



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ТОМОГРАФИИ

О. Е. ЛЕВИЦКИЙ

*Рассматривается модельная задача восстановления пространственного распределения радиальных напряжений в стальном листовом образце с концентратором напряжений в виде цилиндрического штифта методом ультразвуковой (УЗ) реконструктивной томографии. Приводятся результаты теоретического анализа модельной задачи относительно получения расчетных соотношений для оценки радиальных напряжений в теле штифта и в окрестности границы штифт-плита, а также результаты экспериментальных исследований, проведенных на УЗ томографе UST-2000.*

*The paper analyses the model problem of restoration of the spatial distribution of radial stresses in a steel sheet sample with a stress raiser in the form of a cylindrical pin by the method of ultrasonic reconstructive tomography. Results of theoretical analysis of a model problem are given in relation to the calculated relationships for evaluation of radial stresses in the pin body and in the vicinity of pin-plate, as well as the results of experimental investigations, conducted in UST-2000 ultrasonic tomograph.*

Одной из наиболее актуальных технических проблем является проблема неразрушающего контроля (НК) напряженно-деформированного состояния материала конструкций на всех этапах монтажа, испытаний и эксплуатации. С этой целью используются разнообразные физические методы тензометрии (электрические, магнитные, рентгеновские и т.п.). В последние 10–15 лет интенсивно развиваются акустические, а особенно УЗ методы диагностики и оценки напряженно-деформированного состояния, которые базируются на эффекте акустоупругости [1–3].

Как известно, при внутренних или приложенных извне напряжениях материал, сам по себе изотропный, становится двоякопреломляющим. Физически это означает, что скорость поперечной УЗ волны, нормальной к направлению напряжения, разная в зависимости от того, направление ли его колебаний (поляризация) параллельно или перпендикулярно направлению напряжений. Хотя разность в скоростях, как свидетельствуют экспериментальные исследования, незначительна, однако характер изменения скоростей заметно различается. Согласно результатам экспериментальных исследований на листовых образцах из разных материалов, приведенных в итоговой работе по исследованию акустоупругости материалов [2], при одноосном сжатии закономерности характера изменения скорости поперечных УЗ волн с разной поляризацией можно сформулировать следующим образом:

1) *характер изменения скорости поперечных волн с ростом сжимаемых (растягивающих) напряжений для обеих поляризаций носит линейный характер;*

2) *если направление сжатия (напряжений) перпендикулярно направлению поляризации — скорость поперечной УЗ волны падает с ростом сжимаемых напряжений;*

3) *если направления сжатия (напряжений) и поляризации совпадают (лежат в параллельных плоскостях) — скорость поперечной УЗ волны возрастает с ростом сжимаемых напряжений.*

Для растягивающих напряжений характер зависимостей скорость–напряжение для случаев 2) и 3) имеют противоположный ход.

Полученные выводы касаются как листовых материалов с выраженной незначительной ортотропией свойств (листовые алюминиевые сплавы, листовая прокатная сталь), так и материалов без выраженной ориентации свойств (листовое оргстекло) [2, 3].

В последние годы широким фронтом ведутся работы по изучению возможностей применения методов УЗ вычислительной томографии (УЗВТ) как для исследования физико-механических свойств материалов до и после технологической обработки, так и для технической диагностики их состояния, в том числе напряженно-деформированного [4–7].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по восстановлению поля радиальных напряжений методом реконструктивной УЗВТ с использованием наклонного зондирования зоны напряжений поперечными УЗ волнами с вертикальной поляризацией.

**Контрольный образец.** Эксперименты проводились на контрольном образце из листовой стали марки Ст3 в виде прямоугольной плиты из плоскопараллельными поверхностями и стандартными для данных исследований размерами 600×450×28 мм. Для моделирования в материале радиальных нап-

