

А. Н. Гузь

**ОБ УЛЬТРАЗВУКОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ МЕТОДЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ И
В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МАТЕРИАЛОВ:
ФОКУС НА УКРАИНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (ОБЗОР)**

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. П.Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: guz@carrier.kiev.ua*

Abstract. The results of justification, development, and application of ultrasonic non-destructive methods of stresses analysis in structural members and in near-the-surface layers of materials on the base of Ukrainian research are briefly discussed (summarized). A peculiarity of Ukrainian research is creation of above mentioned methods of stresses analysis as applied to the triaxial (including biaxial and uniaxial) stresses, the majority of research of other countries is devoted to creation of these methods of stresses analysis as applied to the uniaxial stresses only. The ultrasonic non-destructive methods of stresses analysis are based on the regularities of waves propagation in solids with initial (residual) stresses, including the regularities of Rayleigh waves propagation.

Key words: Ultrasonic nondestructive methods; triaxial and biaxial stresses; structural members; near-the-surface layers; materials; regularities of wave propagation in solids with initial (residual) stresses; sptimoshenko institute of mechanics; eopaton institute of electric welding.

1. Введение.

В настоящее время ультразвуковые неразрушающие испытания (UNDT, ultrasonic nondestructive testing) являются широко развитым и общепризнанно актуальным направлением фундаментального и прикладного характера, многочисленные результаты которого активно применяются в различных областях естествознания и техники. По UNDT ежегодно проводятся различные научные и научно-технические конференции; при этом полученные результаты публикуются в ряде журналов, относящихся к различным аспектам естествознания и техники, а также в трудах конференций и исследовательских центров.

Одной из наиболее актуальных и активно разрабатываемых частей или общих проблем UNDT является развитие ультразвуковых неразрушающих методов определения напряжений в деформируемых твердых телах – в элементах конструкций и материалах, включая приповерхностные слои материалов; указанные исследования будем обозначать следующим образом: UNDM (ultrasonic nondestructive methods of stresses analysis). Физической основой для развития UNDM являются закономерности распространения упругих волн в материалах с начальными (остаточными) напряжениями, которые исследуются и выявляются в рамках трехмерной линеаризованной теории распространения упругих волн в телах с начальными напряжениями (TLTPEW in BIS, three-dimensional linearized theory of propagation of elastic waves in bodies with initial stresses). В настоящее время для разработки UNDM применяются закономерности распространения продольных и поперечных волн в бесконечных телах и волн Рэлея в приповерхностных слоях материала, при этом указанные закономерности относятся к TLTPEW in BIS.

Обсуждаемые UNDM предназначены для измерения напряжений различного характера (действующие, остаточные, технологические, предварительные, эксплуатационные, сборочные, начальные и другие напряжения). Указанные напряжения должны рассматриваться как *начальные* или *остаточные* напряжения при применении TLTPREW in BIS (например, монографии [1, 3]). В этом случае *возмущения* (напряжений и перемещений в рамках TLTPREW in BIS [1, 3]) *возникают в результате ультразвуковых колебаний*, которые возбуждаются в материалах и элементах конструкций. Вышеуказанный подход, по-видимому, является общепринятым в мировой научной и технической литературе. Такой подход применяется для разработки различных вариантов UNDM в ряде научно-технических центров во всем мире, включая и Национальную академию наук Украины (НАНУ, NASU).

В настоящее время многочисленные монографии и отдельные статьи публикуются в различных странах как применительно к проблемам UNDM, так и применительно к проблемам TLTPREW in BIS. В список литературы к настоящей статье включены лишь основные публикации ученых Украины в соответствии с названием статьи. Все же широко известные в мировой научной и научно-технической литературе публикации по рассматриваемым проблемам включены в списки литературы в монографии и обзорные статьи, указанные в списке литературы к настоящей статье; так, например, список литературы имеет 249 публикаций в [1, т. 2], 372 публикации в [3], 187 публикаций в [19] и 103 публикации в [29].

Уже около 45 лет назад специалисты Института механики им. С.П.Тимошенко НАНУ и Института электросварки им. Е.О.Патона НАНУ начали проводить совместные исследования по разработке и развитию основ UNDM применительно к определению напряжений в элементах конструкций и в материалах. Указанные совместные исследования были организованы таким образом, что *теоретические* исследования проводились, в основном, в Институте механики с участием специалистов Института электросварки и *экспериментальные* исследования проводились в Институте электросварки с участием специалистов Института механики. Представляется, что статьи [30, 31] были первыми публикациями по совместно полученным результатам; вышеуказанные и другие публикации были включены в совместные монографии [7, 8] по UNDM. В список литературы монографии [7] включены совместные статьи в периодических и специальных изданиях за 1970 – 1976 гг. В последующие годы ряд совместных статей были опубликованы в периодических и специальных изданиях; например, статья [9] была посвящена UNDM применительно к сварным элементам конструкций, включая и определение трехосных напряжений. Совместные статьи, опубликованные в периодических и специальных изданиях в 1970 – 2003 гг., были включены в списки литературы в монографиях [1, 3, 6], которые, в значительной мере, посвящены TLTPREW in BIS. Краткая информация о вышеотмеченных совместных результатах специалистов двух Институтов представлена в обзорных статьях [20] за 2005 г., [23] за 2010 г. и [24] за 2011 г., которые также использованы при написании настоящей обзорной статьи.

В совместных исследованиях сотрудников Института механики и Института электросварки разработаны UNDM определения напряжений в толстостенных и тонкостенных элементах конструкций и в приповерхностных слоях материала. *Характерной особенностью* вышеуказанных совместных исследований применительно к *элементам конструкций* является создание UNDM определения *трехосных напряжений*, включающего, как частный случай, определения двухосных и одноосных напряжений; *большинство же разработок зарубежных* научно-технических центров связано с созданием UNDM определения *только одноосных напряжений*. *Характерной особенностью* вышеуказанных совместных исследований применительно к *анализу напряжений в приповерхностных слоях материала* является создание UNDM определения *двухосных напряжений*, включающего, как частный случай, определение и одноосных напряжений; *большинство же разработок зарубежных* научно-технических центров связано с созданием UNDM определения *только одноосных напряжений*.

Результаты совместных исследований специалистов Института механики им. С.П.Тимошенко НАНУ и Института электросварки им. Е.О.Патона НАНУ представлены мировому научному сообществу на английском и русском языках. Так, эти результаты широко представлены в многочисленных публикациях в периодических и специальных изданиях; в качестве примера можно указать публикации [9, 21, 23, 24,

30, 31], которые включены в список литературы настоящей обзорной статьи. Кроме того, на основе совместных исследований опубликованы монографии [6, 7], которые полностью посвящены UNDM для материалов и элементов конструкций и в списки литературы включены соответствующие совместно опубликованные статьи наряду с публикациями других авторов по рассматриваемой тематике. Обсуждаемые совместные научные результаты также включены в монографии [1, 3, 6], которые посвящены различным проблемам TLTPЕW in BIS. Совместные результаты также были представлены в 1978 – 2005 гг. на различных международных конгрессах и конференциях и опубликованы в трудах этих конгрессов и конференций [27, 12 – 15, 17, 21]. Также следует отметить, что в обобщающей обзорной статье [29] представлен краткий современный анализ результатов по созданию UNDM определения напряжений в материалах и элементах конструкций, которые получены и опубликованы в мировой научной и научно-технической литературе к началу III-го Тысячелетия, включая и результаты специалистов Украины.

Обсуждаемые совместные результаты специалистов Украины по созданию UNDM определения напряжений, которые представлены в публикациях [1, 3, 6 – 9, 12 – 15, 17, 20, 21, 23, 24, 27, 29 – 31] и в других публикациях, были получены на основе *закономерностей* TLTPЕW in BIS; достаточно строгий и последовательный вариант TLTPЕW in BIS развит в монографиях [1, 3, 4, 6], а современный анализ полученных результатов по TLTPЕW in BIS изложен в обзоре [20]. Обсуждаемый вариант TLTPЕW in BIS [1, 3, 4, 6] для сжимаемых и несжимаемых материалов имеет следующие особенности: основные соотношения были сформулированы в общем виде для теории конечных (больших) начальных деформаций, а также для первого и второго вариантов теории малых начальных деформаций; общие проблемы (вариационные принципы, общие решения в случае однородных начальных состояний и т.д.) были построены; основные результаты были получены для материалов с упругими потенциалами общей структуры. Следует отметить, что родственный вариант трехмерной линеаризованной теории устойчивости деформируемых тел (TLTDBS, three-dimensional linearized theory of deformable bodies stability) изложен в монографиях [2, 16], а современный анализ полученных результатов по TLTDBS изложен в обзоре [18]. Краткие исторические очерки по развитию исследований представлены по TLTDBS в монографиях [2, 16] и в обзорной статье [18], по TLTPЕW in BIS в монографии [3] и в обзорной статье [19] и по UNDM определения напряжений в монографиях [7, 8] и в обзорной статье [29].

В заключительной части Введения в настоящую статью целесообразно привести дополнительную информацию, относящуюся к формированию названия статьи и к процессу подготовки статьи.

В настоящее время в научной литературе по механике, по-видимому, установилось *два подхода*, относящихся к формированию названий обзорных статей.

При *первом подходе* название обзорной статьи соответствует краткому и информативному названию научной или научно-технической проблемы, анализу которой с учетом уже опубликованных результатов посвящена рассматриваемая обзорная статья. Отмеченный подход получил распространения в публикациях англоязычных журналов, например публикации [34, 10, 22, 24] и ряд других, и в публикациях русскоязычных журналов, которые переводятся на английский язык, например, публикации [25, 28, 33] и ряд других. При такой ситуации в большинстве случаев молчаливо понимается, что анализ рассматриваемой проблемы проводится с учетом всех публикаций мирового научного сообщества.

Второй подход при формировании названий обзорных статей применяется, в основном, в ряде публикаций общеизвестного журнала «Applied Mechanics Reviews», который издается в США и который на протяжении многих десятилетий публикует ежегодно значительное число обзорных статей. При таком подходе названия обзорных статей состоят из двух частей, которые разделены двоеточием (значком «:»). В этом случае первая часть названия формируется так же, как и при применении первого подхода; вторая часть названия статьи включает дополнительную информацию, относящуюся к детализации проведения анализа рассматриваемой проблемы, сформулированной в первой части названия. В качестве детализации может выступать выделе-

ние отдельной части сформулированной проблемы, указание временного интервала, в котором рассматриваются публикации, указанием региона, в котором получены обсуждаемые результаты, и т.д. В качестве применения второго подхода при формировании названий обзорных статей можно указать следующие публикации в журнале «Applied Mechanics Reviews» [11] за 1986 г., [37] за 1992 г., [36] за 1995 г., [26, 32] за 1998 г. и [35] за 2002 г.

В настоящей обзорной статье при формировании названия статей применялся второй вышеотмеченный подход. Так в название настоящей статьи включена фраза «Фокус на украинские исследования», которая акцентирует внимание читателей на том, что обзор посвящен *не анализу* результатов, полученных *во всем мире* по рассматриваемому научному направлению, *а анализу* результатов, полученных *в отдельном регионе* (в данном случае, в Украине) по рассматриваемому научному направлению. Основанием для отмеченного выделения результатов, полученных в отдельном регионе по рассматриваемому научному направлению, является ситуация, что в рассматриваемом регионе (в данном случае, в Украине) получены результаты в более общем виде по сравнению с другими научными центрами мира, что достаточно подробно изложено выше в настоящем Введении.

При подготовке настоящей статьи сложилась следующая ситуация. В 2010 г. журнал «Journal of Physical Science and Application» пригласил написать для этого журнала статью по UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов; указанная статья была подготовлена и опубликована [24] в этом журнале в 2011 г. После публикации [24] журнал «Frontiers of Engineering Mechanics Research» в 2012 г. пригласил автора настоящей статьи подготовить статью по UNDM определения напряжений также для вышеуказанного журнала; такая статья была подготовлена и направлена в журнал. На заключительном этапе подготовки статьи к печати между автором статьи и сотрудниками указанного журнала возникли разногласия. В связи с этим автор статьи посчитал целесообразным представить статью также для опубликования в журнал «Прикладная механика – International Applied Mechanics» с расширением информационной части во Введении и конкретных результатов, так как указанный журнал традиционно публиковал статьи по рассматриваемому научному направлению, что следует также из списка литературы к настоящей статье.

С учетом вышеизложенной информации можно считать, что в настоящей статье в краткой форме представлена информация об обосновании, разработке и применении UNDM определения напряжений в элементах конструкций и приповерхностных слоях материалов; в статье представлены *только результаты специалистов Украины* в соответствии с названием статьи, при этом обоснование указанного формирования статьи представлено выше в настоящем Введении. Рассматриваемый подход в UNDM предназначен для сравнительно жестких материалов (металлы, сплавы и подобные материалы); все рисунки настоящей статьи приняты из публикаций, представленных в списке литературы.

2. Основы метода.

