



УДК 539.3:620.179.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОТЕКСТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛАХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О. И. ГУЩА, д-р техн. наук, В. А. БРОДОВОЙ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
В. Н. СМІЛЕНКО, инж. (ГП НИИ «Квант», г. Киев)

С целью определения направлений действий главных напряжений в твердых средах с большим затуханием ультразвуковых колебаний и в анизотропных средах в них вводятся перпендикулярно плоскости действия напряжений ультразвуковые продольные колебания, а также сдвиговые колебания, поляризованные по трем направлениям. Первое направление поляризации выбирается вдоль направления анизотропии с неизвестным углом к главному направлению. Два других направления поляризации выбираются наклонными к первому под острыми углами, равными по значению и противоположными по знаку. Для этих направлений исследуется скорость распространения ультразвуковых колебаний. По этим результатам определяется угол наклона главных напряжений к выбранному начальному направлению, а также их значения.

*Ключевые слова:* главные направления, остаточные напряжения, анизотропные среды, ультразвуковые колебания, направление поляризации

Практика использования акустического метода контроля напряжений показывает, что большинство низколегированных сталей и ряд других конструкционных сплавов отличаются сравнительно небольшим рассеиванием в них ультразвука. В таких материалах можно наблюдать до восьми и более пакетов так называемых отраженных ультразвуковых сигналов, неоднородность которых, обусловленная текстурой проката, как правило, значительно меньше неоднородности, вызываемой напряжениями. В результате максимальный сигнал на приемнике при прочих равных условиях будет наблюдаться при совпадении плоскости поляризации колебаний с главными направлениями. Остальные принятые сигналы будут располагаться в ряд с регулярно убывающими амплитудами (рис. 1, а). При несовпадении плоскости поляризации с главными направлениями ряд принятых сигналов будет иметь вид нерегулярно убывающих сигналов (рис. 1, б). Максимальную амплитуду может иметь не первый принятый сигнал, таких максимумов может быть более одного. Таким образом, в материалах с небольшим затуханием ультразвуковых колебаний и сравнительно невыраженной текстурой проката главные направления могут быть определены по виду ряда убывающих сигналов на приемнике в процессе поворота датчиков.

Вместе с тем для многих конструкционных материалов появление начальной анизотропии, выз-

ванной, например, прокаткой, соизмеримо с эффектом от упругой анизотропии. Для ряда материалов она существенно преобладает над проявлением упругой анизотропии (титановые сплавы, специальные стали, алюминиевые сплавы, стеклопластики). Существуют также материалы с большим затуханием ультразвуковых колебаний, когда приемником фиксируется только один-два отраженных сигнала. Для таких материалов изложенный выше способ непригоден. Поэтому при измерении напряжений акустическим способом в таких материалах главные направления предполагаются известными [1]. Кроме того, в измерительных устройствах присутствует, как правило, автоматическая регулировка усиления. При этом все отраженные сигналы усиливаются до одного

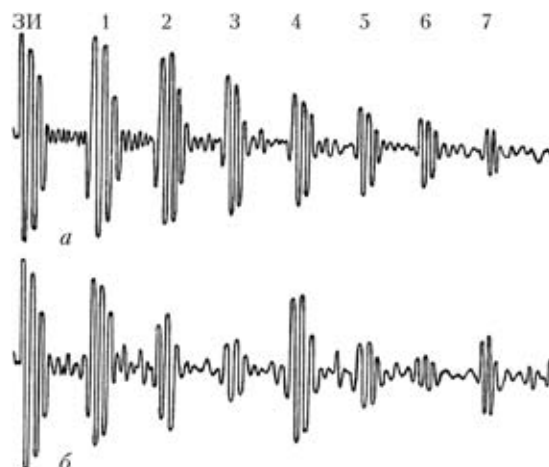


Рис. 1. Ряд пакетов ультразвуковых колебаний при совпадении (а) и несовпадении (б) плоскости поляризации колебаний с главными направлениями (ЗИ — зондирующий импульс): 1–7 — номер отраженного ультразвукового сигнала