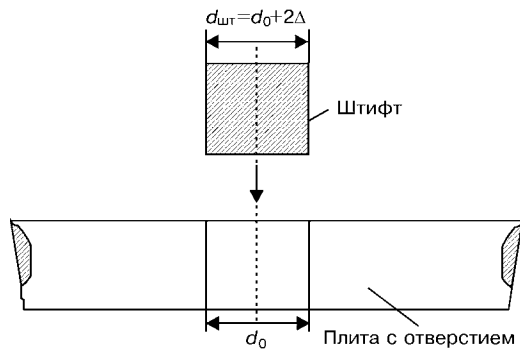


Рис. 1. Плита с цилиндрическим штифтом

ряжений в исследуемой плите (в ее центральной зоне) был вставлен с натяжением сплошной цилиндрический штифт (рис. 1). Материал штифта тот же, что и материал плиты. Для этого в плите низкооборотным сверлом просверлено отверстие диаметром  $d_0$ , в которое вставлен сплошной цилиндр, диаметр которого несколько превышает диаметр отверстия —  $d_{шт} = d_0 + 2\Delta$ . Установление штифта проводили тепловым способом. Технологически изготовление модельного образца проводили по следующей схеме.

Плита с отверстием  $d_0 = 30$  мм предварительно равномерно нагревалась по периферийной области от отверстия до температуры порядка  $195^\circ\text{C}$ ; после чего в отверстие вставлялся цилиндрический штифт диаметром  $d_{шт} = 30 + 0,1$  мм, охлажденный до температуры  $10^\circ\text{C}$ . Такой температурный режим был выбран из расчета обеспечения свободной посадки (без прикладывания внешних усилий) штифта в отверстие плиты. После остывания плиты по поверхности соприкосновения возникает контактное давление, которое является внешним (сжимаемым) для материала штифта и внутренним (растягивающим) для материала плиты в окрестности отверстия. В результате возникают радиальные напряжения в окрестности поверхностей соприкосновения.

**Анализ модельной задачи.** Для предварительной оценки качественной картины распределения радиальной составляющей напряжений, которые возникают в данном случае в окрестности границ контакта плита–штифт, и сравнения его с экспериментальными данными пространственного рас-

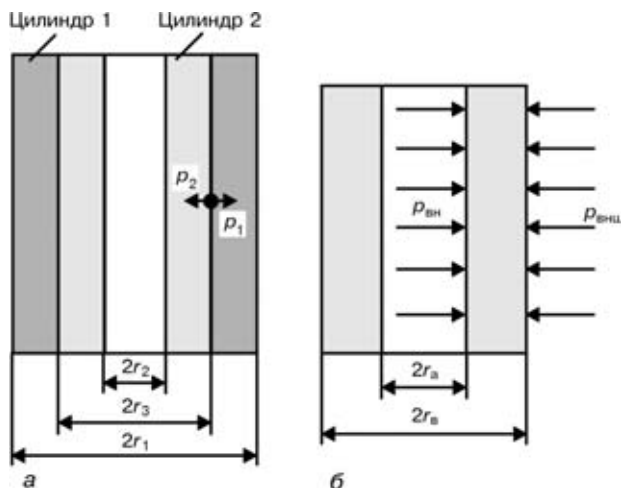


Рис. 2. Расчетная модель составного цилиндра

пределения скоростей УЗ волн в этой зоне плиты, полученных в результате 3D-реконструкции по данным УЗ прозвучивания, был проведен теоретический анализ модельной задачи плита–штифт с целью получения соответствующих расчетных соотношений. Для получения расчетных соотношений для напряжений в окрестности границ штифт–плита была использована модельная задача расчета напряжений для случая составного толстостенного цилиндра: цилиндр изготовлен из двух толстостенных цилиндров, вставленных один в другой (рис. 2). При этом внешний диаметр внутреннего цилиндра  $d_2$  несколько больший (на величину  $2\Delta$ ) внутреннего диаметра внешнего цилиндра.

В такой постановке модельной задачи для определения распределения основных составляющих напряжений (радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_\theta$ ) можно использовать известные соотношения для упомянутых выше напряжений, полученные для случая толстостенного цилиндра, на стенки которого действуют внутреннее и внешнее давления  $P_{вн}$  и  $P_{внш}$  (см. рис. 2, б) [8].

Общеизвестно, что если вставить один цилиндр во второй с натяжением, то на границе соприкосновения цилиндров возникают усилия, которые вызывают начальные напряжения. Последние определяются исключительно контактным давлением  $p_0$ , что возникает по границе стыка цилиндров. Можно заметить (рис. 2, а), что это давление будет внешним для цилиндра 2 и внутренним для цилиндра 1. Таким образом, задача сводится к расчету напряжений в толстостенном цилиндре для двух случаев давления:

1 случай — на цилиндр 2 действует внутреннее давление  $p_1 = p_0$ ;

2 случай — на цилиндр 1 действует внешнее давление  $p_2 = p_0$ .

