

## ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛА

© 2020 г. Л.А. Пасманик<sup>1,\*</sup>, А.В. Камышев<sup>1,\*</sup>, А.В. Радостин<sup>2,\*\*</sup>, В.Ю. Зайцев<sup>2,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ООО ИНКОТЕС, Россия 603163 Нижний Новгород, ул. Бринского, 6

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail : \*info@encotes.ru, \*\*radostin@ipfran.ru, \*\*\*vyuzai@ipfran.ru

Поступила в редакцию 06.08.2020; после доработки 05.10.2020

Принята к публикации 06.10.2020

Предложен акустический способ неразрушающего контроля вариаций структуры металла, обусловленных нарушениями технологии изготовления или накоплением повреждений в процессе эксплуатации. В его основе лежат измерения микроструктурно-чувствительных акустических параметров, которые определяются как нормированные величины отклонения отношений скоростей продольной и сдвиговых волн от значений, характерных для «базового состояния» структуры металла. В качестве «базового», в зависимости от конкретной задачи, рассматривается состояние структуры металла до начала эксплуатации объекта контроля или структуры металла контрольных образцов, прочностные характеристики которых определены стандартными методами разрушающего контроля и находятся в допустимых пределах. Обсуждается связь предложенных акустических параметров с различием между «базовым» и реальным состоянием материала (в терминах интегральных величин податливости микроструктурных неоднородностей по отношению к сдвиговым и продольным напряжениям).

Эффективность предложенного подхода к оценке структуры металла продемонстрирована на результатах экспериментальных исследований двух существенно различных типов структуры: с изотропным и анизотропным характером неоднородностей. Инструментальный контроль предложенных параметров может быть использован для:

неразрушающего контроля качества выполнения техпроцессов в процессе производства изделий металлургии и машиностроения;

оценки степени накопления повреждений металла при эксплуатации;

оценки механических свойств, характеристик трещиностойкости и других физических свойств металла.

*Ключевые слова:* ультразвуковой неразрушающий контроль, продольные волны, сдвиговые волны, микроструктура металла, накопление повреждений, контроль качества металла.

DOI: 10.31857/S0130308220120039

### ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах жизненного цикла продукции металлургии и машиностроения важной задачей является оценка прочностных характеристик изделий. Оценка этих характеристик осуществляют по результатам разрушающих испытаний, которые при разработке техпроцессов проводятся на контрольных образцах, на стадии изготовления — на образцах, вырезанных из отобранных изделий, а в процессе эксплуатации, при необходимости и наличии технической возможности, — на образцах, вырезанных из контролируемого оборудования. Такой подход связан с отсутствием надежных безобразцовых неразрушающих методов контроля прочностных характеристик, определяющих ресурс безопасной эксплуатации оборудования. К таким характеристикам, в первую очередь, относятся механические свойства (пределы прочности и текучести, относительные удлинение и сужение) и параметры трещиностойкости, характеризующие вязкость разрушения (например, критический коэффициент интенсивности напряжений, ударная вязкость).

В результате выборочности контроля фактические значения прочностных характеристик элементов оборудования могут отличаться от полученных на образцах, что компенсируется прочностными запасами и увеличением частоты эксплуатационного контроля, и, как следствие, приводит к повышению стоимости оборудования и эксплуатационных издержек. Актуальность снижения стоимости оборудования и затрат на его эксплуатацию предопределила широко ведущиеся в мире исследования, направленные на создание соответствующих неразрушающих методов.

В основе этих исследований лежит тот факт, что прочностные характеристики определяются структурой металла, определяющей, в свою очередь, практически все физические свойства металла (электрические, магнитные, акустические, тепловые и т.д.). Значения физических величин, характеризующие эти свойства, могут быть измерены неразрушающими методами и сопоставлены со значениями прочностных характеристик.

В частности, известны работы по решению задач структурометрии с применением магнитных [1] и вихретоковых [2] методов. Практическое применение получил метод безобразцовой оценки

механических свойств металла по результатам контроля твердости с использованием переносных твердомеров по ГОСТ 22761—77. Применение этих методов ограничено получением информации только о структуре приповерхностного слоя, в то время как структура, а, следовательно, и прочностные характеристики изделия могут существенно изменяться по глубине металла.

Возможность получения информации о структуре всего объема металла может быть обеспечена применением методов, основанных на измерениях физических величин, характеризующих акустические свойства металлов (амплитуда сигнала, время его распространения, спектральные характеристики и т.д.). Современное состояние акустических методов структуроскопии достаточно полно отражено в обзорах, представленных в работах [3—5]. Необходимо выделить метод акустической структуроскопии, основанный на измерении величины затухания акустических волн. Применение этого метода регламентируется ГОСТ Р 53205—2008 для определения размеров зерна.

Измерение скоростей распространения акустических волн представляет более широкие (по сравнению с измерениями их затухания) возможности для оценки структуры металла [6]. Однако измерение абсолютных значений скорости с приемлемой погрешностью требует либо большой протяженности пути распространения сигнала (порядка 1 м и более), либо очень высокой точности ( $\sim 10^{-4}$ ) измерений толщины объекта контроля. В частности, такой подход используется при оценке структуры и обусловленных ею механических свойств пруткового проката [7, 8].

Для тонкостенных крупногабаритных металлоконструкций, особенно с односторонним доступом к поверхности, такая точность может быть обеспечена только на образцах, вырезанных из объекта контроля. В связи с этим, использование абсолютных значений скоростей при оценке структуры металла имеет ограничение, если вырезка образцов исключена или нежелательна.

В настоящей работе вместо непосредственно скоростей распространения акустических волн предложено использование параметров, характеризующих вариации отношений скоростей ортогонально-поляризованных сдвиговых и продольной волн относительно некоторого известного состояния. На практике, вместо отношения скоростей используются отношения времен распространения соответствующих волн, измеряемые эхоимпульсным методом, исключаяющим необходимость измерения толщины объекта контроля и позволяющим выполнять измерения не только на просвет, но и при наличии лишь одностороннего доступа к обследуемому объекту.

Значения предложенных параметров позволяют количественно характеризовать вариации структурных факторов, определяющих соответствующие вариации физических свойств металлов, в том числе их прочностных характеристик. В частности, могут рассматриваться такие факторы, как, например, кристаллическая текстура, остаточные деформации, размер зерна, объемная доля включений, выделение частиц второй фазы, концентрация микродефектов и т.п.