уровня, что исключает возможность наблюдения натурального ряда отраженных сигналов. В связи с этим целью определения направлений действия главных напряжений в средах с большим затуханием ультразвуковых колебаний и в анизотропных средах в исследуемый объект перпендикулярно плоскости действия напряжений дополнительно вводятся сдвиговые ультразвуковые колебания, поляризованные по третьему направлению (рис. 2). Первое направление поляризации выбирается вдоль анизотропии с неизвестным углом  $\varphi$  к главному направлению, два других — наклонными к первому под острыми углами  $\alpha$ , равными по значению и противоположными по знаку [2]. Для этих направлений исследуются скорости распространения ультразвуковых сдвиговых колебаний  $C_{sx}(\varphi)$ ,  $C_{sx}(\varphi + \alpha)$ ,  $C_{sx}(\varphi - \alpha)$  соответственно. Тогда, введя обозначения

$$\gamma = \frac{C_{sx}(\varphi + \alpha)}{C_{sx}(\varphi - \alpha)}, \quad \gamma_1 = \frac{C_{sx}(\varphi)}{C_{sx}(\varphi + \alpha)}, \quad \gamma_2 = \frac{C_{sx}(\varphi)}{C_{sx}(\varphi - \alpha)}, \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{\cos^2 \varphi \sin^2 \alpha + \sin^2 \varphi \cos^2 \alpha}{\sin 2\varphi \sin 2\alpha},$$

$$K_2 = \frac{\cos^2 \varphi \cos^2 \alpha + \sin^2 \varphi \sin^2 \alpha}{\sin 2\varphi \sin 2\alpha} \quad (2)$$

и из зависимости

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \operatorname{tg} \alpha \frac{\gamma_1^2(\gamma^2 - 1)}{2 - \gamma_1^2 - \gamma_2^2}, \quad (3)$$

получаем значения скоростей распространения ультразвуковых волн вдоль главных направлений:

$$C_{sx3} = \frac{C_{sx}(\varphi)}{\sqrt{\gamma_2^2(\frac{1}{2} + K_1) + \gamma_1^2(\frac{1}{2} - K_1)}}, \quad (4)$$

$$C_{sx2} = \frac{C_{sx}(\varphi)}{\sqrt{\gamma_2^2(\frac{1}{2} - K_2) + \gamma_1^2(\frac{1}{2} + K_2)}}. \quad (5)$$

Значения компонент остаточных напряжений, направленных вдоль главных направлений, определяются выражениями

$$\sigma_{33} - \sigma_{22} = \left[ \frac{C_{sx3} - C_{s0}}{C_{s0}} - \frac{C_{sx2} - C_{s0}}{C_{s0}} \right] A, \quad (6)$$

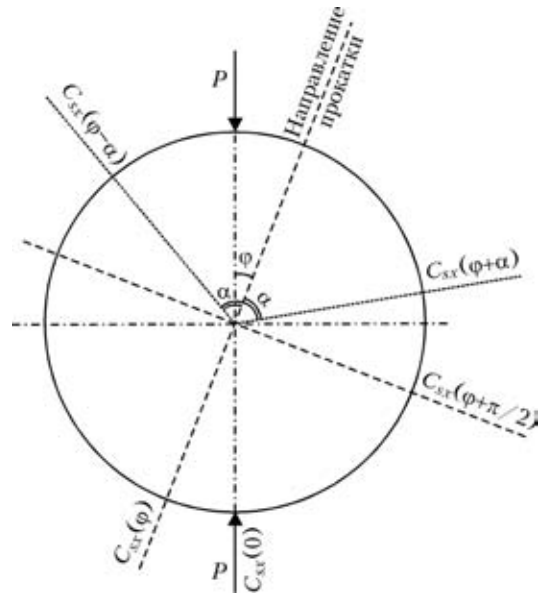


Рис. 2. Углы поляризации для определения главных направлений

$$\sigma_{33} + \sigma_{22} = \left[ \frac{C_{sx3} - C_{s0}}{C_{s0}} + \frac{C_{sx2} - C_{s0}}{C_{s0}} \right] B, \quad (7)$$

где  $C_{s0} = M(C_{sx3} + C_{sx2} - \Delta C_0) - NC_{lx1}$  — начальная скорость сдвиговых акустических колебаний;  $C_{lx1}$  — скорость распространения продольных акустических колебаний;  $A, B, M, N$  — коэффициенты пропорциональности, которые определяются упругими модулями второго и третьего порядка.