Для корректности, а также наглядности рассмотрим решение модельной задачи поэтапно.

I этап — получаем необходимые соотношения для основных составляющих напряжений в случае простого толстостенного цилиндра (см. рис. 2, б):

$$\sigma_r = \frac{p_2 r_a^2 - p_1 r_b^2}{r_b^2 - r_a^2} - \frac{(p_2 - p_1) r_a^2 r_b^2}{(r_b^2 - r_a^2) r^2},$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_2 r_a^2 - p_1 r_b^2}{r_b^2 - r_a^2} - \frac{(p_2 - p_1) r_a^2 r_b^2}{(r_b^2 - r_a^2) r^2},$$

где  $p_1 = p_{внш}$ ,  $p_2 = p_{вн}$ .

II этап — из рассмотрения модели составного цилиндра на основе соотношений (1) находим величину начального давления  $p_0 = p_3$  за счет положительной разности диаметров внешнего цилиндра 1 и внутреннего цилиндра 2 ( $d_{2звн} - d_{1вн} = 2\Delta$ ):

$$p_3 = E \frac{\Delta d_3 (r_1^2 - r_3^2) (r_3^2 - r_2^2)}{4 r_3^3 (r_1^2 - r_2^2)}.$$

Здесь обозначения те же, что и на рис. 2, а;  $E$  — модуль Юнга.

III этап — используя найденное соотношение для величины  $p_0 = p_3$ , по формулам (1) находим расчетное значение радиальной составляющей напряжений в стенке каждого из цилиндров.

**Внутренний цилиндр.** Чтобы получить соотношение для радиальной составляющей напряжений в соотношения (1) надо подставить следующие параметры:  $p_2 = 0$ ;  $r_1 = r_3$ ;  $p_1 = p_3$ . В результате получим:

$$\sigma_{r_2} = -\frac{p_3 r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[ 1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right]. \quad (3)$$

**Внешний цилиндр.** В этом случае в соотношения (1) необходимо подставить  $p_2 = p_3$ ;  $r_2 = r_3$ ;  $p_1 = 0$ . Получаем:

$$\sigma_{r_1} = -\frac{p_3 r_3^2}{r_3^2 - r_1^2} \left[ 1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right]. \quad (4)$$

IV этап — адаптация полученных соотношений для случая «сплошного цилиндрического штифта в плите», что можно представить в виде толстостенного виртуального цилиндра ( $r_1 \rightarrow \infty$ ), в который вставлен сплошной цилиндр радиусом  $r_3$  ( $r_2 \rightarrow 0$ ). Очевидно, что расчетное соотношение для радиальной составляющей напряжений, которые возникают в теле цилиндра, можно получить из соотношения (3), если положить  $r_2 = 0$  (внутренний радиус внутреннего цилиндра равен 0). Отсюда получаем:

$$\sigma_{r_3} = -p_3. \quad (5)$$

Как видим, по всему сечению штифта величина напряжений постоянна и равна величине давления  $p_3$  с обратным знаком, которое возникает на его внешней поверхности, т. е. это — чистое упругое сжатие материала штифта.

Что касается окрестности плиты, которая примыкает извне к штифту, то ее (окрестность), в принципе, можно представить в виде условного цилиндра с внутренним радиусом  $r_3$  и некоторым условным внешним радиусом  $r_1$ . Тогда составляющие напряжений в стенке этой трубы (здесь стенка трубы представляет некоторую окрестность, которая примыкает извне к штифту с условной шириной  $(r_1 - r_3)$  в первом приближении можно оценить согласно полученным выше соотношениям. Для этого из (2) определим величину начального давления  $p_3$  при условии  $r_2 = 0$  и подставим полученное соотношение в формулу (4). В результате получаем:

$$\sigma_{r_1} = -\frac{E}{2} \delta r_3 \frac{r_3^2}{(r_3 + \Delta r)^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta r$  — расстояние от поверхности цилиндрического штифта в радиальном направлении в теле внешней трубы.

Эпюра радиальной составляющей напряжений приведена на рис. 3.