При всем многообразии этих факторов можно утверждать, что прочностные характеристики металла и другие его физические свойства, в том числе скорости распространения акустических волн, в конечном счете, обусловлены податливостью структуры, то есть ее способностью реагировать на локальные силовые воздействия. Другими словами, податливость может использоваться в качестве интегральной характеристики структуры металла.

Также в работе приведено теоретическое обоснование связи вариаций скоростей распространения объемных акустических волн с вариациями продольной и сдвиговой податливости, обусловленными структурными изменениями в металле. Приведены соотношения, устанавливающие связь значений продольной и сдвиговой податливости микроструктурных неоднородностей с предложенными параметрами, характеризующими отношения скоростей ортогонально-поляризованных сдвиговых и продольной объемных волн.

Приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности использования этих параметров для построения методик неразрушающего контроля прочностных характеристик основного металла и сварных соединений на стадиях разработки техпроцессов, производства и эксплуатации изделий металлургии и машиностроения.

### **ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ОТНОШЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА**

Представленные в [6] результаты исследований относительных изменений скоростей распространения в металлах и сплавах объемных и поверхностных рэлеевских ультразвуковых волн свидетельствуют, что для углеродистых и низколегированных сталей полный диапазон изменений, обусловленных структурным фактором, составляет единицы процентов. При этом имеющиеся экспериментальные результаты свидетельствуют, что значимым структурным изменениям

в пределах этого диапазона могут соответствовать изменения скорости звука на десятки доли процента (см., напр., рис. 3, 4).

Для получения информации о структурных неоднородностях не только в поверхностных и подповерхностных слоях объекта контроля необходимо использование объемных ультразвуковых волн. Прямые измерения их скоростей распространения требуют знания толщин металла в точках контроля, что, как уже было отмечено выше, накладывает ограничение на их применение для построения методик безобразцового неразрушающего контроля структурных и прочностных характеристик металла натуральных объектов.

Решением этой проблемы представляется переход от измерения скоростей распространения ультразвуковых волн к прецизионному определению отношений этих скоростей через отношения времен распространения. В этом случае возможно использование эхометода и полученные результаты не зависят от расстояний.

Аналогичный подход используется при измерении механических напряжений эхоимпульсным методом, основанным на эффекте акустоупругости, — зависимости скоростей распространения ультразвуковых волн от напряжений [9]. Приборное и методическое обеспечение метода акустоупругости, позволяющее выполнять прецизионное измерение времен распространения акустических сигналов, может быть применено и для оценки структурных характеристик металлов.

Одним из параметров, использующих отношение скоростей поляризованных упругих волн, является акустическая анизотропия,  $a$  (%), характеризующая относительную разность скоростей распространения ортогонально-поляризованных сдвиговых волн:

$$a(\%) = 2 \cdot \frac{V_{s1} - V_{s2}}{V_{s1} + V_{s2}} \cdot 100\% = 2 \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 + t_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$  — скорости распространения ортогонально поляризованных сдвиговых волн;  $t_1$ ,  $t_2$  — соответствующие им времена распространения (задержки).

В частности, в ГОСТ Р 55805—2013 параметр акустической анизотропии используется в качестве количественной характеристики текстуры проката. В [10] приведены результаты исследований возможности использования акустической анизотропии для оценки степени накопления повреждений в металле оборудования реакторных установок АЭС, характерные повреждения в которых локализованы на недоступной внутренней поверхности. Также параметр акустической анизотропии использовался для определения связи зависимости акустоупругих характеристик листового проката с технологией его изготовления [11].

Акустическая анизотропия характеризует особенности структуры материала в плоскости, перпендикулярной направлению прозвучивания, поскольку ее величина обусловлена зависимостью скоростей сдвиговых волн от анизотропии структуры в направлениях их поляризации. В связи с этим, при использовании акустической анизотропии в методиках неразрушающего контроля, в качестве нулевого значения («точки отсчета»), естественным выглядит использование значения  $a(\%) = 0$ , соответствующего изотропному состоянию структуры металла.

Вместе с тем изменения структуры металла, обусловленные отклонениями техпроцессов изготовления изделий металлургии и машиностроения и накоплениями эксплуатационных повреждений, могут не иметь выраженной анизотропии. Изотропные («ненаправленные») изменения структуры металла, в частности, могут возникать при изменении объемной доли второй фазы, при изменении размеров зерна, при накоплении рассеянных микроповреждений и т.п. Для оценки «ненаправленных» изменений структуры металла могут быть использованы параметры, характеризующие различие скоростей распространения упругих волн, имеющих сдвиговые и продольные (вдоль направления распространения) поляризации. В этом случае, в отличие от параметра анизотропии, выбор опорного значения не столь очевиден.

Так в работе [12] в этом качестве использовались параметры  $D_{1,2} = d_{1,2} - 1$ , где

$$d_1 = \frac{V_p}{V_{s1}} = \frac{t_1}{t_3}, \quad d_2 = \frac{V_p}{V_{s2}} = \frac{t_2}{t_3}, \quad (2)$$

здесь  $V_p$  — скорость распространения продольной волны;  $t_3$  — соответствующее ей время распространения (задержки). В работе приведены результаты исследований малоциклового усталости на изменения параметров  $D_1$ ,  $D_2$ , выполненные на образцах из стали 08Х18Н10Т. Показано, что эти параметры могут быть использованы для оценки степени накопления повреждений при малоциклового усталости и оценки остаточного (до отказа) количества циклов нагружения.

По аналогии с параметром анизотропии, характеризующим отклонение структуры металла от изотропного состояния, представляется целесообразным и для отношений продольных и сдвиговых волн использование физически обусловленной «точки отсчета». Вместе с тем выбор такой точки не столь очевиден, поскольку, в общем случае, величины этих отношений зависят от нескольких факторов: класс и марка металла, размер зерна и т.п. Поэтому в качестве «точки отсчета» предлагается использовать некое типовое значение  $d_T$ , соответствующее отношению скоростей продольной и сдвиговых волн для «базового» состояния структуры металла:

$$d_T = \frac{2V_p^0}{V_{s1}^0 + V_{s2}^0}, \quad (3)$$

где  $V_p^0$  и  $V_{s1,2}^0$  — скорости распространения продольной и сдвиговых волн, соответствующие «базовому» состоянию структуры металла.