Начальная анизотропия, как известно, сказывается на начальной скорости акустических колебаний. Поэтому скорости колебаний, поляризованных вдоль направления прокатки и поперек, будут существенно различаться. Эту начальную разность скорости  $\Delta C_H$  можно записать в соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 2:

$$\Delta C_H = C_{sx}(\varphi)_0 - C_{sx}(\varphi + \pi/2)_0. \quad (8)$$

При повороте плоскости поляризации колебаний относительно выбранного начального направления соответственно изменяется и начальная скорость колебаний. В этом случае значение начальной разности скоростей  $\Delta C_0$  можно записать в виде

$$\Delta C_0 = \Delta C_H (\sin \varphi - \cos \varphi). \quad (9)$$

Методику проверяли на диске из стали 10Г2С1 диаметром 180 мм и толщиной 22 мм. Диск нагружали по диаметру усилием 20 т на гидравличес-

**Результаты измерений и расчетов углов и напряжений**

$\varphi_{\text{задан}}, \text{град}$	$C_{lx1}$	$C_{sx}(\varphi)$	$C_{sx}(\varphi - 60^\circ)$	$C_{sx}(\varphi + 60^\circ)$	$\sigma_{22}, \text{МПа}$	$\sigma_{33}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{расч}}, \text{МПа}$
15	60483	34741	34721	34707	39,9	-90,1	12,1
30	60482	34732	34733	34706	36,1	-94,0	30,9
45	60485	34726	34740	34710	36,3	-93,9	43,9



ком прессе ПС-50. Расчетные значения напряжений составляли  $\sigma_{33} = -96,5$  МПа и  $\sigma_{22} = 32,2$  МПа. Образец нагружали под углами 15, 30 и 45° относительно направления прокатки. Значения частот рециркуляции измеряли по направлению прокатки, а также под углами +60 и -60° относительно этого направления. Результаты обрабатывали на ПЭВМ по специально разработанной программе. Результаты эксперимента представлены в таблице.

Значения скоростей распространения ультразвуковых колебаний даны в частотах рециркуляции импульсов.

Таким образом, акустический метод дает возможность определять значение и главные направления действующих напряжений без разрушения как в изотропных материалах, так и в материалах с выраженной анизотропией.

1. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
2. Гуца О. И., Махорт Ф. Г. Акустический способ определения напряжений в твердых средах. — БИ. — 1983. — № 36.

Ultrasonic longitudinal oscillations, normal to the plane of action of stresses, and shear oscillations polarised in three directions are introduced into an object studied to determine directions of action of main stresses in solid media with a high attenuation of ultrasonic oscillations, as well as in anisotropic media. The first polarisation direction is selected to be along the anisotropy direction with an unknown angle to the main direction. Two other polarisation directions are selected to be inclined to the first one at acute angles, which are equal in value and opposite in sign. The velocity of propagation of ultrasonic oscillations is investigated for these directions. The angles of inclination of main stresses to a selected initial direction, as well as values of these stresses are determined from these results.

Поступила в редакцию 20.04.2007

## НОВЫЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

*В мае 2007 г. вышел в свет первый номер журнала «JOINING PLASTICS» («Соединение пластмасс»), издателем которого является Немецкое сварочное общество. Журнал выходит на немецком и английском языках, его периодичность — два выпуска в год, формат журнала А4, объем 100 с.*

*Поскольку пластмассы как конструкционный материал сегодня находят массовое применение во многих отраслях промышленности, журнал намерен публиковать материалы, имеющие отношение к получению неразъемных соединений пластмасс, и ориентирован на примеры и результаты практического приложения в этой области, в частности, при строительстве трубопроводов и резервуаров.*

*Читатель журнала сможет узнать все самое важное в данной области по вопросам управления качеством, стандартизации, результатам исследований и законченным разработкам, безопасности работ и защиты окружающей среды.*



**Более подробная информация о журнале на сайте: [www.joining-plastics.info](http://www.joining-plastics.info)**