**Результаты экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования проводили на образце УЗ вычислительного томографа UST-

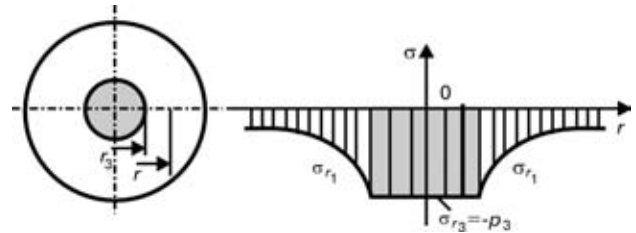


Рис. 3. Эпюра радиальной составляющей напряжений

2000, разработанного в Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАНУ для исследований пространственного распределения (ПР) физико-механических характеристик материалов методом реконструктивной УЗ томографии. Сканирование образца проводили многоканальным томографическим УЗ блоком поперечных волн с вертикальной поляризацией. Схема прозвучивания — зеркально-теневая с углом ввода УЗ колебаний  $\beta = 59^\circ$  на рабочей частоте 2,5 МГц. Сканирование проводили по полю  $320 \times 240$  мм с шагом 5 мм.

На рис. 4 представлены основные томографические изображения для модельного образца, полученные после 3D-реконструкции. Вертикальные сечения  $b$  и  $в$  проходят через координаты центра зоны штифта, как показано на рис. 4,  $г$ . На томографических изображениях четко проявился локальный контраст в пространственном распределении изменения медленности  $\delta B \%$  ( $B$  — величина, обратная скорости), который по геометрии размещения и форме полностью отвечает геометрическому размещению и форме тела штифта в плите.

На рис. 5 приведены графики распределений вдоль координаты  $x$  относительного изменения медленности распространение УЗ поперечной волны  $\delta B \%$  в плоскости центрального сечения  $XO$  (рис. 4,  $б$ ) для двух разных глубин  $z$ . Видно, что полученные графики в первом приближении качественно повторяют эпюру радиальной составляющей напряжений для центрального сечения штифта, показанную на рис. 3: в зоне штифта изменение скорости максимальное и имеет отрицательный знак; от границ тела штифта величина изменения скорости спадает (в первом приближении по закону  $1/x$ ) по мере увеличения расстояния от этих границ, которая качественно совпадает с ходом эпюры радиальной составляющей, полученной аналитически (рис. 3,  $б$ ).

С целью качественного сравнения характера изменений радиальной составляющей напряжений и величины скорости распространения УЗ волны в областях слева и справа от границы тела штифта на рис. 6 приведены совмещенные графики этих зависимостей, предварительно пронормированных по оси ординат к 1. Видна совместимость кривых соответствующих зависимостей в границах допустимой погрешности, вызванной «начальным фоном» медленности, что существовал в материале плиты до посадки цилиндрического штифта.

Для проверки достоверности полученных результатов по томографическому восстановлению картины распределения радиальных напряжений были проведены эксперименты на аналогичном модельном образце с цилиндрическим штифтом диаметром 16 мм, изготовленными из стали Ст20.