Следует подчеркнуть, что «базовое» состояние структуры металла, а, следовательно, и значение параметра  $d_T$  не универсальны:

при оценке качества изготовления изделий значение  $d_T$  и его разброс определяются по результатам измерений на контрольных образцах (однотипных изделиях, прочностные характеристики которых определены стандартными методами разрушающего контроля и находятся в допустимых пределах);

при оценке структурных изменений металла объекта контроля в процессе эксплуатации значение  $d_T$  определяется по результатам измерений, выполненных на данном объекте контроля в исходном (до начала эксплуатации) состоянии.

В этом случае для построения методик неразрушающего контроля могут использоваться параметры, характеризующие отклонения отношений скоростей продольной и сдвиговых волн от типового значения:

$$\Delta_{1,2} (\%) = \left( \frac{d_{1,2}}{d_T} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (4)$$

В такой форме «базовому» состоянию материала соответствуют нулевые значения параметров  $\Delta_{1,2}$ . С точностью до величин второго порядка малости, связь параметров  $\Delta_{1,2}(\%)$  и акустической анизотропии  $a(\%)$  со значениями отклонений скоростей распространения продольной и сдвиговых волн в металле объекта контроля и в металле заведомо качественных изделий ( $\Delta V_p$  и  $\Delta V_{s1,2}$ ) принимает следующий вид:

$$\Delta_{1,2} (\%) \approx \left( \frac{\Delta V_p}{V_p^0} - \frac{\Delta V_{s1,2}}{V_{s1,2}^0} \right) \cdot 100\%; \quad (5)$$

$$a (\%) \approx \left( \frac{\Delta V_{s1}}{V_{s1}^0} - \frac{\Delta V_{s2}}{V_{s2}^0} \right) \cdot 100\% = \Delta_2 (\%) - \Delta_1 (\%). \quad (6)$$

Акустическая анизотропия  $a(\%)$  и параметры  $\Delta_{1,2}(\%)$ , которые можно назвать характеристиками акустической неоднородности металла, имеют одинаковый порядок величины и в совокупности характеризуют состояние структуры металла. Совместное использование этих микроструктурно-чувствительных акустических параметров может быть положено в основу методик неразрушающего контроля прочностных характеристик металла для изделий металлургии и машиностроения как в процессе их изготовления, так и при эксплуатации.

Необходимо подчеркнуть, что скорость звука, а, следовательно, и значения параметров акустической неоднородности определяются как структурными характеристиками, так и упругими напряжениями (явление акустоупругости). С учетом этого, при практическом использовании этих параметров должны быть предусмотрены меры для снятия упругих нагрузок или методического исключения их влияния на результаты измерений.

### СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ВАРИАЦИЯМИ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ МАТЕРИАЛА

Прежде чем перейти к экспериментальным примерам, обсудим также связь введенных параметров акустической неоднородности с вариациями упругих модулей материала на основе известных соотношений [13]:

$$V_p = \frac{\sqrt{K + (4/3)G}}{\rho}; \quad V_s = \frac{\sqrt{G}}{\rho}, \quad (7)$$

где  $V_p$  и  $V_s$  — скорости распространения продольной и сдвиговой волн соответственно;  $K$  и  $G$  — модули объемного сжатия и сдвига;  $\rho$  — плотность материала.

Из (7) следует, что относительные вариации скоростей при отклонениях структуры металла от исходного состояния связаны с относительными вариациями модулей упругости соотношениями:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p^0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta K + (4/3)\Delta G}{K_0 + (4/3)G_0}; \quad \frac{\Delta V_s}{V_s^0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta G}{G_0}. \quad (8)$$

В общем случае эффективные модули сдвига «базовой» структуры и/или их изменения оказываются зависящими от поляризации и различными ( $G_1 \neq G_2$ ;  $\Delta G_1 \neq \Delta G_2$ ), тогда

$$a = \left( \frac{\Delta V_{s1}}{V_{s1}^0} - \frac{\Delta V_{s2}}{V_{s2}^0} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta G_1}{G_1^0} - \frac{\Delta G_2}{G_2^0} \right), \quad (9)$$

а параметры  $\Delta_{1,2}$  определяются формулой:

$$\Delta_{1,2} = \left( \frac{\Delta V_p}{V_p^0} - \frac{\Delta V_{s1,2}}{V_{s1,2}^0} \right) = \frac{3}{2} \frac{1}{3 + 4t_0} \left( \frac{\Delta K}{K_0} - \frac{\Delta G_{1,2}}{G_{1,2}^0} \right), \quad (10)$$

где  $K_0$ ,  $G_1^0$ ,  $G_2^0$  — значения модуля объемного сжатия и модулей сдвига в двух ортогональных направлениях для «базового» состояния структуры металла;  $\Delta K$ ,  $\Delta G_1$ ,  $\Delta G_2$  — отклонения значений этих модулей в металле объекта контроля, а параметр  $t_0$  определяется выражением:

$$t_0 = \frac{G_0}{K_0} = \frac{1}{(d_r)^2 - (4/3)}. \quad (11)$$

Отдельный интерес представляет случай изотропных изменений структурных неоднородностей ( $\Delta G_1 = \Delta G_2$ ), при изотропном «базовом» состоянии металла ( $G_1 = G_2$ ) параметр анизотропии  $a$  (%) = 0 и  $\Delta = \Delta_1 = \Delta_2 \neq 0$ . Такая ситуация возникает, например, при изменениях размера зерна в изотропном (нетекстурированном) металле. При этом параметр анизотропии нечувствителен к такому изменению структуры, в то время как значения параметров  $\Delta_{1,2}$  определяются размером зерна.

Выражения (9), (10) устанавливают связь параметров акустической неоднородности с вариациями модулей упругости, обусловленными отклонениями структуры. Вместе с тем для интерпретации результатов измерений в следующем разделе будут приведены соотношения, устанавливающие связь параметров акустической неоднородности с упругими характеристиками (параметрами податливости) и концентрацией микроструктурных особенностей.

### СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МИКРОНЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА

Для получения соотношений, устанавливающих связь параметров акустической неоднородности с характеристиками микроструктурных особенностей, воспользуемся физической моделью микронеоднородной среды с контрастно-мягкими включениями. Элементами такой модели являются базовая среда, которой соответствуют начальные значения упругих модулей (среда—матрица) и распределенные в ней включения, упругие модули которых существенно меньше, чем у среды—матрицы. В частности, такая модель используется в геофизике, где в качестве включений рассматриваются трещины, контакты между элементами горной породы и т.п.

В металлах, в рамках такой модели, в качестве включений можно рассматривать выраженные границы между кристаллитами, микротрещины, поры, неметаллические включения, дислокационные скопления, частицы второй фазы и т.п. При этом характерные размеры этих включений со-



Рис. 1. Одномерная модель среды, содержащая контрастно-мягкие включения, на которых локализованы наибольшие отклонения от закона Гука.

ответствует мезоструктуре, так как они существенно превышают межатомные расстояния, но при этом значительно меньше длины зондирующих акустических волн.

Данная модель вне зависимости от конкретного типа включений характеризуется обобщенными параметрами, в том числе отношением упругих модулей этих включений к модулям среды—матрицы («мягкостью») и концентрацией (объемной долей) включений. Простейшая одномерная и одноуровневая модель микронеоднородной среды с контрастно-мягкими включениями [5] представлена на рис. 1, где показан фрагмент «базового» материала с упругим модулем  $E_0$ . Включение имеет модуль  $E_H = \zeta E_0$ , при этом параметр  $\zeta \ll 1$  служит мерой его «мягкости». Объемное содержание (которое в одномерном случае сводится к линейной концентрации) таких неоднородностей характеризуется параметром  $\nu \ll 1$ .

В рамках этой модели для описания свойств микронеоднородной среды используется понятие изменений интегральной податливости ( $\Delta N$ ), характеризующей изменение реакции среды на механическое воздействие. При этом надо понимать, что изначально среда—матрица может представлять собой неоднородную структуру. В качестве примера можно рассматривать поликристаллическую структуру металла в состоянии поставки, в которой в процессе эксплуатации возникает коррозионное растрескивание. В этом случае изменение податливости будет определяться степенью развития этого процесса.

Для модели одномерной среды в [5] приведены соотношения, устанавливающие связь изменения интегральной податливости с вариациями модуля Юнга микронеоднородной среды. В случае малых концентраций рассматриваемых структурных неоднородностей, эти выражения принимают простой вид:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \Delta N, \quad (12)$$

где  $\Delta N$  имеет смысл интегральной податливости, вносимой в материал неоднородностями и определяемой «мягкостью»  $\zeta$  и концентрацией  $\nu$ :

$$\Delta N = \int \frac{\nu(\zeta)}{\zeta} d\zeta \quad (13)$$

(в общем случае дефекты могут быть неодинаковыми и характеризоваться распределением  $\nu(\zeta)$  по параметру податливости).

В [14, 15] этот подход обобщен для трехмерной модели с планарными неоднородностями (показательным примером являются трещины или межзеренные границы с планарной геометрией). Такие неоднородности характеризуются уже двумя параметрами податливости: по отношению к нагружению по нормали ( $\Delta N_p$ ) и сдвиговому нагружению ( $\Delta N_s$ ) (например, для трещин, являющихся очень важным типом неоднородностей в задачах неразрушающего контроля, подобные параметры нормальной и сдвиговой податливости были введены в работах [16, 17]).

Выражения для упругих модулей в этом случае можно получить, находя упругую энергию среды для различных типов механического нагружения, учитывая вклады в накопленную энергию среды—матрицы и микронеоднородностей. Подобно отмеченному выше одномерному случаю, при этом можно не использовать конкретную модель отдельных неоднородностей, а характеризовать их только концентрацией и податливостями по отношению к сжатию по нормали и сдвиговому нагружению. Аналогично (12) в этом случае изменения величин упругих модулей определяются вносимыми в среду интегральными величинами нормальной и сдвиговой податливостей (в которых комбинированным образом учитываются величины концентрации неоднородностей и величины податливостей для отдельных неоднородностей). В обозначениях [15] в

случае малых концентраций включений соответствующие выражения для вариаций модуля объемного сжатия  $K$  и сдвига  $G$  имеют вид:

$$\frac{\Delta K}{K_0} = \frac{1}{3(1-2\vartheta_0)} \Delta N_p; \quad (14)$$

$$\frac{\Delta G}{G_0} = \frac{2}{5} \left[ \frac{1}{3(1+\vartheta_0)} \Delta N_p + \Delta N_s \right], \quad (15)$$

где  $\Delta N_p = \int \nu(\zeta) \zeta^{-1} d\zeta$ ,  $\Delta N_s = \int \nu(\xi) \xi^{-1} d\xi$ ,  $\zeta$  и  $\xi$  — параметры «мягкости» включений, определяемые отношениями эффективных значений модуля Юнга и модуля сдвига включения к соответствующим параметрам среды—матрицы;  $\vartheta_0$  — коэффициент Пуассона среды—матрицы, связанный с начальными значениями модулей  $K_0$  и  $G_0$  соотношением:

$$\vartheta_0 = \frac{3-2t_0}{6+2t_0}, \quad (16)$$

где  $t_0 = G_0/K_0$ .

Отметим, что эквивалентные (14) и (15) выражения в несколько иных обозначениях были независимо получены в [18], а позднее в [19, 20] данный подход был распространен на случай высокой концентрации дефектов.

Дополнительно необходимо отметить, что для изотропной среды, для которой определяемые выражением (2) параметры  $d_{1,2}$  совпадают ( $d_1 = d_2 = d$ ), отношения скоростей продольной и сдвиговых волн однозначно связаны с фактическим значением коэффициента Пуассона  $\vartheta$  материала:

$$\vartheta = \frac{1,5(d^2 - (4/3)) - 1}{3(d^2 - (4/3)) + 1}. \quad (17)$$

В частности, определяемый экспериментально параметр  $d_t$  однозначно определяется коэффициентом Пуассона «базовой» среды.

