



КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

О. И. ГУЩА, В. Н. СМИЛЕНКО, В. Г. КОТ, В. А. БРОДОВОЙ, И. Н. КЛОЧКОВ

На основе исследования акустоупругости в границах потенциала Мурнагана установлены теоретические закономерности распространения подповерхностных продольных акустических волн в твердой среде с напряжениями. Теоретические зависимости подтверждены экспериментально на образцах из стали 10ХСНД и алюминиевого сплава Д16.

Theoretical regularities of propagation of subsurface longitudinal acoustic waves in a solid medium with stresses were established proceeding from acoustoelasticity studies within Murnagan potential limits. Theoretical dependencies were confirmed experimentally on samples of 10KhSND steel and D16 aluminium alloy.

Успехи в нелинейной акустике и нелинейной теории упругости сделали возможным исследование физико-механических свойств твердых тел и их влияние на состояние этих тел. Одно из проявлений нелинейных свойств твердых тел, как известно, это эффект акустоупругости — зависимость скорости распространения акустических волн в теле от напряжений. На основе этого эффекта разработан и используется метод определения напряжений с использованием объемных акустических волн, который позволяет оценить некоторые физико-механические характеристики (ФМХ) материала, а также определить в нем одно-, двух- и трехосные напряжения [1]. При этом напряжения и упругие свойства объекта исследования принимаются однородными по его толщине. При неоднородном распределении их по толщине возникает проблема оценки напряжений. В этой связи значительный интерес приобретает развитие акустического метода с использованием иных акустических колебаний, в частности, подповерхностных акустических волн.

Ниже представлены результаты исследования закономерности распространения подповерхностных акустических волн в конструкционных материалах с напряжениями с целью обоснования методики контроля напряжений.

В качестве подповерхностных волн в технике дефектоскопии используют подповерхностные продольные акустические волны [2, 3], которые получают путем преломления на границе перехода изделие—верхняя среда. Исследования показали, что максимальное значение амплитуда подповерхностной продольной волны приобретает, если угол ввода (падения) продольной акустической волны равен первому критическому углу. Напряжения в такой волне на поверхности твердого тела равны нулю. Поэтому она не реагирует на неровности или иные дефекты на поверхности объекта конт-

роля. С увеличением расстояния от поверхности амплитуда механических напряжений в подповерхностной волне возрастает. Экспериментальные исследования показали, что максимального значения эти напряжения достигают на некотором расстоянии от поверхности вдоль луча, составляющего угол с поверхностью порядка 12° [4].

Теоретические исследования в области акустоупругости, выполненные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и Институте им. С. П. Тимошенко НАН Украины, дают основания для формирования связи скорости распространения подповерхностной продольной волны в твердом теле от напряжений в нем [1].

Если изотропное тело нагружено в трех взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с направлениями декартовой системы координат, теория акустоупругости дает уравнения для определения скорости распространения упругих акустических волн в произвольном направлении. Для случая, когда волны распространяются в направлении OX_1 , известны три уравнения, определяющие скорости распространения объемных волн в этом направлении. Квадраты скоростей определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \rho V_{LX1}^2 &= \lambda_1^4 \alpha_{11} + \sigma_{11}^0 \lambda_1^2, \\ \rho V_{SX2}^2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 G_{12} + \sigma_{11}^0 \lambda_1^2, \\ \rho V_{SX3}^2 &= \lambda_1^2 \lambda_3^2 G_{13} + \sigma_{11}^0 \lambda_1^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ — плотность материала; V_{LX1} — скорость продольной волны; V_{SX2} , V_{SX3} — скорости поперечных (сдвиговых) волн; λ_i — начальные деформации или удлинения ($i = 1...3$); G_{12} , G_{13} — величины, зависящие от упругих свойств и напряженного состояния материала; σ_{11}^0 — начальные напряжения, действующие вдоль оси OX_1 .



Учитывая основные акустические соотношения для потенциала Мурнагана и ограничения линейного приближения, а также выполнив соответствующие замены, можно получить выражения для квадрата скорости распространения подповерхностных продольных акустических волн. При этом принимаем во внимание, что скорость распространения подповерхностных продольных волн равна скорости объемных продольных волн [3–5]. Для упрощения выкладок ограничимся случаем линейного напряженного состояния, когда волна распространяется в направлении действующего напряжения: $\sigma_{11} \neq 0$; $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$.