Основы UNDM определения напряжений в элементах конструкций и приповерхностных слоях материала включают следующие позиции: вариант TLTPWEW in BIS в общей форме для теории больших (конечных) начальных деформаций и двух (первого и второго) вариантов теории малых начальных деформаций; приборы для ультразвуковых измерений; доказательство применимости рассматриваемого варианта TLTPWEW in BIS для описания экспериментальных результатов.

2.1. Краткая информация о рассматриваемом варианте TLTPWEW in BIS. Все соотношения рассматриваемого варианта TLTPWEW in BIS получены посредством линеаризации соответствующих результатов нелинейной динамической теории упругости для случаев конечных и малых деформаций.

2.1.1. Принципы построения теории. Рассматривается три состояния гиперупругих материалов. *Первое* состояние соответствует естественному состоянию (напряжения и деформации отсутствуют). *Второе* состояние соответствует начальному или остаточному состоянию (все величины этого состояния отмечены индексом «0»). *Третье* состояние соответствует возмущенному состоянию. Все величины третьего состояния представляют собой суммы величин второго состояния и возмущений со-

ответствующих величин, при этом возмущения дополнительно не отмечаются никаким индексом. Принимается, что возмущения являются существенно меньшими величинами по сравнению с соответствующими величинами второго состояния, и проводится процедура линеаризации.

Вышеуказанный подход рассмотрим на примере произвольных величин x и y , а также соотношения $y = f(x)$ нелинейной теории упругости. Указанные величины и соотношение для второго состояния имеют следующий вид:

$$y_0, x_0, y_0 = f(x_0). \quad (1)$$

Эти величины и соотношение для третьего состояния можно записать в виде

$$y_0 + y; x_0 + x; y_0 + y = f(x_0 + x). \quad (2)$$

Неравенства для возмущений представляются в следующем виде:

$$|y_0| \gg |y|; |x_0| \gg |x|. \quad (3)$$

Линеаризируя (2) и принимая во внимание (3), для возмущений приближенно получаем следующее соотношение:

$$y = \left[\left(\frac{df}{dx} \right)_{x=x_0} \right] x. \quad (4)$$

Все соотношения TLTPЕW in BIS были получены в соответствии с выражением (4) в единой общей форме для теории больших (конечных) начальных деформаций и двух вариантов теории малых начальных деформаций; детальная дополнительная информация по рассматриваемому вопросу представлена в монографиях [1, 3].

В общем случае изотропного гиперупругого сжимаемого материала упругий потенциал принимается в следующей форме:

$$\Phi = \Phi(A_1, A_2, A_3); A_1 = \varepsilon_{nn}; A_2 = \varepsilon_{nm} \varepsilon_{mn}; A_3 = \varepsilon_{nm} \varepsilon_{mk} \varepsilon_{kn}. \quad (5)$$

2.1.2. Основные соотношения. Основные соотношения рассматриваются в прямоугольных лагранжевых координатах y_n ($n = 1, 2, 3$), которые вводятся во втором состоянии (начальное или остаточное напряженно-деформированное состояние). В этом случае уравнения движения для сжимаемых материалов имеют вид (уравнения (2.315) [3])

$$\left(\frac{\partial}{\partial y_i} \omega'_{ij\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial y_\beta} - \rho' \delta_{ja} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right) u_\alpha = 0 \quad (y_n \in V'). \quad (6)$$

Граничные условия в напряжениях на поверхности S'_1 имеют следующую форму:

$$Q'_j = P'_j; y_n \in S'_1; Q'_j \equiv N_i^0 \omega'_{ij\alpha\beta} \frac{\partial u_\alpha}{\partial y_\beta}. \quad (7)$$

Обозначения: N_j^0 – компоненты орта нормали к поверхности S'_1 во втором состоянии; P'_j – компоненты вектора внешней нагрузки также во втором состоянии.

В общем случае компоненты тензора ω' представляются следующими выражениями:

$$\omega'_{ij\alpha\beta} = \omega'_{ij\alpha\beta}(\Phi_0, \sigma_{nm}^0). \quad (8)$$

Обозначения: Φ_0 – упругий потенциал (5) во втором состоянии; σ_{nm}^0 – начальные или остаточные напряжения; выражения (8) для упругих потенциалов конкретной структуры приведены, например, в монографии [3].

Выражения (6) и (7) не совпадают с соответствующими выражениями линейной теории упругости, так как компоненты тензора ω' в (6) и (7) не удовлетворяют условиям симметрии линейной теории упругости

$$\omega'_{ij\alpha\beta} \neq \omega'_{ji\alpha\beta}; \omega'_{ij\alpha\beta} \neq \omega'_{ij\beta\alpha}; \omega'_{ij\alpha\beta} \neq \omega'_{\alpha\beta ij}. \quad (9)$$

Дополнительная информация о рассматриваемой теории (TLTPEW in BIS) представлена в монографии [3].

2.1.3. Общие решения при однородных начальных (остаточных) состояниях. Практически все конкретные результаты TLTPEW in BIS были получены в случае однородных начальных (остаточных) напряжений в виде

$$\sigma_{ij}^0 = \text{const} \quad \text{при } i = j; \quad \sigma_{ij}^0 = 0 \quad \text{при } i \neq j. \quad (10)$$

В случае (10) был построен ряд общих решений, информация по этому вопросу представлена, например, в монографии [3]. В качестве примера приведем общие решения для следующего случая:

$$\sigma_{11}^0 = \sigma_{22}^0 = \text{const}; \sigma_{33}^0 = \text{const}; \sigma_{11}^0 \neq \sigma_{33}^0 \quad (11)$$

и трансверсально-изотропного материала ($y_3 = \text{const}$ является плоскостью изотропии); рассматриваемое общее решение относится к цилиндрическому телу с произвольным контуром поперечного сечения. Вводятся следующие обозначения: N' и S' – нормаль и касательная к произвольному контуру в плоскости $y_3 = \text{const}$ (во втором состоянии); $u_{N'}$ и $u_{S'}$ – компоненты вектора перемещений вдоль N' и S' . В соответствии с построенным общим решением перемещения определяются в следующем виде:

$$u_{N'} = \frac{\partial}{\partial S'} \Psi' - \frac{\partial^2}{\partial N' \partial y_3} X'; \quad u_{S'} = -\frac{\partial}{\partial N'} \Psi' - \frac{\partial^2}{\partial S' \partial y_3} X'; \quad (12)$$

$$u_3 = (\omega'_{133} + \omega'_{1313})^{-1} \left(\omega'_{111} \Delta'_1 + \omega'_{3113} \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} - \rho' \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right) X'; \quad \Delta'_1 = \frac{\partial^2}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_2^2}.$$

Функции Ψ' и X' (12) определяются из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} & \left(\Delta'_1 + \xi_1'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} - \rho' \frac{1}{\omega'_{1221}} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right) \Psi' = 0; \\ & \left[\left(\Delta'_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \left(\Delta'_1 + \xi_3'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) - \rho' \left(\frac{\omega'_{111} + \omega'_{1331}}{\omega'_{111} \omega'_{1331}} \Delta'_1 + \frac{\omega'_{3333} + \omega'_{3113}}{\omega'_{111} \omega'_{1331}} \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\rho'^2}{\omega'_{111} \omega'_{1331}} \frac{\partial^4}{\partial \tau^4} \right] X' = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

В (13) введены следующие обозначения:

$$\xi'_j = \xi'_j(\omega'_{mna\beta}); \quad j, m, n, \alpha, \beta = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Выражения для определения величин ξ'_j (14) в случае упругих потенциалов конкретной структуры приведены в монографии [3].

Дополнительная информация о построении общих решений антиплоских, плоских и пространственных задач применительно к сжимаемым и несжимаемым материалам представлена в монографии [3]. Целесообразно отметить, что общие решения типа (12 – 14) были применены в [3] для исследования закономерностей распространения поверхностных волн Рэлея (Rayleigh) вдоль криволинейных граничных поверхностей

сплошных кругового цилиндра и сферы с учетом действия начальных (остаточных) напряжений. Вышеуказанные закономерности были использованы при формулировке основных соотношений для определения двухосных и одноосных напряжений в приповерхностных слоях материала в соответствии с UNDM, рассматриваемыми в заключительном разделе настоящей статьи.

2.2. Приборы для ультразвуковых измерений. Как уже отмечалось во Введении, совместные исследования специалистов Института механики им. С.П.Тимошенко НАНУ и Института электросварки им. Е.О.Патона НАНУ были организованы следующим образом. Теоретические исследования проводились, в основном, в Институте механики с участием специалистов Института электросварки, а экспериментальные исследования проводились в Институте электросварки с участием специалистов Института механики.

Принимая во внимание вышеуказанную форму сотрудничества, экспериментальные исследования проводились в Институте электросварки им. Е.О.Патона НАНУ под руководством доктора технических наук О.И.Гущи, где были созданы приборы для ультразвуковых измерений применительно к UNDM определения напряжений в элементах конструкций и в приповерхностных слоях материалов; указанные приборы разработаны на основе импульсных методов. Основные результаты, относящиеся к указанным приборам и аппаратуре, достаточно последовательно и подробно изложены в монографиях [7, 8] и в более сокращенной форме в т. 2 монографии [1] и в монографии [3], а также в многочисленных публикациях в периодических изданиях, которые указаны в [1, т. 2; 3, 7, 8].

Прецизионный прибор, основанный на методе рециркуляции импульса (один из вариантов импульсных методов) и разработанный под руководством д.т.н. О.И.Гущи, предназначен для измерения скорости с относительной точностью 10^{-5} (измерения проводились на частоте 5 МГц). Блок-схема этого прибора представлена на рис. 1, общий вид прибора представлен на рис. 2. Применительно к рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – задающий генератор; 2 – мощный генератор; 3 – акустический преобразователь; 4 – образец материала или элемент конструкции; 5 – ключевое устройство; 6 – усилитель; 7 – регулируемая линия задержки; 8 – схема совпадения; 9 – линия задержки; 10 – дискриминатор; 11 – электронносчетный частотомер.

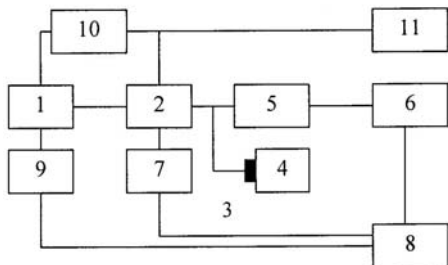


Рис. 1

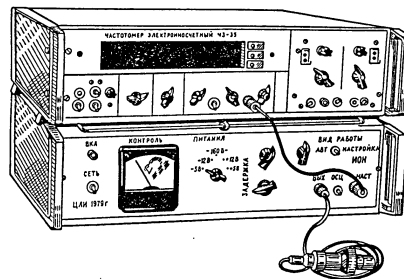


Рис. 2

Общий вид обсуждаемого прибора представлен на рис. 2. В качестве акустических преобразователей используются кварцевые пластины, которые крепятся к поверхности образца материала или элемента конструкции при помощи электромагнитов; в месте измерения поверхность образца материала или элемента конструкции предварительно шлифуется. Общий вид переносного устройства показан на рис. 3.

В заключение необходимо отметить три характерные особенности рассматриваемого экспериментального метода. *Достоинством* разработанной аппаратуры и метода измерений напряжений является возможность проведения исследований не только на моделях (в лабораторных условиях), но и на элементах конструкций. Акустический преобра-

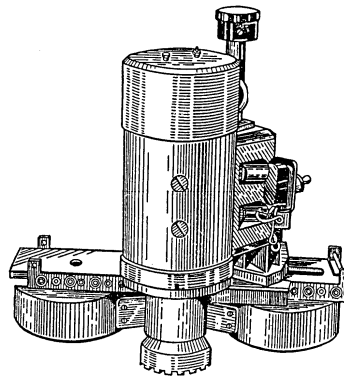


Рис. 3

зователь не прикрепляется постоянно к образцу материала или к элементу конструкции; он может быть *прикреплен* постоянно к образцу материала или к элементу конструкции *только на момент измерений*, что также является *достоинством* рассматриваемого метода. *Недостатком* разработанного UNDM измерений напряжений является *необходимость проведения измерений с высокой степенью точности*.

В порядке характеристики разработанного экспериментального метода измерения напряжений необходимо отметить, что измерения проводятся в *главных направлениях* тензора напряжений, которые могут определяться также из экспериментальных исследований или из соображений инженерного характера, а также из теоретических исследований.

2.3. Доказательство применимости рассматриваемого варианта TLTPeW in BIS к описанию экспериментальных результатов. Рассматриваемая проблема является весьма существенной в UNDM определения напряжений, так как в TLTPeW in BIS в настоящее время имеют место различные варианты этой теории, из которых можно указать следующие четыре варианта: теория конечных (больших) начальных деформаций; первый вариант теории малых начальных деформаций; второй вариант теории малых начальных деформаций; различные варианты, определяемые конкретной структурой упругого потенциала [2, 3, 18, 19], в рамках теорий конечных и малых начальных деформаций. Вышеуказанные варианты TLTPeW in BIS или TLTDBS (что тождественно, в силу принятой терминологии во Введении) являются последовательными и логически непротиворечивыми, что доказано в обзорной статье [18] и в монографии [3]. В то же время существуют многочисленные варианты TLTPeW in BIS или TLTDBS, которые являются непоследовательными или логически противоречивыми, что также представлено в обзорной статье [18] и в монографии [3], а также в других публикациях автора настоящей статьи.

