

УДК 622.831.32; 624.131.543 (575.2)(04)

**ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ  
ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ  
ОТ НАПРЯЖЕНИЯ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**

**К. Тажибаев**

Описано теоретическое и экспериментальное обоснование закона изменения скорости прохождения поляризованной поперечной ультразвуковой волны от напряжения в твердых материалах и его применение

*Ключевые слова:* поляризация; волна; ультразвук; напряжение; скорость.

Анализ методов определения остаточных и действующих напряжений в твердых материалах показал, что наиболее перспективным из всех известных методов для определения напряжений считается ультразвуковой метод, основанный на данных скорости прохождения поперечных поляризованных ультразвуковых волн. Теоретические и экспериментальные подходы применения данных скорости прохождения поперечной поляризованной волны для определения напряжений приведены в [1 – 4]. В работах [2 – 4] показано, что разность скоростей ультразвуковых сдвиговых колебаний, поляризованных в двух главных плоскостях, линейно изменяется вплоть до предела текучести материала.

При исследовании напряжений было установлено [3], 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.

Следует отметить, что при применении указанных выше методов для установления напряжений трудоемкость повышается из-за необходимости определения комплекса трудно определяемых характеристик. Использование теоретического решения задачи и определения входящих в расчетные формулы постоянных величин, также снижает точность результата. Основные не-

достатки ультразвуковых методов и способов определения напряжений – их высокая трудоемкость и низкая точность, поскольку требуется устанавливать большое количество характеристик. Необходимо и предварительное проведение дополнительных исследований механических свойств на напряженных и на ненапряженных образцах материала. В ненапряженных образцах внешней нагрузкой образцов могут присутствовать остаточные напряжения, которые искажают результаты и требуют дополнительного определения их величины и знака.

Недостатками известных механических методов определения остаточных и действующих напряжений путем образования новых поверхностей (методы разгрузки, голографической интерферометрии) [5–10], являются их невысокая точность из-за неполных изменений существующих остаточных напряжений в зависимости от размеров и расположения вновь образованных поверхностей (надрезов, отверстий), а также ограниченность их применения из-за частичного разрушения конструкций и низкая информативность из-за измерений напряжений в локальных участках.

Недостатком метода определения остаточных напряжений, основанном на рентгеноструктурном анализе, является небольшая глубина проникновения рентгеновских лучей в плотные твердые материалы.

На плоских моделях в [12] показано, что можно определять остаточные напряжения по разности времени (скорости) прохождения через определенную базу твердого материала па-

раллельных (вектор поляризации излучателя и приемника параллельны) и скрещенных (вектор поляризации излучателя и приемника перпендикулярны) поперечных поляризованных волн, то есть по значению

$$T_{\Delta S} = T_{SP} - T_{SC}, \quad (1)$$

где  $T_{\Delta S}$  – разность времени прохождения поперечных поляризованных волн с параллельным и скрещенным вектором поляризации;  $T_{SC}$ ,  $T_{SP}$  – время прохождения поляризованной поперечной волны со скрещенным и параллельным вектором поляризации. Экспериментально установлено изменение указанной разности в зависимости от остаточных напряжений.

Исследователи отмечают, что точность определения напряжений может быть значительно повышена, если для расчета использовать не значения комплекса констант упругости, определяемые раздельно, а коэффициенты, представляющие собой сочетание этих констант и определяемые из эксперимента [3]. Исходя из этого, и в соответствии с полученными экспериментальными данными для плоского напряженного состояния запишем:

$$\sigma = \frac{T_{\Delta S}}{T_{SC}} K \quad (2)$$

или 
$$\sigma = \frac{(T_{SP} - \dot{O}_{SC})}{T_{SC}} K, \quad (3)$$

где  $K$  – волновой модуль напряжения материала (название модуля наше), имеющий размерность напряжения;  $\sigma$  – нормальное остаточное напряжение, направленное по вектору поляризации поперечной волны.