Соотношения (14) и (15) позволяют связать определяемый выражением (10) параметр акустической неоднородности  $\Delta$  с интегральными величинами нормальной и сдвиговой податливостей  $\Delta N_p$  и  $\Delta N_s$ , вносимых в среду микронеоднородностями:

$$\Delta = \frac{1}{5(3+4t_0)} \left[ \frac{(3+t_0)(15-4t_0)}{18t_0} \Delta N_p - 3\Delta N_s \right]. \quad (18)$$

Следует отметить, что формулы (14)—(18) получены для изотропного материала, то есть для такого, у которого изменение сдвиговой податливости ( $\Delta N_s$ ) одинаково при любом направлении сдвига. В частности, в случае поликристаллической структуры металла изотропность предполагает произвольную взаимориентацию границ зерен. Соотношение между изменениями нормальной и сдвиговой податливости  $\Delta N_p$  и  $\Delta N_s$ , вообще говоря, может быть различным для различных типов микроструктурных изменений структуры металла, возникающих при отклонении технологических процессов или при накоплении повреждений. Например, при изменении свойств межзеренных границ, как правило, преобладает изменение их сдвиговой податливости, то есть имеет место соотношение  $\Delta N_s \gg \Delta N_p$ . Существенное изменение продольной податливости возникает при появлении и развитии объемных (трехмерных) неоднородностей, например, при порообразовании и разрыхлении материала или изменении размеров зерна.

В случае различного рода пространственно-ориентированных воздействий (например, одноосном нагружении или прокатке) материал становится структурно-анизотропным. Для такого материала параметры модуля сдвига и сдвиговой податливости можно привязать к направлениям взаимно ортогональных осей анизотропии (ось 1 и ось 2 соответственно), для которых изменения интегральной сдвиговой податливости  $\Delta N_{s1}$ ,  $\Delta N_{s2}$  и соответствующие им изменения модуля сдвига  $\Delta G_1$ ,  $\Delta G_2$  оказываются различными.

В этом случае, выражение, определяющее связь параметров  $\Delta_{1,2}$  с параметрами податливостей, принимает вид, аналогичный по структуре выражению (18), но имеющей другие коэффициенты

перед  $\Delta N_p$  и  $\Delta N_{s1,2}$  из-за возникновения упорядоченности структурных неоднородностей. Так, в случае ориентации планарных неоднородностей (например, межзеренных границ), перпендикулярно плоскости прозвучивания, вместо (18) выражение для  $\Delta_{1,2}$  принимает вид [21]:

$$\Delta_{1,2} = (\Delta N_p - \Delta N_{s1,2}) / 2. \quad (19)$$

При этом сдвиговые податливости неоднородностей могут быть различными для различных поляризаций сдвиговых волн, так что связь акустической анизотропии с параметрами податливостей:

$$a = (\Delta N_{s1} - \Delta N_{s2}) / 2. \quad (20)$$

Полезность выражений (19), (20) заключается в том, что при наличии априорных представлений о конкретных изменениях микроструктуры материала, параметры акустической неоднородности позволяют определить изменения продольной и сдвиговой податливости и количественно определить степень отклонения структуры металла от «базового» состояния соответственно. Отсюда следует, что при соответствующей тарировке измерения параметров акустической неоднородности могут быть положены в основу методик неразрушающего контроля прочностных характеристик металлов.

В соответствии с выражениями (5), параметры акустической неоднородности  $\Delta_{1,2}$  одновременно содержат составляющие, определяемые относительными изменениями скоростей и продольной и сдвиговых волн. В связи с этим целесообразно рассмотреть влияние изменений продольной и сдвиговой податливостей на относительный вклад этих составляющих в параметры акустической неоднородности.

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДОЛЬНОЙ И СДВИГОВОЙ ПОДАТЛИВОСТЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВКЛАД ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНОЙ И СДВИГОВЫХ ВОЛН В ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

В работе [15] был проанализирован диапазон соотношения относительных изменений скоростей продольной и сдвиговых волн для различных значений отношения нормальной и сдвиговой податливостей включений  $q = \Delta N_p / \Delta N_s$  при их изотропной ориентации. Аналогичный график, полученный на основе выражений (14), (15), связывающих модули упругости и значения интегральной податливости, с учетом связи упругих модулей и скоростей упругих волн (8) представлен на рис. 2.

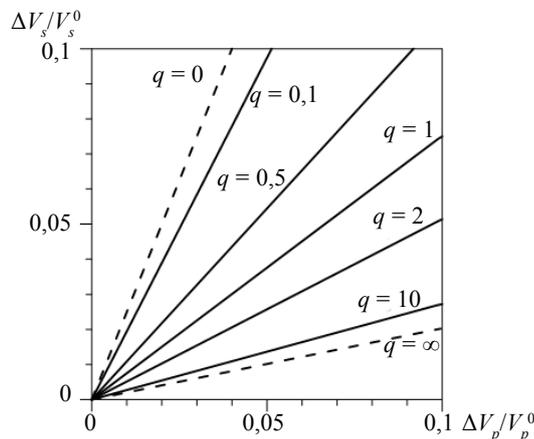


Рис. 2. Изменения скоростей продольной и сдвиговых волн, связанные с влиянием структурных неоднородностей при различном отношении их податливостей  $q$  по нормали и сдвигу.

Из рис. 2 видно, что изменения скоростей могут быть локализованы только внутри некоторого сектора, причем отдельные показанные траектории соответствуют определенному соотношению нормальной и сдвиговой податливостей. Отметим, что в геофизике физически реализуемыми могут быть вариации скоростей практически в пределах всего сектора, поскольку в горных породах

основным типом неоднородностей являются трещины, а их отношение нормальной и сдвиговой податливостей может меняться от  $q \gg 1$  для сухих трещин в некоторых породах до  $q \ll 1$  в случае флюидонасыщенных трещин [15, 19, 20]. Нижняя граница сектора соответствуют присутствию неоднородностей, у которых доминирует нормальная податливость,  $q \gg 1$ . Такую ситуацию для металла следует ожидать для структурных изменений, обусловленных развитием объемных неоднородностей, например, при разрыхлении материала или из-за изменения количества межзеренных границ при изменении размеров зерна. Около верхней границы сектора локализованы траектории для неоднородностей, у которых доминирует сдвиговая податливость,  $q \approx 0$ . Эта ситуация характерна для таких структурных изменений металла как, например, дислокационные скопления на границах зерен в металле при остаточных деформациях.