В связи с вышеизложенной ситуацией возникает *проблема выбора варианта TLTPeW in BIS* (среди вышеуказанных последовательных и логически непротиворечивых при построении соответствующей теории), *который дает возможность описать экспериментально наблюдаемые закономерности распространения упругих волн в материалах с начальными (остаточными) напряжениями при ультразвуковых испытаниях*.

Дополнительно целесообразно отметить, что многие проблемы нелинейной теории были исследованы при применении упругого потенциала в следующем виде:

$$\Phi = \Phi(A_1, A_2), \quad (15)$$

где A_1 и A_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций Грина.

Представляется, что *статья [5] была первой публикацией*, в которой строго доказано, что TLTPeW in BIS с упругим потенциалом в виде (15) (произвольная зависимость от A_1 и A_2) *не может описать экспериментальных закономерностей* распространения упругих волн в материалах с начальными напряжениями (для всех четырех вышеуказанных последовательных и логически непротиворечивых вариантов TLTPeW in BIS). В [5] также было строго доказано, что TLTPeW in BIS с упругим потенциалом в виде (5) (произвольная зависимость от A_1, A_2, A_3) может описать экспериментальные закономерности распространения упругих волн в материалах с начальными напряжениями (для первых трех вышеуказанных последовательных и логически непротиворечивых вариантов TLTPeW in BIS). Отмеченное доказательство вначале было проведено для следующих материалов: сталь СТ-3, алюминиевый сплав АМГ-6 и сталь ЭИ-702; в последующие годы рядом авторов отмеченное доказательство было распространено и на ряд других материалов.

Дополнительная информация о вышеизложенной проблеме и о родственных проблемах представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8], а также в цитированных в них публикациях в периодических и специальных изданиях.

Изложенные выше результаты фундаментального характера объясняют ситуацию, почему *во всех научных центрах всего мира* (включая Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ и Институт электросварки им. Е.О.Патона НАНУ), которые занимаются созданием UNDM определения напряжений, *исключительно* применяют

простейший тип упругого потенциала, зависящего от всех трех инвариантов тензора деформаций, так называемый *упругий потенциал типа Мурнагана*. В случае применения алгебраических инвариантов тензора деформаций Грина упругий потенциал типа Мурнагана для изотропных сжимаемых материалов может быть представлен в следующем виде:

$$\Phi = \frac{1}{2} \lambda A_1^2 + \mu A_2 + \frac{a}{3} A_1^3 + b A_1 A_2 + \frac{c}{3} A_3. \quad (16)$$

Обозначения: λ и μ – постоянные Ляме; $\mu \equiv G$ – модуль сдвига; a, b и c – упругие постоянные третьего порядка, которые для 39 различных материалов представлены в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8].

В вышеуказанных монографиях также приведены соответствующие результаты для квазиизотропных материалов с незначительной ортотропией свойств, вызванной, например, процессом проката. В случае квазиизотропных материалов упругий потенциал может быть представлен в следующем виде:

$$\Phi = \frac{1}{2} E_{ijnm} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{nm} + \frac{a}{3} A_1^3 + b A_1 A_2 + \frac{c}{3} A_3; \quad (17)$$

$$E_{ijnm} = E_{jinn} = E_{ijmn} = E_{nmij}.$$

Квадратичная часть потенциала (17) соответствует анизотропным материалам в рамках линейной теории упругости, кубическая часть потенциала (17) соответствует изотропным материалам в рамках нелинейной теории упругости (см. например, (16)). Поскольку рассматривается ортотропный материал, то в (17) дополнительно должны быть приняты условия

$$\begin{aligned} E_{1123} = E_{1113} = E_{1112} = E_{2223} = E_{3323} = E_{3313} = \\ = E_{3312} = E_{2213} = E_{2313} = E_{1312} = E_{2312} = E_{2212} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Для слабоортотропных (квазиизотропных) материалов ненулевые компоненты E_{ijnm} можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned} E_{1111} = \langle \lambda \rangle + 2 \langle \mu \rangle + \varepsilon_{1111}; \quad E_{2222} = \langle \lambda \rangle + 2 \langle \mu \rangle + \varepsilon_{2222}; \\ E_{3333} = \langle \lambda \rangle + 2 \langle \mu \rangle + \varepsilon_{3333}; \quad E_{1122} = \langle \lambda \rangle + \varepsilon_{1122}; \\ E_{1133} = \langle \lambda \rangle + \varepsilon_{1133}; \quad E_{2233} = \langle \lambda \rangle + \varepsilon_{2233}; \\ E_{1221} = \langle \mu \rangle + \varepsilon_{1221}; \quad E_{1331} = \langle \mu \rangle + \varepsilon_{1331}; \quad E_{2332} = \langle \mu \rangle + \varepsilon_{2332}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\langle \lambda \rangle$ и $\langle \mu \rangle$ являются усредненными значениями постоянных Ляме; $\langle \mu \rangle \equiv \langle G \rangle$ является усредненным значением модуля сдвига.

Для квазиизотропных материалов дополнительно принимается

$$|\varepsilon_{ij\alpha\beta} / \langle \mu \rangle| \ll 1; \quad |\varepsilon_{ij\alpha\beta} / \langle \lambda \rangle| \ll 1; \quad (20)$$

В последующих пунктах настоящей статьи будут рассматриваться различные материалы (металлы, сплавы и подобные материалы), условно эти материалы можно считать относительно жесткими материалами; для таких материалов имеют место следующие неравенства:

$$|\sigma_{ij}^0| \cdot \mu^{-1} \ll 1; \quad |\sigma_{ij}^0| \cdot \langle \mu \rangle^{-1} \ll 1, \quad (21)$$

где $\mu \equiv G$ – модуль сдвига и $\langle \mu \rangle$ – усредненный модуль сдвига для квазиизотропных материалов.

Принимая во внимание неравенства (21), в последующих пунктах настоящей статьи будет использовано *линейное приближение* относительно параметров $\sigma_{ij}^0 \cdot \mu^{-1}$ и $\sigma_{ij}^0 \cdot \langle \mu^{-1} \rangle$ при аналитических и численных исследованиях.

Дополнительные сведения по вышеприведенным вопросам представлены в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8] и в обзорах [20, 23, 24, 29], а также в цитированных в них статьях в периодических и специальных изданиях.

3. UNDM определения напряжений в элементах конструкций.

В настоящем пункте при описании разработанного UNDM определения напряжений в элементах конструкций вся информация включена в следующие позиции: назначение (предназначение) рассматриваемого метода; основные соотношения метода; примеры применения UNDM определения напряжений в элементах конструкций, включая и сварные элементы конструкций.

3.1. Краткая характеристика метода. Все результаты, изложенные в настоящем п. 3.1, можно рассматривать как спецификацию и приложение результатов п. 2.

3.1.1. Назначение (предназначение) метода. Этот метод направлен на ультразвуковое неразрушающее определение одноосных, двухосных и трехосных напряжений в элементах конструкций применительно к различным напряжениям (действующие, остаточные, технологические, предварительные, эксплуатационные, сборочные, начальные и другие напряжения). Схема этого метода представлена на рис. 4.

Рассматриваемый метод включает следующие позиции.

1. Метод предназначен для сравнительно жестких материалов (металлы, сплавы и подобные материалы). В связи с этим принимаются неравенства (21) и процедура, изложенная ниже неравенств (21) в заключительной части п. 2.3.

2. Метод предназначен для пластин, оболочек (искривленные пластины) и других элементов конструкций, изготовленных из листовых материалов постоянной или незначительно изменяющейся толщины. В связи с этим в соответствии с рис. 4 имеет место следующее неравенство:

$$h \ll R, \quad (22)$$

где h – толщина листа, R – минимальный размер в плане (в плоскости $x_1 = \text{const}$, рис. 4) элемента конструкции.

3. Ультразвуковые продольные и поперечные (сдвиговые) волны распространяются вдоль оси $0x_1$ и (сдвиговые волны) поляризуются в плоскостях x_10x_2 и x_10x_3 (в соответствии с обозначениями на рис. 4). Два метода возбуждения и приема ультразвуковых волн показаны на рис. 4: (1) – вибратор и приемник расположены на различных лицевых поверхностях элемента конструкции; (2) – вибратор и приемник объединены вместе и расположены на одной и той же лицевой поверхности элемента конструкции. На рис. 4 вибратор и приемник показаны заштрихованными прямоугольниками.

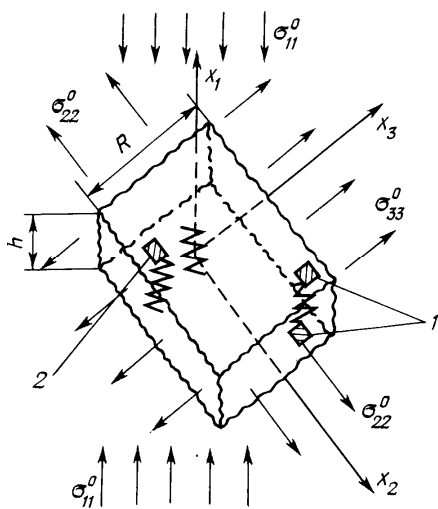


Рис. 4

4. В соответствии с (10) метод предназначен для измерения однородных напряжений: в случае трехосных напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^0 = \text{const} \neq 0; \quad \sigma_{22}^0 = \text{const} \neq 0; \\ \sigma_{33}^0 = \text{const} \neq 0; \end{aligned} \quad (23)$$

в случае двухосных напряжений

$$\sigma_{11}^0 = 0; \quad \sigma_{22}^0 = \text{const} \neq 0; \quad \sigma_{33}^0 = \text{const} \neq 0; \quad (24)$$

в случае одноосных напряжений

$$\begin{aligned} & \sigma_{11}^0 = 0; \sigma_{22}^0 = 0; \sigma_{33}^0 = \text{const} \neq 0; \\ \text{или} & \sigma_{11}^0 = 0; \sigma_{22}^0 = \text{const} \neq 0; \sigma_{33}^0 = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

применительно к рис. 4.

5. Метод предназначен для измерения напряжений $(\sigma_{11}^0, \sigma_{22}^0, \sigma_{33}^0)$, которые незначительно изменяются в плоскости $x_2 0x_3$ (в плоскости листа) на расстояниях L . В связи с этим принимаются следующие условия относительно зависимости вышеуказанных напряжений от x_2 и x_3 :

$$\begin{aligned} & \sigma_{11}^0 \approx \text{const}; \sigma_{22}^0 \approx \text{const}; \sigma_{33}^0 \approx \text{const}; \\ & \text{при } \min\{\Delta x_2, \Delta x_3\} \approx L, \end{aligned} \quad (26)$$

где L – максимальные линейные размеры преобразователя (вибратор, приемник, сенсор). Необходимо отметить применительно к интерпретации условий (26), что однородность (постоянство) напряжений в пределах размеров датчика (преобразователя) является *обычно принятым условием в любых экспериментальных методах*, так как усредненные величины в пределах размеров датчика определяются при измерениях.

6. Метод предназначен для измерения напряжений σ_{ij}^0 , которые незначительно изменяются по толщине листа (вдоль оси $0x_1$ на рис. 4, перпендикулярно к листу). В этом случае усредненные напряжения определяются следующим образом:

$$\langle \sigma_{ij}^0 \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h \sigma_{ij}^0(x_1) dx_1. \quad (27)$$

Вышеформулированные шесть позиций являются главными позициями для UNDM определения трехосных напряжений. В случае двухосных напряжений позиция 6 и соотношения (23), (25) и (27) не используются. В случае одноосных напряжений позиция 6 и соотношения (23), (24) и (27) не используются.

3.1.2. Основные соотношения рассматриваемого метода. Основные соотношения были построены для определения трехосных напряжений (23), включая случаи двухосных напряжений (24) и одноосных напряжений (25). Эти соотношения были получены на базе теории, изложенной в п. 2, и в соответствии с процедурами, изложенными ниже выражений (20) в заключительной части п. 2.3. Дополнительная информация о построении рассматриваемых основных соотношений представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8] и в обзорах [23, 24, 29], а также в цитированных в них публикациях в периодических и специальных изданиях.