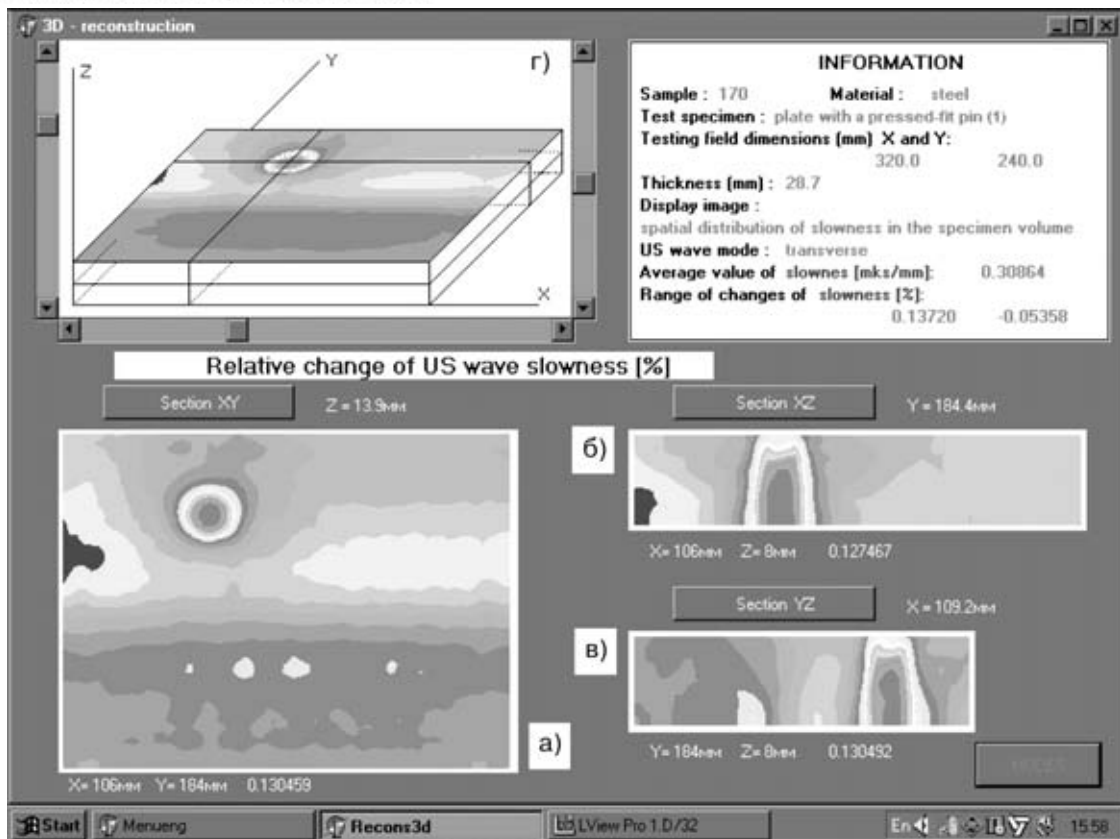


Рис. 4. 3D-изображения ПР относительного изменения медленности в объеме поля прозвучивания сечений: горизонтального XY (а), вертикального XZ (б); вертикального YZ (в), геометрия сечений (z)

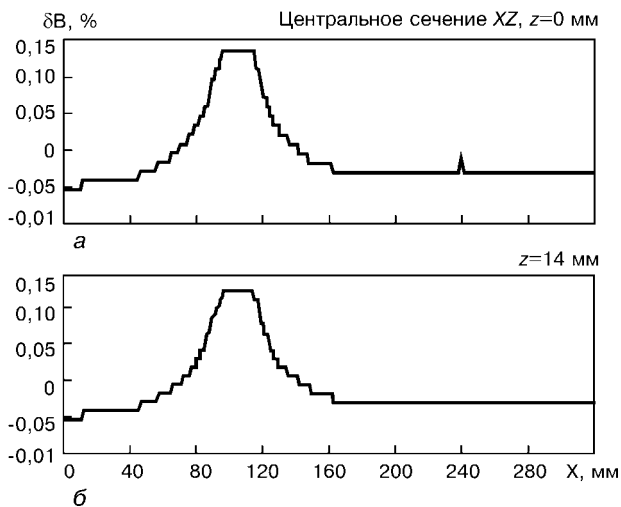


Рис. 5. Графическая зависимость изменения относительной величины медленности вдоль координаты X по высоте центрального вертикального сечения в зоне напряжений

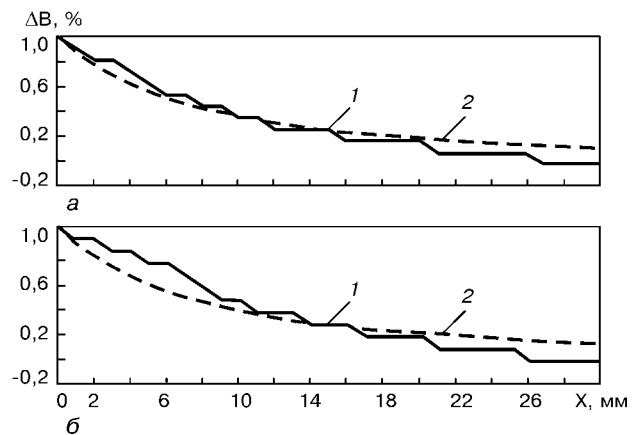


Рис. 6. Совмещенные графики пронормированных зависимостей относительного изменения медленности  $\delta B$  и напряжений  $\sigma_r$  в материале плиты: а — справа от края границы; б — слева от края границы штифт–плита; 1 — изменение медленности согласно экспериментальным данным; 2 — изменение напряжений согласно расчету модельной задачи

Данный модельный образец отличался от предшествующего тем, что посадка цилиндрического штифта проводилась способом запрессовки с предшествующим нагревом плиты до температуры порядка 100 °С. Ниже представлены характерные результаты для образца с диаметром цилиндрического штифта 16 мм.