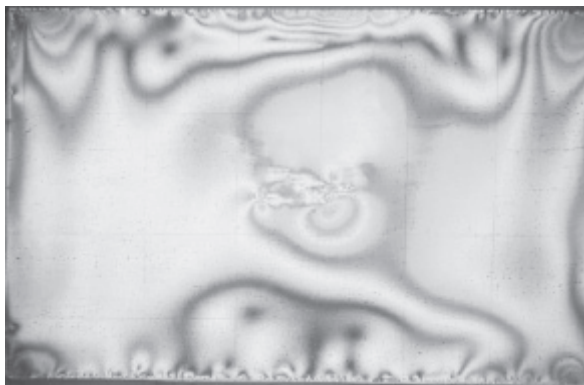


Рис. 1. Пластинка с наведенными остаточными напряжениями в поляризованном свете (ЭД-6, мод. 2-08, после термической обработки)

Заменив время прохождения поперечной волны  $T_S$  через скорости прохождения  $V_S = \frac{L}{T_S}$ , где  $L$  – база прозвучивания, из (3) получим:

$$\sigma = \left( \frac{1}{V_{SP}} - \frac{1}{V_{SC}} \right) V_{SC} K \quad (4)$$

или

$$\sigma = \left( \frac{V_{SC}}{V_{SP}} - 1 \right) K, \quad (5)$$

где  $V_{SC}$ ,  $V_{SP}$  – скорость прохождения поляризованной поперечной волны со скрещенным и параллельным вектором поляризации через заданную базу твердого тела.

При снятии напряжений путем отжига было установлено, что разность времени прохождения параллельных и скрещенных поляризованных поперечных волн поперек длины пластинки во всех измеренных сечениях практически равны нулю. Это согласуется с данными метода фотоупругости. При создании остаточных напряжений (рис. 1), разность времени прохождения параллельных и скрещенных поляризованных поперечных волн, измеренных поперек длины пластинки в сечениях, изменяются существенно, причем в соответствии с концентрациями остаточных напряжений, визуально наблюдаемых по методу фотоупругости. Как видно на рис. 2, результаты определения остаточных напряжений ультразвуковым методом [12] согласуются с данными метода фотоупругости.

На рис. 1 видны растягивающие остаточные напряжения по краям пластинки. По данным ультразвукового метода в этих частях отмечены положительные и значительные значения разности времени (скорости) прохождения взаимно перпендикулярных поляризованных поперечных волн (положительный знак – растягивающее напряжение). Особенно это характерно для правой крайней части пластинки, где растягивающие напряжения, установленные по формуле (3), довольно существенные (рис. 2). В целом ультразвуковые данные согласуются с данными фотоупругости для случаев отсутствия и наличия остаточных напряжений.

По формуле (3) признаком отсутствия остаточных напряжений в твердых материалах является равенство времени прохождения волн во взаимно перпендикулярных направлениях на разных участках при постоянной базе прозвучивания, т.е.  $T_{SC} = T_{SP}$  и  $T_{\Delta S} = 0$ .

Формулы (3) и (5) применимы для определения остаточных напряжений при плоском напряженном состоянии в плоских телах, где в перпендикулярном к плоскости направлении



Рис. 2. График распределения остаточных напряжений по длине плоской модели 2-08

напряжения отсутствуют (плоское напряженное состояние).

В реальных объемах твердых материалов встречается двухосное и трехосное напряженное состояние. В таких случаях для определения напряжений в первую очередь необходимо определить время прохождения поперечной поляризованной волны (через заданную изучаемую базу) для случая, когда нет остаточных напряжений (ненагруженное состояние), т.е. необходимо определить  $T_{SO}$ , а затем сравнивать его со временем прохождения поперечной поляризованной волны через заданную базу в напряженных зонах. Разность времени прохождения определяем по формулам:

$$T_{\Delta SX} = T_{SX} - T_{SOX}; \quad T_{\Delta SY} = T_{SY} - T_{SOY};$$

$$T_{\Delta SZ} = T_{SZ} - T_{SOZ}, \quad (6)$$

где  $T_{\Delta SX}, T_{\Delta SY}, T_{\Delta SZ}$  – разность времени прохождения взаимно перпендикулярных поперечных поляризованных волн для направлений X, Y, Z;  $T_{SX}, T_{SY}, T_{SZ}$  – время прохождения поперечной поляризованной волны по X, Y, Z;  $T_{SOX}, T_{SOY}, T_{SOZ}$  – время прохождения поперечной поляризованной волны по X, Y, Z при отсутствии напряжения (ненагруженное состояние).