Вышеуказанные основные соотношения были построены для изотропных материалов на базе упругого потенциала (16) и для квазиизотропных материалов на базе упругого потенциала (17) при дополнительных условиях (18) – (20). В виде примера ниже основные соотношения приведены *только для изотропного* материала с упругим потенциалом (16). В этом случае выражения для изотропных материалов приведены применительно к трехосным напряжениям (23) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^0 &= \frac{c_{l1} - c_l^0}{c_l^0} A_{11} + \frac{c_{s12} - c_s^0}{c_s^0} A_{12} + \frac{c_{s13} - c_s^0}{c_s^0} A_{13}; \\ \sigma_{22}^0 &= \frac{c_{l1} - c_l^0}{c_l^0} A_{21} + \frac{c_{s12} - c_s^0}{c_s^0} A_{22} + \frac{c_{s13} - c_s^0}{c_s^0} A_{23}; \\ \sigma_{33}^0 &= \frac{c_{l1} - c_l^0}{c_l^0} A_{31} + \frac{c_{s12} - c_s^0}{c_s^0} A_{32} + \frac{c_{s13} - c_s^0}{c_s^0} A_{33}, \end{aligned} \quad (28)$$

где: c_{ln} – скорость продольных волн, распространяющихся вдоль оси $0x_n$ ($n = 1, 2, 3$) в материале с напряжениями (23); c_{smn} – скорость поперечных (сдвиговых) волн, поляризованных в плоскости $x_n 0x_m$ ($n \neq m; n, m = 1, 2, 3$) и распространяющихся вдоль оси $0x_n$ в материале с напряжениями (23); c_l^0 и c_s^0 – скорость продольных и поперечных (сдвиговых) волн в материале без напряжений.

Коэффициенты A_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) в (28) определяются теоретически или экспериментально; теоретический подход приводит к следующим соотношениям для A_{ij} :

$$A_{ij} = A_{ij}(\lambda, \mu, a, b, c), \quad (29)$$

где λ, μ, a, b и c соответствуют выражению (16) для упругого потенциала. Следует отметить, что выражения (29) определяются для каждого из четырех вариантов TLTPEW in BIS, указанных в начале п. 2.3. При экспериментальных методах определения A_{ij} (29) эти величины определяются в виде, который не зависит от применяемой теории.

В случае двухосных напряжений (24) в виде ($\sigma_{11}^0 \equiv 0, \sigma_{22}^0 \neq 0, \sigma_{33}^0 \neq 0$) из (28) можно получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}^0 - \sigma_{22}^0 &= \left(\frac{c_{s13} - c_s^0}{c_s^0} - \frac{c_{s12} - c_s^0}{c_s^0} \right) A; \\ \sigma_{33}^0 + \sigma_{22}^0 &= \left(\frac{c_{s13} - c_s^0}{c_s^0} + \frac{c_{s12} - c_s^0}{c_s^0} \right) B. \end{aligned} \quad (30)$$

Коэффициенты A и B в (30) были определены теоретически для всех четырех вариантов TLTPEW in BIS, указанных в начале п. 2.3; также разработаны экспериментальные методы определения этих коэффициентов.

Целесообразно отметить, что первое выражение в (30) похоже на выражение для разности главных напряжений в *классической фотоупругости*; поскольку в *классической фотоупругости* имеет место *только одно соотношение* типа первого соотношения (30), то в классической фотоупругости применяются *дополнительные* экспериментальные или численные методы, чтобы разделить главные напряжения σ_{33}^0 и σ_{22}^0 . В UNDM определения напряжений в выражениях (30) присутствует *второе выражение* (30); в связи с этим совместное применение первого и второго выражения (30) дает возможность в UNDM разделить главные напряжения, *не привлекая* дополнительные экспериментальные и численные методы.

В случае одноосных напряжений (25) в виде ($\sigma_{11}^0 \equiv 0, \sigma_{22}^0 \equiv 0, \sigma_{33}^0 \neq 0$) из (28) или (30) можно получить следующее соотношение:

$$\sigma_{33}^0 = \frac{c_{s13} - c_{s12}}{c_s^0} A. \quad (31)$$

Формула (31) широко применяется в многочисленных научных центрах всего мира при ультразвуковом неразрушающем определении одноосных напряжений.

Основные соотношения в виде (28) – (31) соответствуют изотропным материалам; в аналогичной форме получены основные соотношения для квазиизотропных материалов, которые представлены в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8] и обзоре [29], а также в цитированных в них публикациях в периодических и специальных изданиях. Следует также отметить, что в вышеуказанных монографиях все исследования проведены для «истинных» (с учетом изменения длины пути за счет начального деформирования) и для «натуральных» или «естественных» (без учета изменения длины пути за счет начального деформирования) скоростей распространения ультразвуковых волн в материалах с начальными (остаточными) напряжениями.

Основные соотношения для изотропных и квазиизотропных материалов (типа соотношений (28) – (31)) совместно с приборами и устройствами для ультразвуковых измерений (п. 2.2) обеспечивают возможность ультразвукового неразрушающего определения трехосных, двухосных и одноосных напряжений в элементах конструкций применительно к сравнительно жестким материалам (металлы, сплавы и подобные материалы), включая напряжения, которые возникают при электросварке. В заключение целесообразно отметить, что экспериментальное измерение напряжений, возникающих при электросварке, *должно проводиться на некотором расстоянии от сварного шва*, так как возникают фазовые превращения материала в процессе электросварки непосредственно возле сварного шва, что сопровождается образованием зон пластичности при остывании.

3.1.3. Проверка рассматриваемого варианта UNDM определения напряжений в элементах конструкций. Проверка рассматриваемого метода была проведена для двух следующих примеров: первый пример – механическое нагружение кругового диска двумя сосредоточенными нагрузками, которые направлены вдоль вертикального диаметра (определение двухосных напряжений в центре диска); второй пример – наплавка валика вдоль длинной стороны полосы (определение одноосных остаточных напряжений).

Пример 1. Механическое нагружение (сжатие) кругового диска двумя сосредоточенными силами. Чтобы создать двухосное состояние в центре диска, круговой диск сжимался двумя сосредоточенными силами, направленными вдоль вертикального диаметра. Схема нагружения представлена на рис. 5, где направления осей $0x_j$ ($j = 1, 2, 3$) соответствует рис. 4.

В рассматриваемом случае также существует точное решение рассматриваемой задачи в рамках классической линейной теории упругости. В связи с вышеизложенным проведено сравнение теоретических результатов (точное решение классической линейной теории упругости) и экспериментальных результатов (рассматриваемый UNDM определения напряжений) в центре диска (рис. 5), указанное сравнение представлено в табл. 1 для различных материалов.

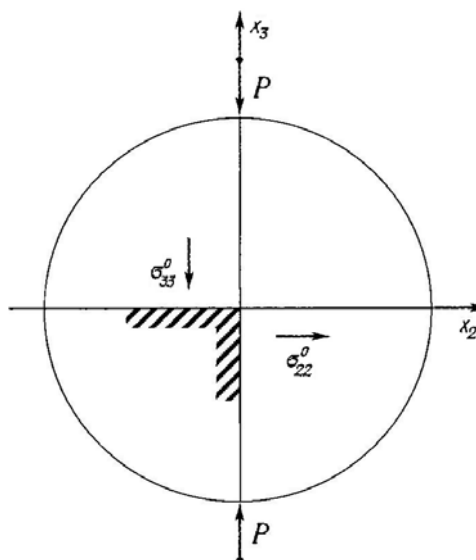


Рис. 5

Таблица 1

Материал	Напряжения, МПа			
	экспериментальные		теоретические	
	σ_{22}^0	σ_{33}^0	σ_{22}^0	σ_{33}^0
Оргстекло	1,96	-5,3	1,82	-5,5
Сталь 09Г2С	30,2	-92,5	32,7	-98,0
Сталь 45Г1703	67,3	-163,0	57,9	-173,7
Сталь 3	35,6	-102,6	32,6	-97,8
Сплав 1915	29,1	-104	35,4	-106

Необходимо отметить, что результаты в табл. 1 для различных материалов получены при различных значениях сжимающей силы P (рис. 5). Результаты в табл. 1 иллюстрируют достаточную эффективность рассматриваемого UNDM определения напряжений, особенно применительно к определению максимальных напряжений.

Пример 2. Наплавка валика вдоль длинной стороны – вдоль края полосы (определение одноосных остаточных напряжений). Одноосные остаточные напряжения были определены в длинных полосах из алюминиевого сплава АМГ-6 и низколегированной стали 09Г2С, которые возникают при наплавке валика на кромку длинной полосы (поперечное сечение полосы шириной b представлено в нижней части рис. 6). В случае длинной полосы одноосные остаточные напряжения возникают в средней части полосы; распределение одноосных остаточных напряжений вдоль перпендикуляра к кромке полосы (в средней части по длине полосы) представлено на рис. 6 для низколегированной стали 09Г2С и на рис. 7 для алюминиевого сплава АМГ-6.

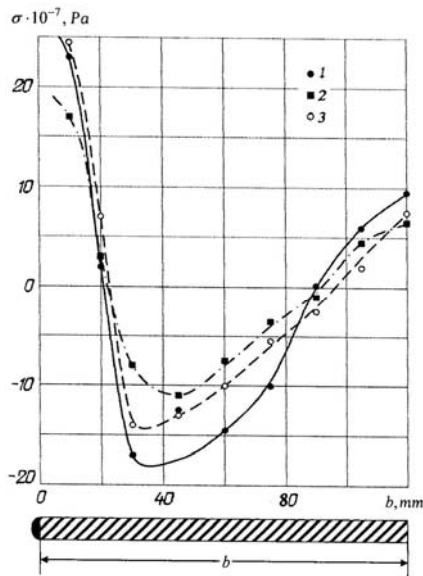


Рис. 6

Экспериментальные результаты на рис. 6 и 7 были получены различными экспериментальными методами и отмечены следующими указателями:

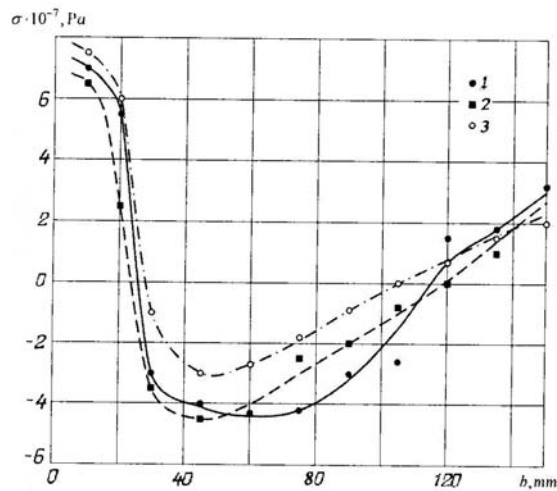


Рис. 7

- (1) – для рассматриваемого UNDM определения напряжений;
- (2) – для разрушающего метода при тензометрических измерениях;
- (3) – для разрушающего метода при применении механических измерений.

Заключение. Как следствие вышеизложенной проверки получаем, что результаты в табл. 1 и на рис. 6 и 7 подтверждают, что рассматриваемый UNDM определения напряжений является достаточно эффективным как применительно к напряжениям, возникающим при механическом нагружении, так и применительно к остаточным напряжениям, возникающим при электросварке. Дополнительная информация по анализу эффективности рассматриваемого UNDM определения напряжений представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8].

3.2. Применение рассматриваемого UNDM определения напряжений в элементах конструкций. В настоящем пункте рассмотрим ряд примеров ультразвукового неразрушающего определения напряжений в элементах конструкций применительно к напряжениям, возникающим при механическом нагружении, электросварке и при локальном температурном воздействии. Указанные результаты были получены рассматриваемым UNDM определения напряжений, более расширенная информация по этим вопросам представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8] и в обзорной статье [29].

3.2.1. Определение двухосных остаточных напряжений, возникающих при электросварке. В инженерной практике существенный интерес представляет определение двухосных остаточных напряжений, возникающих при сварке встык элементов конструкций. Распределение двухосных остаточных напряжений, возникающих при сварке встык элементов конструкций, существенным образом зависит от относительных размеров каждого из элементов конструкций.

Рассмотрим результаты определения двухосных остаточных напряжений, которые возникают при сварке встык двух полос из низколегированной стали 15Г2АФД (геометрические размеры полос указаны в правой части рис. 8). На рис. 8 показано распределение продольных и поперечных напряжений вдоль линии сплавления на некотором расстоянии от шва.

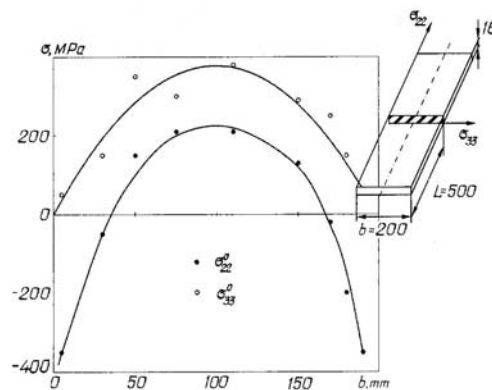


Рис. 8

На рис. 9 показано распределение продольных и поперечных остаточных напряжений перпендикулярно шву в средней части сваренных встык полос (вдоль штриховой линии, показанной на правой части рис. 8).