На рис. 7 приведены реконструированное 3D-изображение пространственного распределения относительного изменения медленности поперечных УЗ колебаний в характерных сечениях объема образца в исследуемой зоне штифт–плита:

- а) горизонтальное сечение  $XOY$  на глубине  $z = 0$  (плоскость донной поверхности образца);
- б) центральное сечение  $XOZ$ ;
- в) центральное сечение  $XOY$ ;

Геометрия сечений показана на рис. 7, z.

На рис. 8 приведены графики распределения относительного изменения медленности поперечных УЗ колебаний в центральном сечении  $XOZ$  вдоль координаты X для двух разных значений глубины z, полученных на основе томографического изображения центрального сечения (рис. 7, б).

Анализ пространственной динамики изменения скорости поперечной УЗ волны в разных гори-

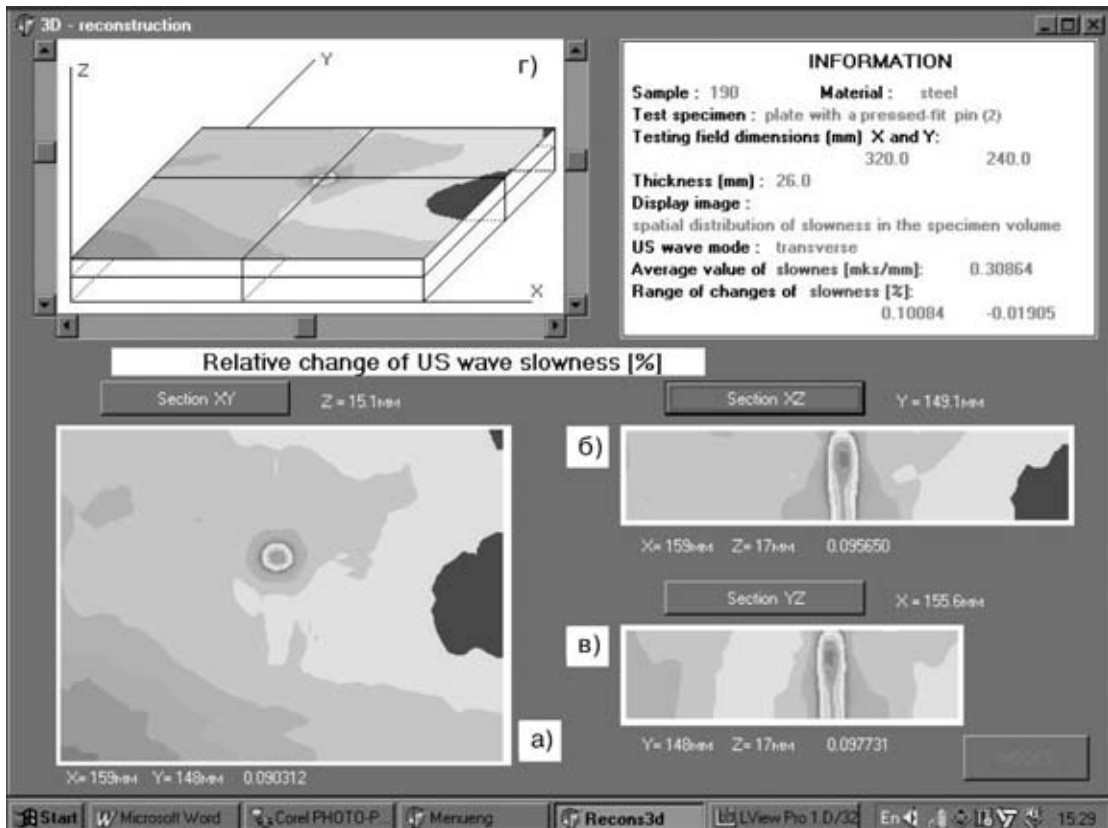


Рис. 7. 3D-изображения ПР относительного изменения медленности в объеме поля прозвучивания образца 2: а — горизонтальное сечение XY; б — вертикальное сечение XZ; в — вертикальное сечение YZ; z — геометрия сечений