В данном случае получим следующее выражение для квадрата скорости подповерхностных продольных волн:

$$\rho V_{LX1}^2 = (\lambda + 2\mu) + \left[\frac{2(\lambda + \mu)(2b + c + \lambda + 2\mu)}{3k\mu} + \frac{2(a + b)}{3k} + 1 \right] \sigma_{11}, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала; μ , λ — константы Ламэ; k — коэффициент объемной упругости, который определяется из выражения: $k = \lambda + (2/3)\mu$; a , b , c — константы упругости третьего порядка.

Как известно, изменение скорости распространения акустических волн в зависимости от напряжений в металлических материалах незначительны и составляют доли процента [1]. С учетом сказанного выше, а также принимая во внимание известные соотношения между скоростью ультразвука и упругими константами в ненагруженном твердом теле, преобразуем выражение (2) следующим образом:

$$\frac{V_{LX1} - V_{L0}}{V_{L0}} = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \times \left[\frac{2(\lambda + \mu)}{3k\mu} (2b + c + \lambda + 2\mu) + \frac{2(a + b)}{3k} + 1 \right] \sigma_{11}, \quad (3)$$

где V_{L0} — скорость волны в ненагруженном теле.

Приведенный анализ показывает, что скорость распространения подповерхностных продольных акустических волн в направлении действия одноосных напряжений однозначно от них зависит.

Ввиду необходимости контроля напряжений формулу (3) можно переписать в виде:

$$\sigma_{11} = \frac{V_{LX1} - V_{L0}}{V_{L0}} R. \quad (4)$$

$$\text{Здесь } R = \frac{3k\mu(\lambda + 2\mu)}{2(\lambda + \mu)(2b + c + \lambda + 2\mu) + 2\mu(a + b) + 3k\mu}.$$

Таким образом, для определения напряжений достаточно измерить приращение скорости распространения подповерхностной продольной ультразвуковой волны и умножить его на коэффициент пропорциональности R , который может быть определен расчетом по константам упругости второго

и третьего порядков материала или экспериментально с использованием выражения (4).

Экспериментальные исследования зависимости скорости распространения подповерхностных продольных ультразвуковых волн от напряжений проведены на опытных образцах из низколегированной стали 10ХСНД и алюминиевого сплава Д16. Основные механические характеристики материалов приведены в таблице.

Механические характеристики стали 10ХСНД и Д16

| Марка материала | Плотность ρ , г/см ³ | К-т Пуассона ν | Модуль Юнга E , МПа | σ_T , МПа | σ_B , МПа |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 10ХСНД | 7,804 | 0,2821 | 216000 | 400 | 520 |
| Д16 | 2,638 | 0,3186 | 72200 | 350 | 430 |

Исследовали зависимость скорости подповерхностной ультразвуковой волны от одноосных напряжений. Прямоугольные образцы нагружали одноосным сжатием на гидравлическом прессе ПСУ-50. Образцы нагружали ступенчато до уровня $(0,7 \dots 0,8)\sigma_T$. Исследования проводили при распространении ультразвуковой волны в плоскости действия нагрузки. До нагружения образца и на каждой ступени нагружения измеряли время прохождения ультразвуковой подповерхностной волной базисного пути. Для этого использовали ультразвуковой прибор контроля напряжений (УПКН), несколько модифицированный в соответствии с условиями возбуждения и приема подповерхностных ультразвуковых волн [6].

Результаты экспериментов приведены в виде графиков зависимости скорости распространения подповерхностных продольных ультразвуковых