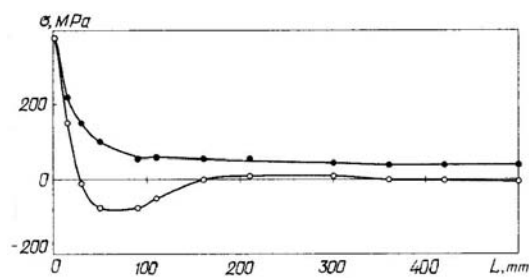


Рис. 9

В инженерной практике при сварке встык достаточно толстых пластин широко применяется многослойная сварка. При таком технологическом процессе происходит определенное изменение двухосных остаточных напряжений, возникающих возле сварного шва. Так, продольные и поперечные остаточные напряжения перераспределяются. Вышеизложенное можно проиллюстрировать на следующем примере для двух пластин из стали 3, которые соединены между собой многослойной сваркой встык; размеры пластин указаны в правой верхней части рис. 10.

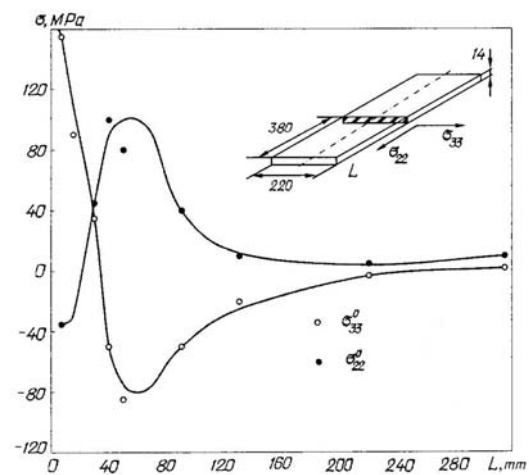


Рис. 10

На рис. 10 показано распределение продольных σ_{22}^0 и поперечных σ_{33}^0 остаточных напряжений возле перпендикулярной ко шву линии в средней части (вдоль штриховой линии, показанной в правой верхней части рис. 10). Из результатов, представленных на рис. 9 и 10 следует, что распределение остаточных напряжений при многослойной сварке встык (рис. 10) отличается от распределения остаточных напряжений при сварке встык (рис. 9).

3.2.2. Определение двухосных остаточных напряжений, возникающих при локальном нагреве. Типичным случаем образования двухосных остаточных напряжений, возникающих при электросварке, является осесимметричный нагрев тонких пластин сравнительно больших размеров сосредоточенным источником тепла высокой интенсивности, обеспечивающим равномерное распределение температуры по толщине пластины. Вышеуказанная ситуация в определенной мере моделирует напряженное состояние пластины, которое возникает при точечной контактной сварке.

Рассмотрим следующий пример. В пластине из алюминиевого сплава АМГ-6, размеры которой указаны в верхней части рис. 11, поле остаточных двухосных напряжений было создано точечной проплавкой в центре пластины. Распределение остаточных радиальных σ_r (отмечены значком « \circ ») и тангенциальных σ_t (отмечены значком

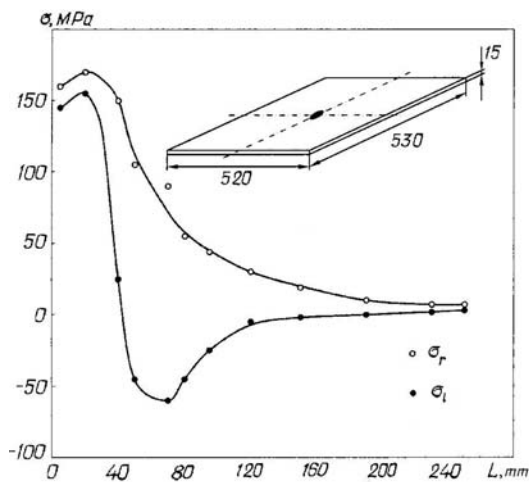


Рис. 11

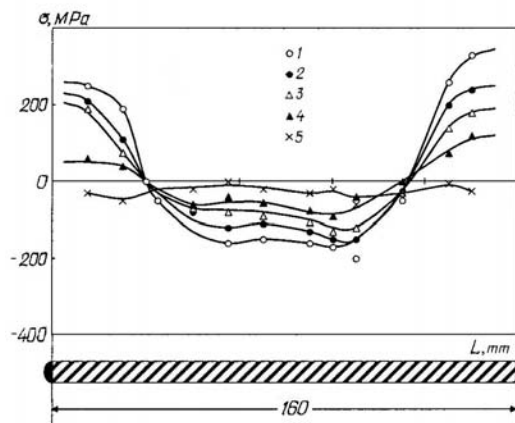


Рис. 12

Одноосные остаточные напряжения измерялись после сварки и после дополнительного растяжения (механическое нагружение) в плоскости полосы в перпендикулярном направлении к ее длине. На рис. 12 кривая 1 (со значком «○») соответствует распределению одноосных остаточных напряжений после сварки. На рис. 12 кривые 2 (со значком «●»), 3 (со значком «Δ»), 4 (со значком «▲») и 5 (со значком «×») соответствуют распределению одноосных остаточных напряжений в полосе после дополнительного растяжения напряжениями величиной $0,5\sigma_T$ (кривая со значком «●»), $0,76\sigma_T$ (кривая со значком «Δ»), $0,96\sigma_T$ (кривая со значком «▲») и σ_T (кривая со значком «×»).

Из результатов, представленных на рис. 12, следует, что при дополнительном растяжении нагрузками, равными пределу текучести, происходит «снятие» одноосных остаточных напряжений, что соответствует общеизвестным соображениям инженерного характера.

3.2.4. Определение трехосных остаточных напряжений, возникающих при электросварке. Как уже неоднократно отмечалось в настоящей статье, в частности, в п. 3.1.2, рассматриваемый UNDM определения напряжений в элементах конструкций позволяет определять трехосные напряжения, включая двухосные и одноосные напряжения. Ниже приведем сведения по определению трехосных остаточных напряжений, возникающих при электросварке встык двух пластин; рассматриваемый случай представлен в публикации [9].

«●») напряжений показано на рис. 11; указанное распределение показано в радиальном направлении от точки проплавки к краю пластины.

3.2.3. Анализ изменения одноосных остаточных напряжений при дополнительном механическом нагружении. Обсуждаемый UNDM определения напряжений в элементах конструкций позволяет достаточно эффективно анализировать изменение остаточных напряжений, возникших при электросварке, при воздействии дополнительных механических нагружений. Вышеизложенная ситуация является одним из технологических приемов по снятию или уменьшению остаточных напряжений, возникающих при сварке; отмеченный технологический прием широко применяется в машиностроении и при создании строительных сварных конструкций.

В качестве примера приведем результаты по измерению изменения остаточных одноосных напряжений возникших при электросварке, при дополнительном растяжении. В достаточно длинной полосе (длинной пластине) размерами $1200 \times 160 \times 27$ мм, которая изготовлена из стали 09Г2С, одноосные остаточные напряжения создавались наплавкой двух валиков симметрично на противоположные кромки полосы; поперечное сечение полосы показано в нижней части рис. 12.

В рассматриваемом примере трехосные остаточные напряжения возникли при сварке встык двух толстых и сравнительно нешироких пластин, изготовленных из стали 12Г2АФ0. Схематически свариваемые пластины и их размеры показаны в правой верхней части рис. 13.

Распределение трехосных остаточных напряжений измерялось вдоль пунктирной линии L , которая показана в правой верхней части рис. 13. Направления осей $0x_j (j=1, 2, 3)$ на рис. 13 соответствуют направлению осей $0x_j (j=1, 2, 3)$ на рис. 4; заметим, что оси $0x_j (j=1, 2, 3)$ на рис. 13 указаны только цифрами 1, 2 и 3.

В рассматриваемом случае сварки встык двух достаточно толстых пластин, представленных на рис. 13, имеет место незначительное изменение остаточных напряжений по толщине листа (вдоль оси $0x_1$ на рис. 13 и на рис. 4, вдоль перпендикуляра к плоскости листа). Принимая во внимание вышеотмеченное, позиция 6 (п. 3.1.1) должна быть использована. В связи с этим трехосные остаточные напряжения, представленные в левой части рис. 13, имеют смысл усредненных напряжений в соответствии с выражениями (27).

На рис. 13 распределение трехосных остаточных напряжений в рассматриваемом случае представлено кривыми; кривая 1 (со значком « Δ ») соответствует напряжениям σ_{11}^0 , кривая 2 (со значком « \circ ») соответствует напряжениям σ_{22}^0 и кривая 3 (со значком « \bullet ») соответствует напряжениям σ_{33}^0 . Необходимо отметить, что направления осей $0x_j (j=1, 2, 3)$ на рис. 13 были изменены по сравнению с соответствующими рисунками публикаций [9, 29] с той целью, чтобы направления осей $0x_j (j=1, 2, 3)$ на рис. 13 соответствовали направлениям соответствующих осей на рис. 4.

3.2.5. Определение одноосных остаточных напряжений, возникающих при электросварке, в сложных элементах конструкций.

Рассмотрим сложный элемент конструкции в виде длинной балки с крестообразным поперечным сечением; на рис. 14 крестообразное поперечное сечение балки представлено в центре рисунка. Рассматриваемая балка состоит из вертикальной стойки и двух (левый и правый на рис. 14) горизонтальных фланцев, которые приварены к стойке. В рассматриваемом сложном элементе конструкции (в его средней по длине части) возникают только одноосные остаточные напряжения при электросварке, поскольку балка является достаточно длинной. В связи с этим распределение одноосных остаточных напряжений можно представить в плоскости поперечного сечения. На рис. 14 линии 1 (со значком « \bullet ») соответствуют левому и правому фланцам, линии 2 (со значком « \circ ») соответствуют вертикальной стойке.

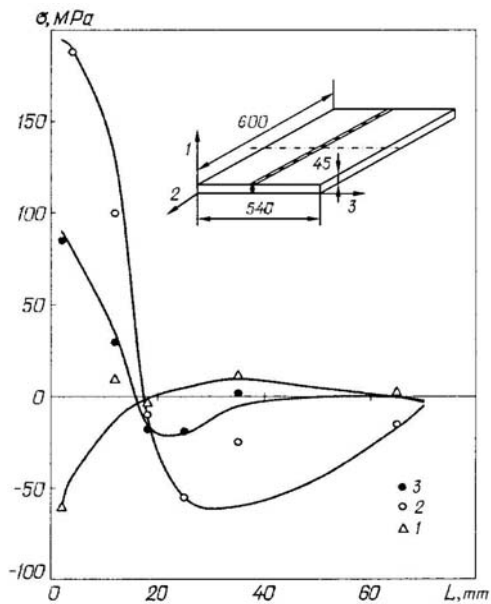


Рис. 13

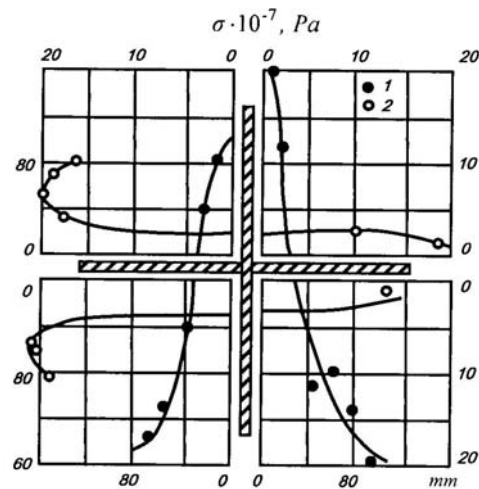


Рис. 14

Заключение. Результаты на рис. 14 подтверждают, что рассматриваемый UNDM определения напряжений является достаточно эффективным методом определения остаточных напряжений, возникающих при электросварке в сложных сварных элементах конструкций. Дополнительная информация об этой и родственных проблемах представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8].

3.2.6. Определение напряжений в элементах конструкций автомобильного моста. В весьма краткой форме рассмотрим информацию об определении напряжений в элементах конструкций автомобильного моста, указанные результаты получены обсуждаемым UNDM определением напряжений. Вышеотмеченная информация для моста представлена на рис. 15, линейные размеры указаны в метрах в верхней части рис. 15 и в миллиметрах в нижней части рис. 15. Общий вид элементов конструкций моста возле места измерений показан в левой нижней части рис. 15. Распределение продольных (вдоль моста) напряжений в стенке балки четвертого ряда, расположенного возле опоры моста (отмечено кружочком в верхней части рис. 15), по высоте стенки балки представлено в правой нижней части рис. 15.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом в настоящем пункте (п. 3.2.6) случае при применении обсуждаемого UNDM определении напряжений происходит измерение суммарных напряжений (рабочие + остаточные, возникшие при электросварке). Более подробная информация по рассматриваемому вопросу представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8].