Численные соотношения относительных изменений скоростей продольной и сдвиговой волн могут быть получены с использованием уравнений (8). Так, в случае доминирования сдвиговой податливости неоднородностей ( $q \approx 0$ ) из (14) и (15) следует, что  $\Delta K/K_0 \ll \Delta G/G_0$ , т.е. имеет место соотношение:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p^0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta K + \frac{4}{3} \Delta G}{K_0 + \frac{4}{3} G_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta K}{K_0} \frac{1}{1 + \frac{4}{3} t_0} + \frac{2}{3} \frac{t_0}{1 + \frac{4}{3} t_0} \frac{\Delta G}{G_0} \approx \frac{2}{3} \frac{t_0}{1 + \frac{4}{3} t_0} \frac{\Delta G}{G_0} = \frac{2t_0}{(3 + 4t_0)} \frac{\Delta V_s}{V_s^0}. \quad (21)$$

В частности, для углеродистых сталей с бальностью зерна 7—9 экспериментально определено характерное значение  $d_T \approx 1,833$ , тогда, согласно (11), параметр  $t_0$  принимает значение  $t_0 \approx 0,493$  и

$$\frac{\Delta V_p}{V_p^0} \approx \frac{2}{5} \frac{\Delta V_s}{V_s^0}. \quad (22)$$

Таким образом, для этого класса изотропных материалов при наличии неоднородностей с сильным доминированием сдвиговой податливости приведенный в этом разделе анализ свидетельствует, что на значение параметра  $\Delta_{1,2} = \Delta$  изменения и продольной, и сдвиговой податливости влияют в одном порядке, но знак  $\Delta$  в данном случае определяется знаком изменения  $\Delta V_s/V_s^0$ .

В более общем случае совместное применение параметров акустической неоднородности ( $\Delta_1, \%$ ,  $\Delta_2, \%$  и  $a, \%$ ) обеспечивает выявление как объемных, так и планарных изменений структуры материала.

Так, в частности, при увеличении размеров зерна (объемное изменение структуры металла) могут меняться и продольная, и сдвиговая податливость, но так как анизотропия сдвиговой податливости не возникает, то акустическая анизотропия не изменяется ( $a = \text{const}$ ). При этом, из-за уменьшения количества межзеренных границ, продольная податливость снижается, а, следовательно, значения параметров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  уменьшаются. Значения этих параметров могут быть использованы для определения бальности зерна.

В то же время, при возникновении и развитии пластической деформации формируются дислокационные скопления, ориентированные в направлении деформации (направление 1). Возникновение ориентированных дислокационных скоплений (планарное изменение структуры металла) приводит к уменьшению податливости в направлении 2, перпендикулярном направлению деформирования ( $\Delta N_{s2} < 0$ ), в то время как податливость вдоль направления 1 существенно не изменяется ( $\Delta N_{s1} \approx 0$ ). Соответственно, параметр  $\Delta_2$  при этом будет расти, при практически неизменном значении параметра  $\Delta_1$  (см. выражения (19)). Но, в соответствии с (20), акустическая анизотропия также будет расти. Значения параметров  $\Delta_2, \%$  и акустической анизотропии  $a (\%)$  характеризуют степень пластической деформации материала.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ МЕТАЛЛА

Ниже приведены примеры исследований параметров акустической неоднородности для различных состояний структуры металла образцов, изготовленных из углеродистых и легированных сталей.

Параметры акустической неоднородности определялись с использованием прибора для измерений механических напряжений методом акустоупругости ИН 5101А, реализующим измерения

этим методом временных задержек ортогонально поляризованных сдвиговых волн и продольной волны. Прибор обеспечивает точность определения параметров акустической неоднородности  $a$  (%),  $\Delta_1$  (%),  $\Delta_2$  (%) не хуже 0,03 %.

**Пример 1.** Сопоставление параметров акустической неоднородности углеродистых сталей с результатами твердомерии.

Для сопоставления использовались два комплекта образцовых мер твердости по ГОСТ 9031—75, диапазон значений твердости которых соответствует диапазону значений, характерных для углеродистых сталей.

Измеренные значения твердости (НВ) для мер из каждого комплекта приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения твердости (НВ) для мер комплектов 1 и 2

Мера №	Твердость, НВ	
	№ комплекта	
	1	2
1	102	103
2	206	203
3	445	438

Значения параметров акустической неоднородности мер твердости в графическом виде представлены на рис. 3. Как видно из графика, металл исследуемых образцов акустически практически изотропен, поскольку  $a$  (%)  $\approx$  0, и, в соответствии с (6):  $\Delta_1$  (%)  $\approx$   $\Delta_2$  (%). С учетом этого на графике представлены их усредненные значения:  $\Delta_{cp}$  (%) =  $\frac{\Delta_1(\%) + \Delta_2(\%)}{2}$ . В качестве значения  $d_T$  использовалось значение отношений скоростей распространения продольной и сдвиговых волн, полученное по результатам исследований выполненных на мерах №1 обоих комплектов ( $d_T = 1,828$  с разбросом 0,05%). В соответствии с соотношениями (11) и (16) этому значению соответствуют значение  $t_0 = G_0 / K_0 = 0,498$  и значение коэффициента Пуассона  $\nu_0 = 0,286$ .

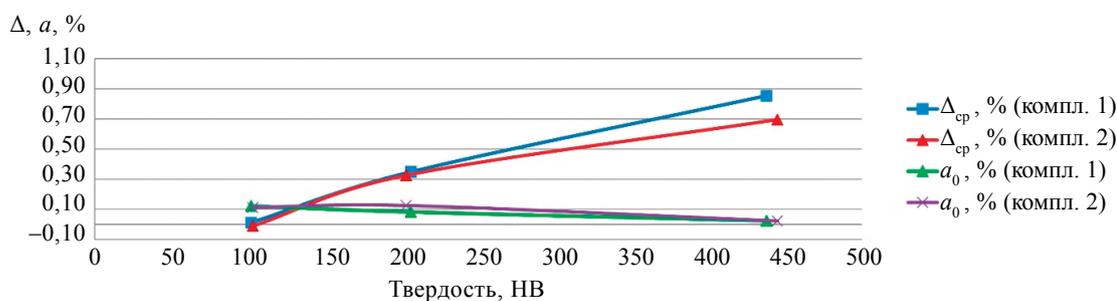


Рис. 3. Зависимость параметров акустической неоднородности материала мер твердости  $a$  (%),  $\Delta_{cp}$  (%) от значений твердости.

Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что параметр акустической анизотропии  $a$  (%) практически нечувствителен к твердости материала. В то же время, параметр  $\Delta_{cp}$  возрастает по мере увеличения твердости. Расхождение значений параметра  $\Delta_{cp}$  для мер № 3 комплектов 1 и 2 (с твердостью 450 НВ) предположительно связано с вариациями значений твердости по толщине пластин.

По результатам металлографических исследований установлено, что различие значений твердости на мерах было обусловлено не одним, а несколькими структурными факторами. Так, металл мер № 1 имеет феррито-перлитную структуру и балл зерна 4, а металл мер №№ 2 и 3 — мартенситную и балл зерна 12—14, отличаясь при этом содержанием углерода.

С учетом соотношения (9), рост параметров  $\Delta_{\text{ср}}$  при увеличении твердости свидетельствует, что повышение твердости материала соответствует тому, что комбинация  $\frac{\Delta K}{K_0} - \frac{\Delta G_{1,2}}{G_{1,2}^0} > 0$ . Такое соотношение может иметь место в случае снижения модуля сдвига ( $\Delta G < 0$ ) и одновременного преобладания относительных изменений модуля сдвига ( $|\Delta G| < G^0$ ) над изменениями модуля объемного сжатия  $\left( \left| \frac{\Delta K}{K_0} \right| \ll \left| \frac{\Delta G}{G_0} \right| \right)$ . Эти заключения согласуются с выражениями (14) и (15) для вариаций модулей объемного сжатия и сдвига в случае, когда изменения сдвиговой податливости преобладают над изменениями продольной  $\Delta N_s / \Delta N_p \gg 1$ , что, в свою очередь, согласуется с отмеченным выше ожиданием доминирования изменений именно сдвиговой податливости на границах между кристаллитами металла.

Представленные в этом примере результаты также хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований, приведенными в [6], из которых следует, что для сталей разных типов по мере увеличения их твердости снижается скорость распространения поверхностных волн. Поскольку скорость поверхностных волн определяется, в основном, модулем сдвига (и близка к скорости объемных сдвиговых волн [22]), для сдвиговых волн должна иметь место та же закономерность. С учетом соотношения (5), рост параметров  $\Delta$  при увеличении твердости подтверждает это предположение.

Известны отраслевые документы, устанавливающие связь значений твердости с такими механическими характеристиками, как предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и относительное сужение. Таким образом, приведенный пример свидетельствует о возможности экспериментального построения зависимостей параметров акустической неоднородности от механических характеристик материала.

В отличие от традиционной твердометрии, использование акустических параметров позволяет получить не оценку механических характеристик приповерхностных слоев металла, а оценку значений этих характеристик, усредненных по глубине металла объекта контроля. Это позволяет более объективно оценить состояние объекта контроля. Следует подчеркнуть, что измерение параметра акустической неоднородности является полностью неразрушающим и выполнимо при условии одностороннего доступа к исследуемому объекту.

**Пример 2.** Исследование зависимости параметров акустической неоднородности от величины пластической деформации ( $\varepsilon, \%$ ).

Исследования выполняли на двух образцах, которые с помощью испытательной машины подвергались нормированному пластическому деформированию в условиях одноосного растяжения.

Исследовались стандартные плоские образцы на растяжение с габаритными размерами  $8 \times 50$  мм и длиной 250 мм, изготовленные из стали 10ГН2МФА. В исходном состоянии собственная акустическая анизотропия образцов находилась в пределах  $0,12 \pm 0,08\%$ .

Образцы подвергались ступенчатому одноосному растяжению в неупругой области. На каждой ступени выполнялась полная разгрузка образца, после чего измерялись величина пластической деформации ( $\varepsilon, \%$ ) и значения параметров акустической неоднородности.

Графики зависимости параметров акустической неоднородности от степени пластической деформации ( $\varepsilon, \%$ ) для образцов № 1 и № 2 представлены на рис. 4а и б соответственно.

При определении параметров  $\Delta$ , в качестве «базового», использовалось среднее значение отношений скоростей распространения продольной и сдвиговых волн, измеренных на образцах № 1 и № 2 до начала испытаний ( $d_T = 1,833$  с разбросом  $0,04\%$ ). В соответствии с отношениями (11) и (16), этому значению соответствуют значение  $t_0 = G_0/K_0 = 0,493$  и значение коэффициента Пуассона  $\nu_0 = 0,288$ .

Приведенные экспериментальные результаты соответствуют характеру изменений параметров акустической неоднородности при пластическом деформировании материала, описанному в предыдущем разделе. Параметр  $\Delta_1$  практически не зависит от величины пластической деформации, параметр  $\Delta_2$  растет по мере увеличения относительной деформации, изменения акустической анизотропии ( $a, \%$ ) практически повторяют изменения параметра  $\Delta_2$ .

Отдельно необходимо обратить внимание на отклонение от монотонной зависимости параметров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  для образца № 2 на начальном участке графика. Это отклонение связано с тем, что для этого образца, в отличие от образца № 1, выполнялись замеры при малых значениях пластической деформации. Известно, что в этом случае пластически деформируется только часть кристаллитов (кристаллиты с «удобной» ориентацией). При разгрузке образца взаимодействие кристаллитов с разной степенью пластической деформации приводит к возникновению остаточных напряжений. Таким образом, можно утверждать, что поведение параметров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  на начальном участке графика обусловлено зависимостью этих параметров от упругих напряжений (явление акустоупругости).