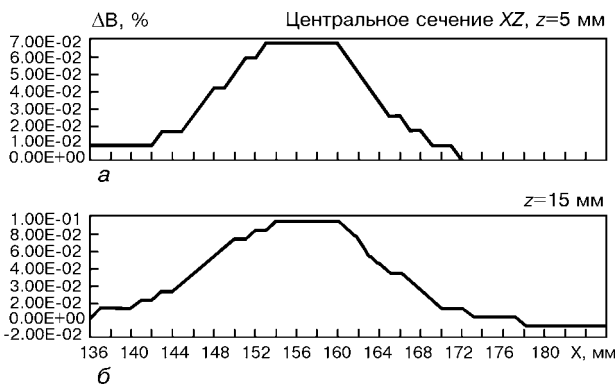


Рис. 8. Зависимости изменения медленности в центральном сечении XOZ по координате X для разных глубин z от донной поверхности

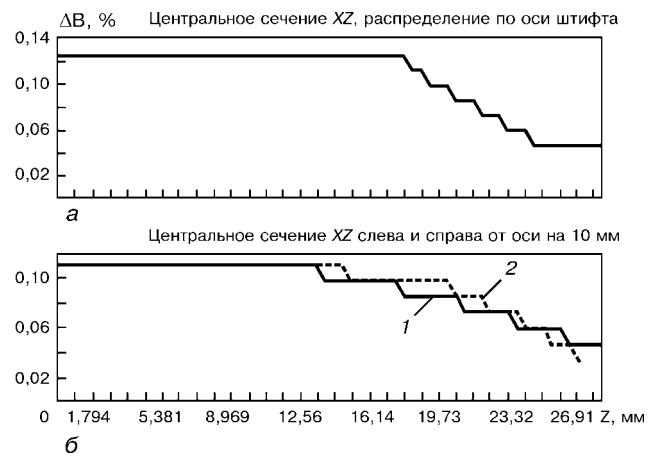


Рис. 9. Зависимости относительного изменения медленности в зоне вертикального центрального сечения ZX: а — по оси Z цилиндрического штифта; б — слева (1) и справа (2) от оси Z на 10 мм

горизонтальных сечениях области наведенных напряжений в модельном образце согласно приведенным томографическим изображениям и полученным на основе их графическим зависимостям показывает, что эти изменения довольно точно повторяют зависимости пространственных изменений радиальной составляющей напряжений как в зоне штифта, так и в зоне плиты, полученные теоретически из анализа расчетной модели штифт-плита. В зоне тела штифта величина изменения скорости относительно среднего значения скорости поперечной УЗ волны максимальна и имеет отрицательный знак. Последнее, собственно, отвечает характеру изменения поперечной УЗ волны с вертикальной поляризацией.

Распределение отклонения скорости от среднего значения по плите в горизонтальных сечениях имеет осесимметричный характер (рис. 4, а, рис. 7, а),

причем, в области, которая отвечает телу собственно штифта величина отклонения скорости постоянна, а в области, которая отвечает телу собственно плиты, величина отклонения скорости спадает по мере удаления от границ штифта по закону  $1/x$ , т. е. значение скорости УЗ волн за пределами зоны действия напряжений стремится к своему стационарному (среднему) значению.

Однако следует отметить, что в полученных томограммах центральных сечений зоны напряжений (см. рис. 4, б, в) наблюдается некоторая неоднородность распределения в верхней части тела штифта, а собственно спад относительного изменения медленности по ординате z.



На рис. 9 приведены графические зависимости относительной величины медленности  $\delta B$  % вдоль координаты  $z$ : по оси симметрии штифта (рис. 9, а), по левую сторону и по правую сторону от оси штифта на 10 мм (рис. 9, б), полученных на основе приведенных выше томограмм центральных сечений. Как видно из приведенных графиков, величина относительного изменения  $\delta B$  % в зоне тела штифта, которая прилегает к верхней поверхности плиты, несколько меньше, чем в донной зоне. Наиболее вероятное объяснение этому — артефакты восстановления, вызванные зеркально-теневой схемой сканирования при одноракурсном прозвучивании.