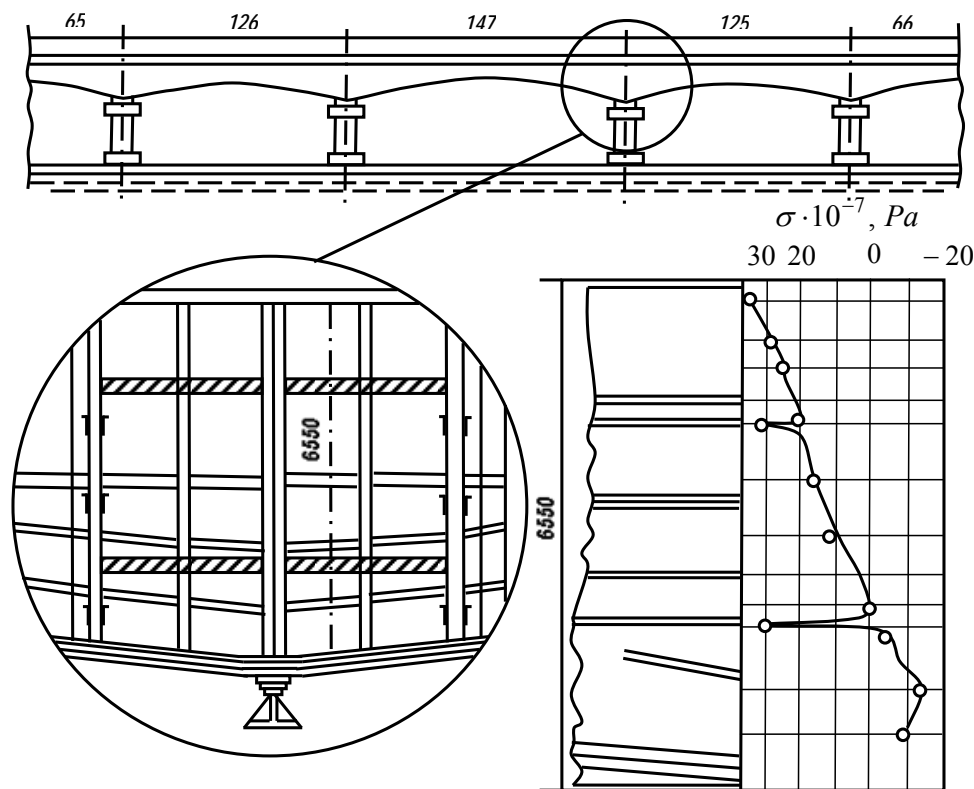


Рис. 15

Заключение. Конкретные результаты, представленные в весьма краткой форме в пп. 3.2.1 – 3.2.6, подтверждают, что обсуждаемый UNDM определения напряжений в элементах конструкций является достаточно эффективным методом определения *трехосных, двухосных* и *одноосных* напряжений в элементах конструкций, изготовленных из металлов, сплавов и подобных материалов. Достоинства (преимущества) и недостатки рассматриваемых методов указаны в заключительной части п. 2.2.

4. UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов.

В настоящем пункте при описании разработанного UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов вся информация включена в следующие позиции: назначение (предназначение) рассматриваемого метода; основные соотношения метода; примеры применения UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов, включая и напряжения, которые возникают при электросварке.

4.1. Краткая характеристика метода. Все результаты, изложенные в настоящем п. 4.1, можно рассматривать как спецификацию и приложение результатов п. 2.

4.1.1. Назначение (предназначение) метода. Этот метод направлен на ультразвуковое неразрушающее определение одноосных и двухосных напряжений в приповерхностных слоях материала применительно к действующим, остаточным, технологическим, предварительным, эксплуатационным, сборочным, начальным и другим напряжениям. Схема метода представлена на рис. 16.

В представленной на рис. 16 схеме через L обозначено расстояние между генератором и приемником ультразвуковых колебаний. На рис. 16 также введены следующие обозначения: \circ – генератор; \square – приемник; вариант 1 – генератор и приемник расположены вдоль оси $0y_1$; вариант 2 – генератор и приемник расположены вдоль оси $0y_3$; σ_{11}^0 и σ_{33}^0 – напряжения, которые определяются рассматриваемым методом.

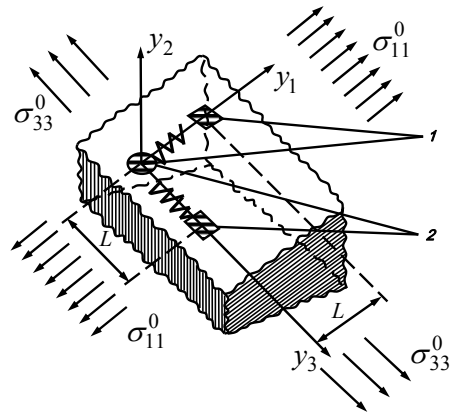


Рис. 16

Необходимо отметить, что (в рассматриваемом UNDM определения приповерхностных напряжений) генератор \circ и приемник \square , расположенные на фиксированном расстоянии L друг от друга, совместно должны считаться как преобразователь (датчик) применительно к анализу волн Рэлея.

Обсуждаемый метод включает следующие позиции.

1. Метод предназначен для сравнительно жестких материалов (металлы, сплавы и подобные материалы). В связи с этим принимаются неравенства (21) и процедура, изложенная ниже неравенств (21) в заключительной части п. 2.3.

2. Метод предназначен для измерений возле незагруженной поверхности материала; в связи с этим применительно к рис. 16 при $y_2 = 0$ должны иметь место условия

$$\sigma_{22}^0 = 0. \quad (32)$$

3. Измерения напряжений реализуются около плоской или слегка искривленной граничной поверхности материала.

4. В весьма тонком приповерхностном слое материала принимаются следующие условия относительно зависимости величин σ_{11}^0 и σ_{33}^0 от координаты y_2 (рис. 16) (от расстояния от незагруженной поверхности)

$$\sigma_{11}^0 \approx \text{const}; \sigma_{33}^0 \approx \text{const} \text{ при } |y_2| \ll L, \quad (33)$$

где L – размеры преобразователя (датчика).

5. Также принимаются условия относительно зависимости напряжений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 от координат y_1 и y_3 (рис. 16) (от координат вдоль незагруженной поверхности)

$$\sigma_{11}^0 \approx \text{const}; \sigma_{33}^0 \approx \text{const} \text{ при } \min\{\Delta y_1, \Delta y_3\} \approx L. \quad (34)$$

Условия (34) определяют незначительное изменение напряжений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 на расстояниях L в плоскости $y_1 0 y_3$ (рис. 16), где L – размеры датчика (преобразователя) на рис. 16.

Таким образом, в анализируемом UNDM определении двухосных напряжений (включая, как частный случай, одноосных напряжений) в приповерхностных слоях материала, по существу, принимаются следующие условия:

$$\sigma_{11}^0 = \text{const}; \sigma_{33}^0 = \text{const}; \sigma_{22}^0 = 0 \quad (35)$$

для нижнего полупространства (полуограниченной области) ($y_2 \leq 0$ на рис. 16) при незагруженной поверхности материала (при $y_2 = 0$ на рис. 16, граничная поверхность); вышеуказанную ситуацию можно рассматривать как моделирование позиций 2 – 5.

Условия (35) дают возможность использовать *закономерности* распространения волн Рэлея в материалах с начальными (остаточными) напряжениями в случае *постоянных* начальных (остаточных) напряжений. В случае начальных (остаточных) напряжений в виде (35) в рассматриваемом методе применяются закономерности распространения волн Рэлея в материалах с начальными (остаточными) напряжениями для следующих двух вариантов в соответствии с рис. 16: первый вариант – волна Рэлея распространяется вдоль оси $0 y_1$ и поляризована в плоскости $y_1 0 y_2$; второй вариант – волна Рэлея распространяется вдоль оси $0 y_3$ и поляризована в плоскости $y_3 0 y_2$. Вышеуказанные закономерности распространения волн Рэлея в материалах с начальными (остаточными) напряжениями представлены в монографиях [1, т. 2; 3, 6].

Позиции 1 – 5 определяют пределы применимости рассматриваемого UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов применительно к двухосным напряжениям (включая одноосные напряжения). Необходимо отметить применительно к интерпретации условий (34), что однородность (постоянство) напряжений в пределах размеров датчика (генератора, приемника, преобразователя, сенсора) является *обычно принятым условием в любых экспериментальных методах*, так как обычно при измерениях определяются усредненные величины в пределах размеров датчика. Изложенный комментарий соответствует комментарию ниже выражения (26) применительно к UNDM определению напряжений в элементах конструкций.

Экспериментальные измерения осуществлялись прибором, который кратко описан в п. 2.2; при этом возбуждение и прием волн Рэлея осуществлялись посредством преобразователя типа «клин» с пьезокерамическими пластинками ЦТС-19, который работает на частоте 5 МГц. Датчик (преобразователь) включает пьезокерамические пластины ЦТС-19 (размерами 10x4 мм, резонансная частота 3 МГц), жестко закрепленные на фиксированном расстоянии друг от друга (на расстоянии L на рис. 16). Общий вид портативного устройства (акустический преобразователь с электромагнитами применительно к возбуждению и приему волн Рэлея) может быть представлен в таком же виде, как и на рис. 3.

Преимущества и недостатки рассматриваемого UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материала соответствуют информации, которая кратко указана в заключительной части п. 2.2.

4.1.2. Основные соотношения рассматриваемого метода. Основные соотношения UNDM определения двухосных (включая одноосные) напряжений в приповерхностных слоях материалов основаны на закономерностях распространения волн Рэлея в материалах с начальными (остаточными) напряжениями при распространении волн вдоль плоских и криволинейных граничных поверхностей в случае однородных (постоянных) указанных начальных (остаточных) напряжений. Указанные проблемы в рамках теории конечных (больших) начальных (остаточных) деформаций, а также в рамках первого и второго вариантов теории малых начальных (остаточных) деформаций были исследованы для сжимаемых и несжимаемых материалов; результаты этих исследований в настоящее время представлены в монографиях [1, т. 2; 3, 6] и в обзорных статьях [20, 24, 29]. В настоящем пункте (п. 4.1.2) отмеченные результаты применяются для сжимаемых материалов с упругим потенциалом в виде (16) в случае изотропных материалов и в виде (17) – (20) – в случае квазиизотропных материалов.

Применительно к анализу закономерностей распространения волн Рэля вдоль плоских и криволинейных граничных поверхностей в материалах с начальными (остаточными) напряжениями были исследованы следующие три проблемы:

первая проблема – распространение волн Рэля вдоль плоской граничной поверхности указанных материалов (вдоль полуплоскости);

вторая проблема – распространение волн Рэля вдоль круговой граничной поверхности кругового цилиндра из указанных материалов;

третья проблема – распространение волн Рэля вдоль граничной поверхности сплошной сферы из указанных материалов.

В случае первой проблемы (распространение волн Рэля вдоль плоской граничной поверхности) соответствующая схема представлена на рис. 17.

Основные результаты применительно к первой проблеме (рис. 17) были получены для случая начальных (остаточных) напряжений в виде (35).

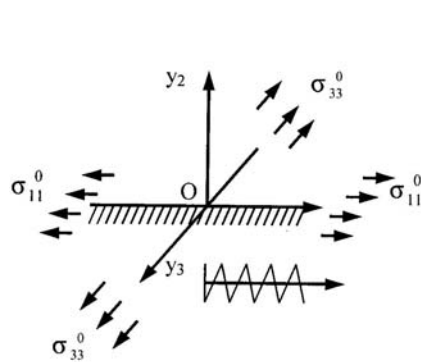


Рис. 17

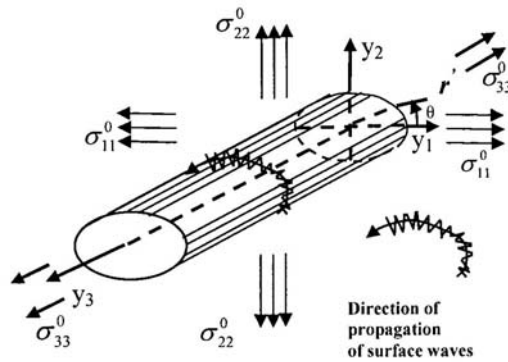


Рис. 18

В случае второй проблемы (распространение волн Рэля вдоль круговой граничной поверхности кругового цилиндра) соответствующая схема представлена на рис. 18.

Основные результаты применительно ко второй проблеме были получены для двух случаев начального нагружения, которое показано на рис. 18. Первый случай начального нагружения соответствует всестороннему равномерному нагружению цилиндра «следающей» нагрузкой; в этом случае имеют место следующие соотношения:

$$\sigma_{11}^0 = \sigma_{22}^0 = \sigma_{33}^0 = \sigma_0; \sigma_0 = \text{const.} \quad (36)$$

Второй случай начального нагружения соответствует одноосному нагружению цилиндра «мертвой» нагрузкой; в этом случае имеют место следующие соотношения:

$$\sigma_{11}^0 = \sigma_{22}^0 = 0; \sigma_{33}^0 = \sigma_0; \sigma_0 = \text{const.} \quad (37)$$

В случае третьей проблемы (распространение волн Рэля вдоль граничной поверхности сплошной сферы) соответствующая схема представлена на рис. 19.