Следует отметить, что направление поперечного прозвучивания должно быть перпендикулярным к направлению определяемого напряжения. Тогда, исходя из формулы (3)

$$\sigma_X = \frac{(T_{SZ} - T_{SOZ})}{T_{SOZ}} K_Z; \quad \sigma_Y = \frac{(T_{SX} - T_{SOX})}{T_{SOX}} K_X;$$

$$\sigma_Z = \frac{(T_{SY} - T_{SOY})}{T_{SOY}} K_Y \quad (7)$$

или

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

$$\sigma_Z = \left(\frac{T_{SY}}{T_{SOY}} - 1\right) K_Y. \quad (8)$$

Аналогично по формуле (8) через скорость

получим:

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

$$\sigma_Z = \left(\frac{V_{SOY}}{V_{SY}} - 1\right) K_Y, \quad (9)$$

где  $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$  – нормальное напряжение по X, Y, Z;  $K_X, K_Y, K_Z$  – волновой модуль напряжения по направлениям X, Y, Z;  $V_{SX}, V_{SY}, V_{SZ}$  – скорость прохождения через определенную базу поперечной поляризованной волны по направлениям X, Y, Z;  $V_{SOX}, V_{SOY}, V_{SOZ}$  – скорость прохождения поперечной поляризованной волны по направлениям X, Y, Z при отсутствии напряжения (ненагруженное состояние).

Для изотропных материалов  $K_X = K_Y = K_Z = K$ . Для анизотропных (слоистых, кристаллических анизотропных) материалов значение волнового модуля напряжения K также определяется по соответствующим направлениям. Значение K определяется прозвучиванием при нагружении и разгрузке образцов. Снимается 5–10 показаний K при нагружении и разгрузке образца. Значение K определяется как среднее из 10–20 единичных измерений, полученных при прозвучивании в процессе нагружения

и разгрузки образцов материала. Следует отметить, что  $K$  необходимо определять для определенного представительного объема, так как данный модуль зависит от структуры и вещественного состава материала. В связи с этим нами предложено использовать призматические образцы  $5 \times 5 \times 10$  и  $7 \times 7 \times 14$  см.

При прозвучивании по направлениям  $Z$ ,  $Y$ ,  $X$ , с помощью поляризованных поперечных волн можно нормальные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  и главные нормальные напряжения путем поворота излучателя и приемника поляризованной поперечной волны [13].

Таким образом, прозвучивая по трем взаимно ортогональным направлениям и определяя время (скорость) прохождения поперечных поляризованных волн, можно определить все компоненты остаточных напряжений для характерного объема. Следует отметить, что величины напряжений по (8) и (9) представляют собой средние значения напряжения для заданной базы прозвучивания.

Экспериментальными исследованиями напряжений при ступенчатом нагружении призматических образцов разных материалов одноосным сжатием и при измерении времени прохождения поперечных поляризованных волн в процессе нагружения и разгрузки установлено, что для ряда твердых материалов с разными вещественными составами и структурой волновой модуль напряжения  $K$  составляет: для отвержденной эпоксидной смолы ЭД-6  $K=4552,8$  МПа; для стали 3  $K=43023,1$  МПа; для мрамора (Токтогул)  $K=1132,11$  МПа; для гнейса (Жети-Огуз)  $K=2113,12$  МПа.