Для проверки этого предположения проводилось дополнительное томографическое сканирование модельных образцов из противоположной поверхности — донной (для этого образец был повернут на  $180^\circ$  относительно горизонтальной оси  $X$ ). После реконструкции получили томографические изображения, полностью идентичные соответственно изображениям на рис. 4 и 7. Таким образом, высказанное предположение несовершенства одноракурсного сканирования подтвердилось, т. е. «проблема конуса» [9] в случае толстолистовых изделий проявляется как в пространственной области, так и в области пространственных частот (потеря части пространственного спектра возобновляемого объекта в области пространственных час-

тот, которая образует пространственный конус по оси  $z$  с вершиной в нуле и углом в вершине  $90^\circ - \beta$ , где  $\beta$  — угол ввода УЗ колебаний).

1. Бобренко В. М., Вангели М. С., Куценко А. Н. Акустическая тензометрия (Теория и практика). — Кишинев: Штиинца, 1991. — 202 с.
2. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах // Прикладная механика. — 2000. — 36, № 9. — С. 3–34.
3. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустопругость. — Киев: Наук. думка, 1977. — 152 с.
4. Кошовый В. В., Кривин Е. В., Романишин И. М. Ультразвуковая обчислювальна томографія в задачах неруйнівного контролю та технічної діагностики // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1997. — № 5. — С. 31–42.
5. Harting M., Steindl R. Visualization of a Three Dimensional Residual Stress State with Depth Resolution / Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics. International Conference (CM NDT). November 21–24, 1995. — Minsk, Belarus. — Proceedings. — P. 132.
6. Kazys R., Mazeika L., Jasiumiene E. Ultrasonic Tomography of Objects with Non-Planar Boundaries / 15-th World Conference on Non-Destructive Testing. Rome (Italy), 15–21 October 2000. — Proceedings on CD. — IDN 247. — 4 p.
7. Nazarchuk Z. T., Koshovy V. V., Krivin E. V., Romanishyn I. M. Ultrasonic Tomography Technologies for NDT and Monitoring of Material Degradation / In book: Proc. of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting, 10–12 March 1999, Petten, Netherlands / Edit. U. von Estorff, L. M. Davies, P. Trampus. — Luxemburg, 1999. — P. 79–89.
8. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Физматгиз, 1959. — 856 с.
9. Chin M., Barrett M., Simpson R. G. et al. Three-dimensional radiographic imaging with a restricted view angle // JOSA. — 69, № 10. — P. 1323–1333.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,  
г. Львов

Поступила в редакцию  
19.05.2003

### УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

**Приглашаем Вас и Ваших сотрудников принять участие в работе ежегодных научно-практических конференций, семинаров, круглых столов, выставок, организуемых Украинским Информационным Центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» под научным руководством известных ученых и специалистов Украины, России, Беларуси**

ЦЕНТР опирается на многолетний опыт его сотрудников и поименный банк данных, собранных кропотливым трудом в течение 20-летней деятельности по проведению конференций в Украинском Доме экономических и научно-технических знаний и двухлетней самостоятельной работы центра.

**ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МЕРОПРИЯТИЙ** — обмен научно-технической информацией, выявление наилучших результатов практической деятельности и их распространение в промышленности, обобщение опыта производства в условиях информационной разобщенности производителей, ученых и специалистов.

**ЦЕНТР ПРЕДЛАГАЕТ:** участие, очное и заочное, в работе Международных конференций и выставок (перечень прилагается); организацию бизнестуров на международные конференции и выставки дальнего зарубежья (план формируется); проведение презентаций предприятий и организаций в рамках конференций; издание сборников материалов конференций; организацию

издания лучших докладов в профессиональных журналах Украины, России, Беларуси.

#### Перечень проводимых мероприятий:

- Одинадцатый ежегодный международный семинар-выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ».

*Место и время проведения:* г. Ялта, 6–10 октября 2003 г.

- Десятая юбилейная научно-практическая конференция «ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ» в рамках выставки «Машпром».

*Место и время проведения:* г. Днепропетровск, октябрь 2003 г., ЭКСПОЦЕНТР «Метеор».

#### Подробные сведения можно запросить:

тел./факс: (044) 573–30–40; e-mail: office@conference.kiev.ua;  
glavackaya@softhome.net