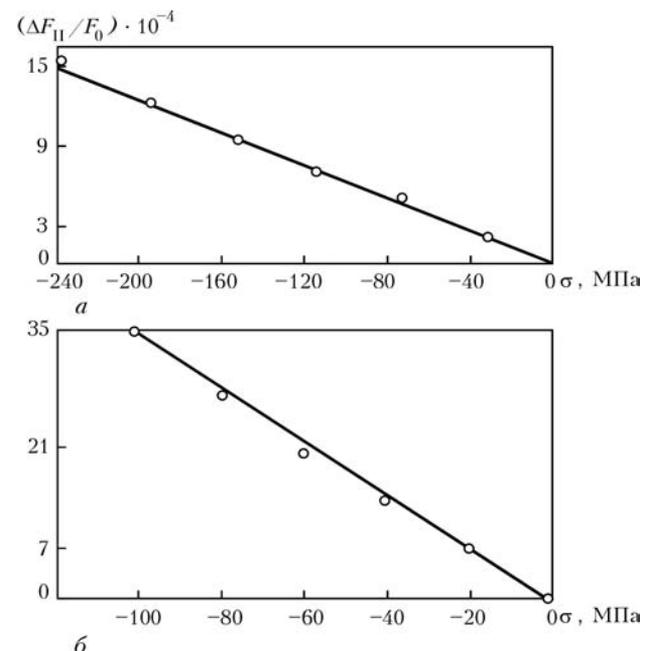


График зависимости скорости распространения подповерхностных продольных ультразвуковых волн от напряжений для стали 10ХСНД (а) и сплава Д16 (б)



волн от напряжений для стали 10ХСНД и сплава Д16 (рисунок).

Приведенные материалы свидетельствуют, что скорость распространения подповерхностных продольных ультразвуковых волн как в стальном образце, так и в алюминиевом сплаве изменяется пропорционально приложенным напряжениям.

Выводы

Результаты теоретических исследований эффекта акустоупругости, полученные в рамках потенциала Мурнагана, раскрывают закономерности распространения подповерхностных продольных акустических волн в твердом теле с напряжениями. Сформулированы расчетные выражения для определения напряжений в приповерхностных слоях материалов на основе измерения скорости распространения подповерхностных продольных волн.

Экспериментально подтверждена эффективность применения установленных закономерностей распространения подповерхностных продольных ультразвуковых волн для контроля напряжений в конструкционных материалах.

1. *Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И.* Введение в акустоупругость. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
2. *Разыграев Н. П.* Головные волны в неразрушающем контроле металлоконструкций // В мире неразруш. контроля. — 2003. — № 4. — С. 12–14.
3. *Ермолов И. Н., Разыграев Н. П., Щербинский В. Г.* Использование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля // Дефектоскопия. — 1978. — № 1. — С. 33–40.
4. *Ермолов И. Н., Н. П. Алешин, Потапов А. И.* Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля. Практ. пос. / Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
5. *Королев М. В.* Безэталонные ультразвуковые толщинометры. — М.: Машиностроение, 1985. — 80 с.
6. *Пат. UA 71637 C2 / В. М. Сміленко, О. Й. Гуца, В. О. Бродовий та ін.* Пристрій контролю механічних напружень та деформацій в твердих середовищах. — Опубл. 15.12.2004.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев*

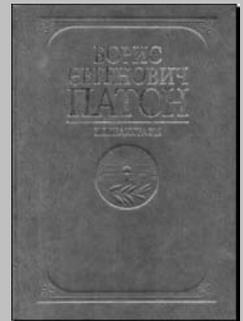
*Поступила в редакцию
15.09.2008*

НОВЫЕ КНИГИ

Б. Е. Патон: Избранные труды. — Киев: Изд. Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2008. — 894 с.

Сборник посвящен 90-летию со дня рождения академика НАН Украины Б. Е. Патона — выдающегося украинского ученого в области сварки, специальной электрометаллургии и материаловедения. Сборник состоит из семи разделов, охватывающих такие направления научной деятельности Б. Е. Патона, как сварка плавлением, сварка давлением, металлургия дуговой сварки, специальная электрометаллургия, сварные конструкции, космические технологии, а также применение сварки в медицине. Каждый раздел включает обзор работ, библиографию и подборку наиболее важных публикаций, в которых приведены результаты работ, выполненных впервые в мировой практике и внесших революционизирующее влияние на развитие ведущих отраслей промышленности.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.



Борис Евгенович Патон / Втсуп. ст. Н. К. Походня, В. К. Лебедев; Укладачі Л. В. Беляєва, Т. Б. Корольова, О. М. Лавріненко та ін. — К.: Наук. думка, 2008. — 620 с.

В книге освещены основные этапы жизни, научной, научно-организационной и общественной деятельности выдающегося украинского ученого в области сварки, металлургии и технологии металлов, материаловедения, выдающегося общественного деятеля и талантливого организатора науки, академика Национальной академии наук Украины, Академии наук СССР, Российской академии наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники УССР, дважды Героя Социалистического Труда СССР, Героя Украины, участника Великой Отечественной войны, ликвидатора аварии на ЧАЭС Бориса Евгеньевича Патона.

Указатель печатных работ знакомит читателя с научными трудами ученого. Для научных работников и всех, кто интересуется историей отечественной науки, техники.