После установления значения  $K$  и ультразвуковых параметров с помощью акустополариско-

па [14] остаточные напряжения определяли по формуле (9). Затем проверялась применимость формулы (9) для определения не только остаточных, но и действующих напряжений. Для проверки применимости закона изменения скорости прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений для различных материалов с резко отличающимися механическими свойствами и для определения не только остаточных, но и действующих напряжений нами проводились измерения времени прохождения поперечной поляризованной волны через призматические образцы при статическом сжатии отвержденной эпоксидной смолы ЭД-6, стали 3, мрамора (Токтогул) и гнейса (Жети-Огуз). Нагружение образцов проводилось ступенчато – через каждый 136 кГс (1333,7 Н) с помощью установки БУ-39 для малых нагрузок – до 2 т, и 30 тонного гидравлического пресса – через каждый 1500 кГс (14709,9 Н). Нагружение для образца из стали 3 проводилось до 9000 кГс (88259,4 Н). При каждой ступени нагрузки измерение времени прохождения поляризованных поперечных волн проводилось с использованием ультразвукового прибора УК-10 ПМ. Частота поперечной волны составляла 600 кГц. Погрешность измерения времени прохождения поперечных волн прибором УК – 10 ПМ составляла  $\pm 0,01$  мкс ( $10^{-8}$  с). На рис. 3–5 приводятся результаты экспериментальных исследований и сравнение значений фактических напряжений, определяемых прямым экспериментальным методом, и по формуле (9), отражающий закон изменения скорости прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений.

На рис. 3 видно, что для таких однородных материалов, как отвержденная эпоксидная смола ЭД-6 и сталь 3 ультразвуковые значения напря-

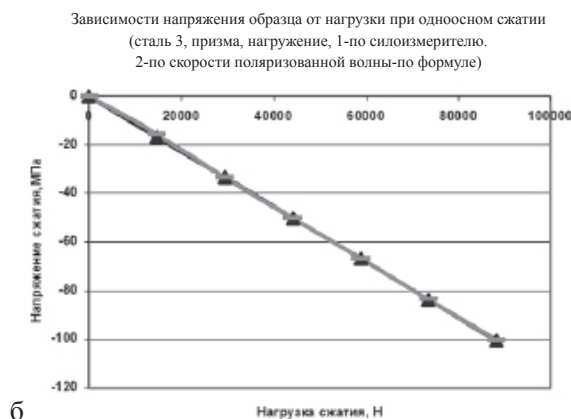
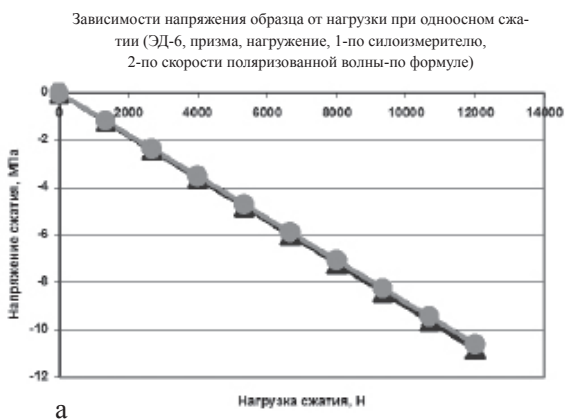


Рис. 3. Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения: а – ЭД-6, б – сталь 3