Основные результаты получены для случая начального нагружения в виде (36) применительно к «следающей» и «мертвой» нагрузкам. Волны Рэля распространяются вдоль сферической граничной поверхности сплошной сферы от верхнего полюса ($\theta = 0$ на рис. 19) к нижнему полюсу ($\theta = \pi$ на рис. 19) и в противоположном направлении. В рассматриваемом случае фазовая поверхность представляет собой круговую коническую поверхность с осью $0y_3$ (рис. 19).

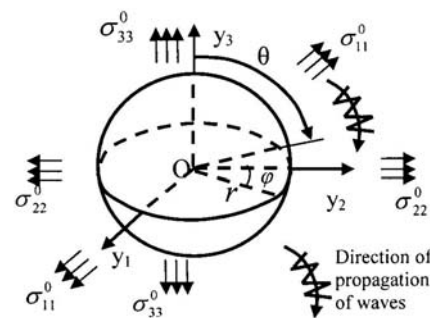


Рис. 19

Общие или основные закономерности распространения волн Рэлея вдоль плоских и криволинейных граничных поверхностей в материалах с начальными (остаточными) напряжениями были получены посредством анализа результатов, соответствующих схемам на рис. 17 – 19. Вышеуказанные результаты соответствуют сравнительно жестким сжимаемым материалам (металлы, сплавы и подобные материалы); эти результаты были получены в рамках теории, краткая информация о которой представлена в п. 2.1. Обсуждаемая общая или основная закономерность для этих материалов может быть сформулирована следующим образом.

Изменения скоростей распространения волн Рэлея линейно зависят от начальных или остаточных напряжений.

Принимая во внимание линейный характер вышесформулированной общей или основной закономерности, обратная форма общей или основной закономерности может быть сформулирована следующим образом.

Начальные или остаточные напряжения линейно зависят от изменений скоростей распространения волн Рэлея.

Таким образом, теоретической основой UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов является **общая или основная закономерность (обратная форма)**, которая была сформулирована применительно к начальным или остаточным напряжениям. Ввиду этого (при применении рассматриваемого UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов) действующие, остаточные, технологические, предварительные, эксплуатационные, сборочные, начальные и другие напряжения должны рассматриваться как *начальные или остаточные напряжения* в рамках теории, краткая информация о которой представлена в п. 2.1. В этом случае возмущения (напряжений и перемещений TLTPEW in BIS, п. 2.1) возникают *в результате возбуждения ультразвуковых колебаний*.

Принимая во внимание общую или основную закономерность (обратную форму), основное соотношение рассматриваемого UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материала может быть сформулировано применительно к двухосным (включая одноосные) напряжениям (рис. 16) (по аналогии с выражениями (30)) в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^0 - \sigma_{33}^0 &= \left(\frac{c_{R1} - c_R^0}{c_R^0} - \frac{c_{R3} - c_R^0}{c_R^0} \right) A_R; \\ \sigma_{11}^0 + \sigma_{33}^0 &= \left(\frac{c_{R1} - c_R^0}{c_R^0} + \frac{c_{R3} - c_R^0}{c_R^0} \right) B_R.\end{aligned}\tag{38}$$

Обозначения σ_{11}^0 и σ_{33}^0 – напряжения, которые в соответствии с обозначениями на рис. 16 должны быть определены; c_{R1} – скорость волн Рэлея, распространяющихся вдоль оси $0y_1$ (рис. 16) в материале с напряжениями σ_{11}^0 и σ_{33}^0 ; c_{R3} – скорость волн Рэлея, распространяющихся вдоль оси $0y_3$ (рис. 16) в материале с напряжениями σ_{11}^0 и σ_{33}^0 ; c_R^0 – скорость волн Рэлея в материале в естественном состоянии ($\sigma_{11}^0 \equiv 0, \sigma_{33}^0 \equiv 0$); A_R и B_R – постоянные величины для каждого из материалов.

Основные соотношения в форме (38) соответствуют двухосным напряжениям, представленным на рис. 16; в случае одноосных напряжений дополнительно следует принять

$$\sigma_{33}^0 = 0.\tag{39}$$

Принимая во внимание (39), основное соотношение для одноосного напряжения может быть получено из (38) в следующей форме:

$$\sigma_{11}^0 = \left(\frac{c_{R1} - c_{R3}}{c_R^0} \right) A_R.\tag{40}$$

Основные соотношения рассматриваемого метода в виде (38) для определения двухосных напряжений включают два соотношения: первое выражение (38) для определения разности двух главных напряжений; второе выражение (38) для определения суммы двух главных напряжений. Ввиду вышеотмеченного два главных напряжения σ_{11}^0 и σ_{33}^0 могут быть определены *раздельно*, не привлекая дополнительных экспериментальных и численных исследований, из выражений (38). Первое выражение (38) напоминает основное соотношение плоской задачи фотоупругости для разности двух главных напряжений, однако в метод фотоупругости *не входит выражение для суммы двух главных напряжений*. В связи с этим два главных напряжения σ_{11}^0 и σ_{33}^0 *не могут* быть определены раздельно непосредственно из соотношений фотоупругости; в этом случае для раздельного определения двух главных напряжений (при применении метода фотоупругости) σ_{11}^0 и σ_{33}^0 необходимо дополнительно привлекать другие экспериментальные и численные методы.

Величины A_R и B_R в (38) могут быть определены для каждого материала следующими *двумя методами*.

Первый метод заключается в теоретическом определении этих величин, в этом случае в явном виде определяются следующие выражения:

$$\begin{aligned} A_R &= A_R(c_R^0, \lambda, \mu, a, b, c); \\ B_R &= B_R(c_R^0, \lambda, \mu, a, b, c). \end{aligned} \quad (41)$$

Необходимо отметить, что выражения (41) зависят от типа применяемой TLTPREW in BIS, краткое описание которой указано в п. 2.1. Примеры выражений (41) для конкретных типов TLTPREW in BIS приведены в обзоре [29], где также указаны публикации, в которых получены эти выражения.

Второй метод заключается в экспериментальном определении величин A_R и B_R для каждого материала и состоит в следующем. Прежде всего, для исследуемого материала из экспериментальных исследований определяется величина c_R^0 . Затем для выбранных значений величин σ_{11}^0 и σ_{33}^0 (произвольные значения, которые удобно реализовать при экспериментальных исследованиях) также из экспериментальных исследований определяются величины c_{R1} и c_{R3} для исследуемого материала. На заключительном этапе с учетом выбранных значений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 , а также экспериментально определенных значений величин c_R^0 , c_{R1} и c_{R3} из выражений (38) определяются значения величин A_R и B_R для конкретного исследуемого материала.

Возможно, экспериментальный метод (второй из двух вышеуказанных методов) определения величин A_R и B_R для каждого материала является предпочтительным, так как в этом случае полученные результаты не зависят от типа применяемой TLTPREW in BIS и учитываются микронеоднородности, существующие в каждом конкретном материале. Дополнительная информация представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6] и в обзорных статьях [20, 24, 29].

Необходимо отметить, что вышеизложенная информация применительно к двум методам определения величин A_R и B_R , входящих в основные соотношения (38) для каждого материала, имеет место и применительно к определению величин A и B , входящих в основные соотношения (30) для каждого материала (в рамках UNDM определения напряжений в элементах конструкций, п. 3.1.2). В связи с этим подобная информация могла бы быть включена и перед выражением (31). Достоинства и недостатки рассматриваемого метода, по существу, указаны в заключительной части п. 2.2.

4.1.3. Проверка UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов. Проверка UNDM определения двухосных напряжений в приповерхностных слоях материала была проведена для кругового диска (рис. 20).

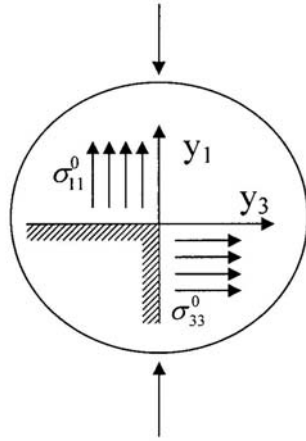


Рис. 20

Чтобы обеспечить возникновение двухосных напряжений, круговой диск (в соответствии с рис. 20) сжимался сосредоточенной нагрузкой вдоль вертикального диаметра. Измерения проводились вдоль горизонтального диаметра дисков из стали и алюминиевого сплава. Необходимо отметить, что положительные направления напряжений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 показаны на рис. 20. В случае нагружения, показанного на рис. 20, напряжения σ_{11}^0 являются сжимающими ($\sigma_{11}^0 < 0$); отмеченная ситуация принята во внимание и на рис. 5.

Экспериментальные результаты получены для вышеуказанных двух дисков с применением двух методов определения величин A_R и B_R , указанных после выражений (41). Также применительно к вышеуказанным двум дискам приме-

нялись результаты теоретического решения в рамках классической линейной теории упругости. Обсуждаемые результаты для стального диска представлены на рис. 21 и для диска из алюминиевого сплава представлены на рис. 22.

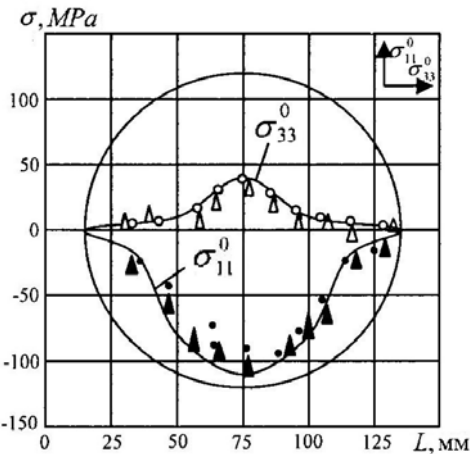


Рис. 21

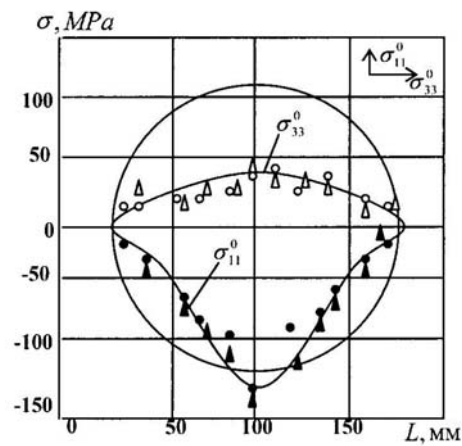


Рис. 22

Обозначения на рис. 21 и на рис. 22: σ_{11}^0 (\blacktriangle – при первом методе определения величин A_R и B_R ; \bullet – при втором методе определения величин A_R и B_R ; сплошные линии соответствуют теоретическому решению в рамках классической линейной теории упругости); σ_{33}^0 (Δ – при первом методе определения величин A_R и B_R ; \circ – при втором методе определения величин A_R и B_R ; сплошные линии соответствуют теоретическому решению в рамках классической линейной теории упругости).

Закключение. Из анализа результатов, представленных на рис. 21 и рис. 22, следует, что получено приемлемое совпадение экспериментальных результатов (при первом и втором методах определения величин A_R и B_R) с теоретическими результатами, соответствующее точному решению в рамках классической линейной теории упругости. Таким образом, из вышеизложенной проверки следует, что обсуждаемый UNDM оп-

ределения двухосных напряжений в приповерхностных слоях материалов является достаточно эффективным методом. Необходимо отметить, что в рассматриваемой на рис. 20 – 22 ситуации напряжения σ_{11}^0 и σ_{33}^0 являются постоянными по толщине дисков.

4.2. Применение UNDM определения напряжений в приповерхностных слоях материалов. В настоящем пункте рассмотрим примеры ультразвукового неразрушающего определения напряжений в приповерхностных слоях материалов; приведенные примеры относятся к определению остаточных напряжений, возникающих при электросварке, и действующих напряжений, возникающих при механическом нагружении.

4.2.1. Определение остаточных напряжений в приповерхностных слоях материалов для случая, когда остаточные напряжения возникают при электросварке. В качестве примера рассмотрим остаточные напряжения, возникшие при электросварке встык двух прямоугольных пластин, которые изготовлены из стали 17Г1С; эти результаты представлены на рис. 23 и 24.

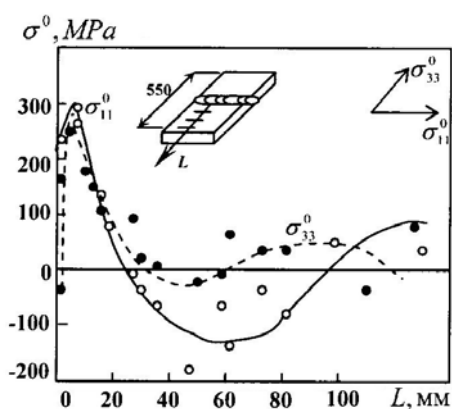


Рис. 23

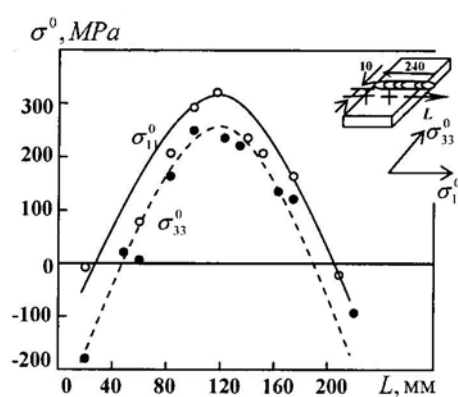


Рис. 24

На рис. 23 приведено распределение напряжений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 в перпендикулярном направлении к линии сплавления (вдоль линии L на рис. 23). На рис. 24 приведено распределение напряжений σ_{11}^0 и σ_{33}^0 вдоль линии сплавления на некотором расстоянии от линии сплавления (вдоль линии L на рис. 24). Размеры сваренных встык пластин и направления осей представлены в верхних частях рис. 23 и 24. Необходимо отметить, что ось Oy_2 на рис. 16 и на рис. 20 – 24 направлена перпендикулярно к плоскости листа.

