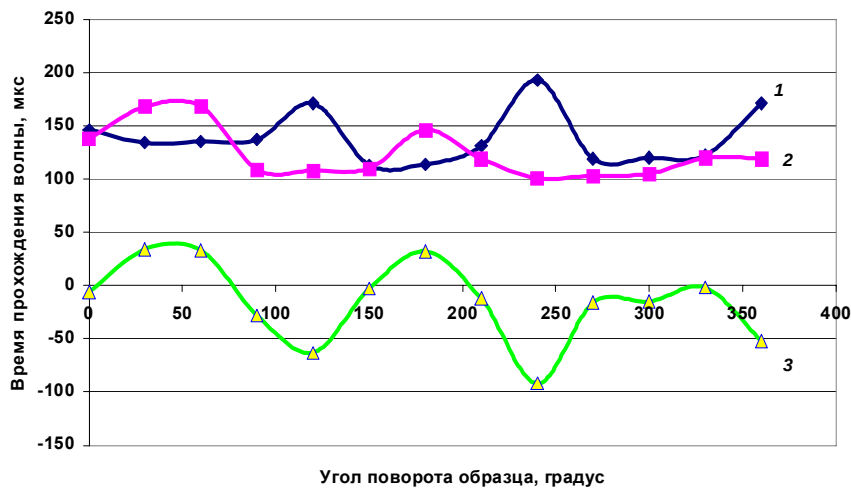


Рис. 6. Зависимости времени прохождения поляризованных поперечных волн (1-ВП; 2-ВС) и их разности (3-Тсп) от угла поворота образца (метамагнит, Кумтор, скв. Д778, высота обр. 155 мм, диаметр 60 мм, сторона В)

Следует также отметить, что скорость прохождения поперечной поляризованной волны в значительно меньшей степени изменяется от наличия трещин и пустот (выработки), чем скорость продольной волны.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. По параметрам распространения разнополяризованных поперечных ультразвуковых волн в изотропных и квазиизотропных твердых деформируемых средах можно определять направления остаточных напряжений. В неоднородных и анизотропных твердых средах, при определении их остаточных напряжений, следует учитывать структурные параметры (слоистость, кливаж, трещиноватость).

2. Скорость прохождения продольной ультразвуковой волны более чувствительна к пустотам и трещинам, чем скорость прохождения поляризованных поперечных волн, т.е. в трещиноватых зонах и в зоне пустоты (выработки) скорость продольной волны уменьшается значительно тогда, как скорость поперечной волны уменьшается незначительно.

3. На основании результатов измерений скоростей ортогонально поляризованных (вектор поляризации параллельный $V_s(p)$ и скре-

щенный $V_s(c)$ поперечных волн установлено, что разность скорости скрещенной и параллельной волны по заданному единому для обеих волн направлению не зависит от наличия в пути трещин и выработки, а зависит от величины и направления остаточных напряжений.

4. При наличии в пределах модели выработки (пустоты) и отсутствии остаточных напряжений, скорости прохождения параллельно – $V_s(p)$ и перпендикулярно – $V_s(c)$ поляризованных поперечных волн одинаково уменьшаются в зоне трещин и выработки (пустоты) и поэтому их разность равно нулю. При наличии остаточных напряжений данная разность изменяется значительно, причем она может приобретать как положительные, так и отрицательные значения.

Литература

1. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. – Апатиты: Изд-во Кольск. научн. центра РАН, 2002. – 140 с.
2. Горбачевич Ф.Ф. Акустополаризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. – Апатиты: Изд-во Кольск. научн. центра РАН, 1985. – 30 с.