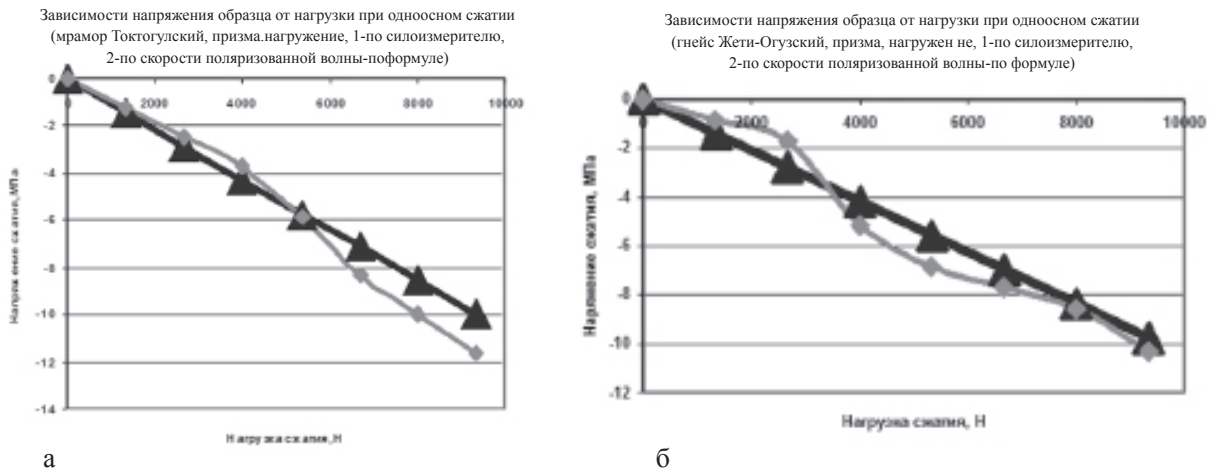


Рис. 4. Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения от нагрузки: а – мрамор, б – гнейс



Рис. 5. Экспериментальная и ультразвуковая зависимости напряжения при разгрузке (ЭД – 6)

жений, установленные по формуле (9), практически совпадают с напряжениями, полученными прямым измерением с помощью нагружающего устройства (БУ-39 и 30-тонный пресс).

Для мрамора (Токтогул) и гнейса (Жети-Огуз) расчетно-экспериментальные ультразвуковые значения напряжений согласуются с данными напряжений, полученными прямым измерением по данным силоизмерителя нагружающего устройства (рис. 4).

Следует отметить, что хорошее соответствие ультразвуковых значений напряжений установленных по формуле (9) со значениями напряжений, полученных прямым измерением по данным силоизмерителя нагружающего устройства, прослеживается и при разгрузке образцов (рис. 5).

Используя закон изменения скорости прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений можно определять и контролировать действующие напряжения в целиках и стенках горных выработок в квазиоднородных горных породах и в твердых конструкциях, состоящих из однородных технических материалов. Для этого необходимо подготавливать гладкие поверхности в целиках и на стенках горных выработок для установления излучателя и приемника поперечной ультразвуковой волны.

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

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

#### *Литература*

1. *Гуца О.И., Лебедев В.К.* Измерение остаточных напряжений в сварных соединениях без разрушения // Автоматическая сварка. Киев: Изд. КДНТИ, 1969, №1. С. 42–44.
2. *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.
3. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И.* Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 152 с.
4. *Гуца О.И.* Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений. Состояния и перспективы // Экспер. методы исследований деформаций и напряжений. Киев, 1983. С. 77–81.
5. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. С. 232.
6. *Давиденков Н.Н.* Об измерении остаточных напряжений // Заводская лаборатория. 1950. №2. С. 188–192.
7. *Витман Ф.Ф.* Остаточные напряжения. М.-Л.: ГТТИ, 1993. 67 с.
8. *Лобанов Л.Н.* Определение остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы // ДАН СССР. 1983. №3. С. 557–561.
9. *Чернышев Г.Н., Антонов А.А., Морозов В.К.* Способ определения внутренних остаточных напряжений. А.с СССР №807038, 1981.
10. *Антонов А.А.* Лазерная интерферометрия в задачах об остаточных напряжениях // Тр. всес. семин. по остат. напряжениям и методам регул. М., 1982. С. 18–30.
11. *Тажобаев К.Т.* Закон изменения времени прохождения поляризованных поперечных волн от напряжений в твердых средах // Известия НАН КР. 2010. №3. С. 36–44.
12. *Тажобаев К.Т., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К.* Способ определения остаточных напряжений в твердых материалах. Патент № 1245 КР от 26 февраля 2010 г.
13. *Горбацевич Ф.Ф.* Акустополяризационные измерения характеристик анизотропии горных пород. Апатиты: Кольский Научный Центр РАН, 1985. 30 с.