Дополнительные сведения можно получить из соответствующих публикаций, указанных в списке литературы к обзорной статье [29].

4.2.2. Определение действующих напряжений, возникающих при механическом нагружении. Применение объединенного метода п. 3 и п. 4. Действующие напряжения, возникающие при механическом нагружении, были определены применительно к сосуду внутреннего давления. В указанной ситуации измерение напряжений было реализовано с привлечением UNDM определения напряжений, изложенных в п. 3 и п. 4 настоящей статьи, с учетом их специфических возможностей. Метод п. 3 (UNDM определения трехосных, двухосных и одноосных напряжений в элементах конструкций), строго говоря, предназначен для измерения указанных напряжений, которые не изменяются по толщине (мембранных напряжений). Метод п. 4 (UNDM определения двухосных и одноосных напряжений в приповерхностных слоях материалов), строго говоря, предназначен для измерения указанных напряжений, которые не изменяются в приповерхностных слоях материалов. Объединенный подход (п. 3 + п. 4) позволяет, учитывая вышеизложенное, определять достаточно сложные поля напряжений.

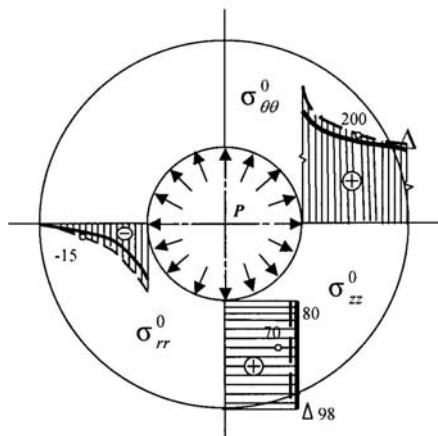


Рис. 25

Заключение. Из анализа результатов, представленных на рис. 25, следует, что наиболее согласованными экспериментальными результатами с результатами, соответствующими теоретическому точному решению в рамках классической линейной теории упругости, являются экспериментальные результаты, полученные объединенным методом (п. 3 + п. 4). Более подробные сведения представлены в статье [9].

Дополнительная информация, относящаяся к проблемам и результатам настоящего п. 4, представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6] и в обзорных статьях [20, 21, 24, 29].

Общее заключение.

В настоящей статье представлена краткая информация о UNDM (ультразвуковых неразрушающих методах) определения напряжений в элементах конструкций и в приповерхностных слоях материалов; при этом в соответствии с названием и замыслом статьи рассмотрены только результаты украинских специалистов (фокус на украинские исследования, обзор результатов). Рассмотрены теоретическая база, описание методов и приборов для ультразвуковых измерений и примеры применения для определения напряжений, возникающих от источников различного характера. *Особенностями обсуждаемых результатов специалистов Украины является создание подходов для определения трехосных напряжений (включая двухосные и одноосные напряжения); подавляющее большинство исследований других стран и научных центров посвящено созданию подходов для определения только одноосных напряжений.*

Обсуждаемые подходы предназначены для сжимаемых сравнительно жестких материалов (металлы, сплавы и подобные материалы). Рассмотренные примеры подтверждают, что обсуждаемые подходы и методы являются достаточно эффективными применительно к определению напряжений в элементах конструкций и в приповерхностных слоях материалов. В статье также отмечены достоинства и недостатки обсуждаемых методов.

Дополнительная информация по проблемам и результатам, рассмотренным в настоящей статье, представлена в монографиях [1, т. 2; 3, 6 – 8], обзорных статьях [20, 21, 23, 29] и в отдельных публикациях, которые указаны в списке литературы настоящей статьи, и в списках литературы [1, т. 2; 3, 6 – 8, 20, 21, 23, 29].

РЕЗЮМЕ. В статті в короткій формі наведено результати по обґрунтуванню, розробці та застосуванню UNDM (ультразвукових неруйнівних методів) визначення напружень в елементах конструкцій та в приповерхневих шарах матеріалів; причому в відповідності з назвою статті (фокус на українські дослідження) розглянуто виключно результати, одержані українськими спеціалістами. Особливістю українських досліджень є розробка вищевказаних методів визначення напружень стосовно до *тривісних* (включаючи двовісні та одновісні напруження як частинний випадок) напружень. В той час, як переважна кількість досліджень інших країн та інших наукових центрів присвячена розробці вказаних методів визначення напружень стосовно *тільки одновісних* напружень. UNDM

визначення напружень базуються на закономірностях розповсюдження пружних хвиль в тілах з початковими (залишковими) напруженнями, включаючи закономірності розповсюдження поверхневих хвиль Релея. Результати, що наведено в цій статті, отримано в Національній академії наук України (Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка та Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона).

1. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями: В 2-х томах. – К.: Наук. думка, 1986.
Т. 1. Общие вопросы. – 374 с.
Т. 2. Закономерности распространения. – 536 с.
2. Гузь А.Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел. – К.: Вища шк., 1986. – 512 с.
3. Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями. – К.: «А.С.К.», 2004. – 672 с.
4. Гузь А.Н., Жук А.П., Махорт Ф.Г. Волны в слое с начальными напряжениями. – К.: Наук. думка, 1976. – 104 с.
5. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г. Об описании влияния начальных деформаций на скорости распространения упругих волн // ДАН СССР. – 1971. – **198**, № 2. – С. 316 – 318.
6. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г. Акустоэлектромагнитоупругость (Т. 3 издания в 5-и томах «Механика связанных полей в элементах конструкций», под общей ред. А.Н.Гузя). – К.: Наук. думка, 1988. – 286 с.
7. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – К.: Наук. думка, 1977. – 152 с.
8. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И., Лебедев В.К. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. – К.: Наук. думка, 1974. – 108 с.
9. Патон Б.Е., Труфяков В.И., Гуца О.И., Гузь А.Н., Махорт Ф.Г. Ультразвуковой неразрушающий метод измерения напряжений в сварных конструкциях // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1986. – Вып. 2. – С. 13 – 19.
10. Akbarov S.D., Guz A.N. Mechanics of curved composites and some related problems for structural members // Mech. Advan. Mat. and Struc. – 2004. – **11**, Pt II, N 6. – P. 445 – 515.
11. Gidaspow D. Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: Supercomputer modeling // Appl. Mech. Rev. – 1986. – **39**, N 1. – P. 1 – 23.
12. Guz A.N. Non-destructive ultrasonic method of determination of biaxial stresses // Proc. 9th Int. Conf. on Experimental Mechanics. – **3**, Baby Tryk. – Copenhagen, Denmark, 1990. – P. 1171 – 1179.
13. Guz A.N. Elastic waves in compressible materials with initial stresses and nondestructive ultrasonic method of determination of two-axial residual stresses // Abstracts of 18th Int. Cong. of Theor. and Appl. Mech. (Haifa, Israel, August 22 – 28, 1992). – Haifa, 1992. – P. 68.
14. Guz A.N. Elastic waves and non-destructive method of determination of two-axial stresses // Recent Advances in Experimental Mechanics: Proc. 10th Int. Conf. on Experimental Mechanics (July 18 – 22 1994, Lisbon): A.A.Balkema, Netherland, 1994. – P. 723 – 728.
15. Guz A.N. Surface waves in bodies with initial stresses and ultrasonic non-destructive method of determination of stresses in near-the-surface layers of bodies // Abstracts of 19th Int. Cong. of Theor. and Appl. Mechanics (Kyoto, Japan, August 25 – 31, 1996). – Kyoto, 1996. – P. 631.
16. Guz A.N. Fundamentals of the Three-Dimensional Theory of Stability of Deformable Bodies. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999. – 556 p.
17. Guz A.N. On foundation of non-destructive method of determination of three – axial stresses in solids // Abstracts of 20th Int. Cong. of Theor. and Appl. Mechanics (Chicago, USA, Aug. 27 – Sep. 2, 2000). – Chicago, 2000. – P. 187.
18. Guz A.N. Constructing of the three-dimensional theory of stability of deformable bodies // Int. Appl. Mech. – 2001. – **37**, N 1. – P. 1 – 37.
19. Guz A.N. Elastic waves in bodies with initial (residual) stresses // Int. Appl. Mech. – 2002. – **38**, N 1. – P. 23 – 59.
20. Guz A.N. On foundations of the ultrasonic non-destructive method of determination of stresses in near-the-surface layers of solid bodies // Int. Appl. Mech. – 2005. – **41**, N 8. – P. 944 – 955.
21. Guz A.N. On foundations of the ultrasonic non-destructive method of determination of stresses in near-the-surface layers of solid bodies // Proc. 8th Conf. DSTA 2005 (Dec. 12 – 15, Lodz, Poland). – **1**. – Lodz, 2005. – P. 13 – 36.
22. Guz A.N. On study of nonclassical problems of fracture and failure mechanics and related mechanisms // ANNALS of the European Academy of Science. – 2006 – 2007. – P. 35 – 68.

23. *Guz A.N.* Ultrasonic non-destructive methods of stress analysis in material and structural members. (Review) // *Int. Appl. Mech.* – 2010. – **46**, N 11. – P. 1213 – 1220.
24. *Guz A.N.* On the foundations of the ultrasonic non-destructive determination of stresses in near-the-surface layers of materials. Review // *J. Phys. Science and Application.* – 2011. – **1**, N 1, June. – P. 1 – 15.
25. *Guz A.N.* Stability of elastic bodies under uniform compression (Review) // *Int. Appl. Mech.* – 2012. – **48**, N 3. – P. 241 – 294.
26. *Guz A.N., Babich S.Yu., Rudnitsky V.B.* Contact problems for elastic bodies with initial stresses: Focus on Ukrainian research // *Appl. Mech. Rev.* – 1998. – **51**, N 5. – P. 343 – 371.
27. *Guz A.N., Gushcha O.I., Makhort F.G., Lebedev V.K.* Method of measurement of residual stresses without fracture on base of acoustoelasticity // *Proc. Int. Symp. on High Quality Welled Structures: Design, Performance, and Control.* – Zagreb, 1978. – P. 269 – 272.
28. *Guz A.N., Guz I.A., Menshykov A.V., Menshykov V.A.* Three-dimensional problems in the dynamic fracture mechanics of materials with interface cracks (Review) // *Int. Appl. Mech.* – 2013. – **49**, N 1. – P. 1 – 61.
29. *Guz A.N., Makhort F.G.* The physical fundamentals of the ultrasonic non-destructive stress analysis in solids // *Int. Appl. Mech.* – 2000. – **36**, N 9. – P. 1119 – 1149.
30. *Guz A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I., Lebedev V.K.* Theory of wave propagation in an elastic body with initial deformations // *Sov. Appl. Mech.* – 1970. – **6**, N 12. – P. 1308 – 1313.
31. *Guz A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I., Lebedev V.K.* Theory underlying the determination of initial stresses from the results of ultrasonic measurements // *Sov. Appl. Mech.* – 1971. – **7**, N 6. – P. 676 – 679.
32. *Guz A.N., Rushchitsky J.J.* Main Ukrainian historical and modern sources on mechanics: Focus on the S.P.Timoshenko Institute of Mechanics // *Applied Mechanics Reviews.* – 1998. – **51**, N 3. – P. 199 – 208.
33. *Guz A.N., Rushchitsky J.J.* Analysis of various bibliometric indicators for the evaluation of scientific journals and scientists // *Int. Appl. Mech.* – 2013. – **49**, N 3. – P. 266 – 293.
34. *Guz A.N., Zozulya V.V.* Fracture dynamics with allowance for a crack edges contact interaction // *Int. J. of Nonlinear Sci. and Numerical Simulation.* – 2001. – **2**, N 3. – P. 173 – 233.
35. *Hohe J., Becker W.* Effective stress-strain relations for two-dimensional cellular sandwich cores: Homogenization, material models, and properties // *Appl. Mech. Rev.* – 2002. – **55**, N 1. – P. 61 – 87.
36. *Maugin G.A.* Material forces: Concepts and application // *Appl. Mech. Rev.* – 1995. – **48**, N 5. – P. 213 – 245.
37. *Micromechanics* of composite materials: Focus on Ukrainian research // *Appl. Mech. Rev.* (Special Issue, A.N.Guz – Guest Editor). – 1992. – **45**, N 2. – P. 13 – 101.

Поступила 22.04.2013

Утверждена в печать 03.12.2013