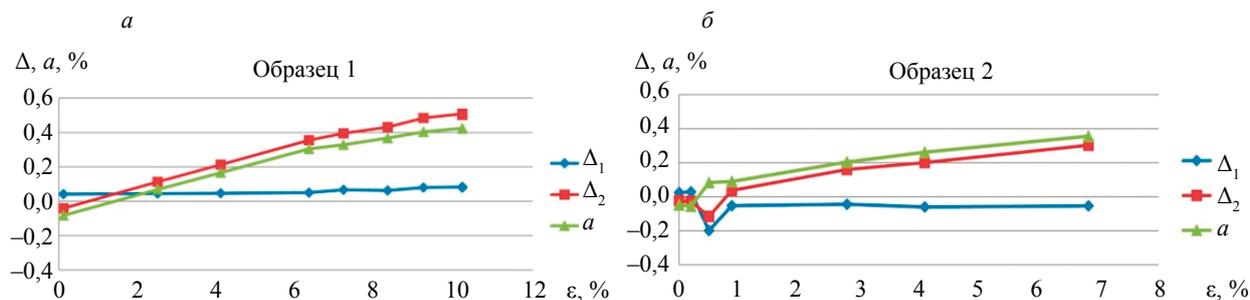


Рис. 4. Зависимость параметров акустической неоднородности  $a$  (%),  $\Delta_{1,2}$  (%) от величины пластической деформации ( $a$  — образец 1;  $б$  — образец 2).

При развитой пластической деформации ( $\epsilon > 1$ — $2$  %) остаточные напряжения не возникают и значения параметров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  определяются только степенью пластической деформации. Использование параметров акустической неоднородности позволяет выявлять такие достаточно «тонкие» эффекты, что говорит об их высокой чувствительности.

Приведенный пример свидетельствует, что параметры акустической неоднородности могут использоваться для эксплуатационного неразрушающего контроля степени накопления повреждений, вызванных пластической деформацией металла.

При этом необходимо подчеркнуть, что приведенные в обоих примерах численные соотношения получены для образцов из углеродистых и легированных сталей. Следует предположить, что для других классов материалов качественный характер зависимостей сохранится, но для определения количественных соотношений необходимы дополнительные исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена совокупность микроструктурно-чувствительных акустических параметров, характеризующих акустическую неоднородность металла, совместное использование которых может быть положено в основу методик неразрушающего контроля качества изделий металлургии и машиностроения, а также для оценки изменений прочностных характеристик металла при эксплуатации. Поскольку эти параметры являются усредненными по направлению «прозвучивания», их использование позволяет получить сведения об изменениях структуры металла по глубине.

Предложенные параметры основаны на отношениях скоростей продольной и сдвиговых объемных ультразвуковых волн, не зависящих от длины пути их распространения. Эти отношения скоростей могут быть определены по результатам измерения временных задержек с использованием эхоимпульсного метода. Параметры основаны на весьма малых изменениях скоростей ультразвуковых волн, что требует высокой точности измерений. Современный уровень развития радиоэлектроники обеспечивает необходимую точность. В частности, для измерения этих параметров может применяться «Прибор для измерений механических напряжений методом акустоупругости ИН 5101А», реализующий измерения временных задержек ортогонально поляризованных сдвиговых волн и продольной волны. При этом измерение относительных значений скоростей исключает необходимость высокоточных измерений толщины исследуемой области образца и может выполняться в случае одностороннего доступа к этой области.

Кроме того, введенные параметры характеризуют нормированные отклонения отношений скоростей продольных и сдвиговых волн от значений, характерных для «базового состояния» структуры металла. В качестве «базового» рассматривается состояние структуры металла до начала эксплуатации объекта контроля (при оценке эксплуатационных изменений) или структуры металла контрольных образцов, прочностные характеристики которого определены стандартными методами разрушающего контроля и находятся в допустимых пределах (при оценке качества изготовления изделий). То, что эти параметры являются не абсолютными, а относительными характеристиками, обеспечивает как необходимую точность измерений, так и универсальность этих параметров по отношению к конкретному типу структурных неоднородностей.

В работе приведены соотношения, связывающие предложенные параметры с упругими модулями материала. Для описания связи конкретных структурных факторов с предложенными параметрами, эти соотношения также представлены через параметры продольной и сдвиговой податливости структурных неоднородностей, связь которых с упругими модулями получена с использо-

ванием модели микронеоднородной среды с контрастно-мягкими включениями. В рамках этой модели продольная и сдвиговая податливость являются интегральными характеристиками структуры металла и определяются концентрацией и упругими характеристиками микронеоднородностей, не конкретизируя физическую природу неоднородностей.

Приведены экспериментальные результаты использования предложенных параметров для количественной оценки вариации структурных параметров металла, иллюстрирующие возможность построения зависимостей, связывающих параметры акустической неоднородности с особенностями структуры металла и его прочностными характеристиками

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00536.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
2. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 2. Кн. 2. М.: Машиностроение, 2003. 688 с.
3. *Mitra M., Gopalakrishnan S.* Guided wave based structural health monitoring: A review // *Smart Materials and Structures*. 2016. V. 5. P. 053001.
4. *Marcantonio V., Monarca D., Colantoni A., Cecchini M.* Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. V. 120. P. 32—42.
5. *Zaitsev V.Y.* Nonlinear acoustics in studies of structural features of materials // *MRS Bulletin (Materials Research Society Bulletin)*. 2019. V. 44. P. 350—360.
6. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.
7. *Муравьев В.В., Муравьева О.В., Петров К.В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40х со скоростью объемных и рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 20—28.
8. *Muravev V.V., Muraveva O.V., Petrov K.V.* Contactless electromagnetic acoustic techniques of diagnostics and assessment of mechanical properties of steel rolled bars // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. V. 38. P. 48—53.
9. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2005. 208 с.
10. *Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А.* Использование метода акустоупругости для оценки структурных изменений стали 10ГН2МФА. Применение метода для исследований состояния металла узла приварки коллектора теплоносителя парогенераторов серии ПГВ-1000 // *Тяжелое машиностроение*. 2015. № 1—2. С. 5—11.
11. *Камышев А.В., Макаров С.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В.* Обобщенные коэффициенты для измерения механических напряжений методом акустоупругости в конструкциях из углеродистых и низколегированных сталей // *Дефектоскопия*. 2017. № 1. С. 3—10.
12. *Хлыбов А.А., Пичков С.Н., Углов А.Л.* Исследование накопления рассеянных микроповреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоцикловой усталости // *Контроль. Диагностика*. 2011. № 4. С. 55—61.
13. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987.
14. *Zaitsev V., Sas P.* Elastic moduli and dissipative properties of Microinhomogeneous solids with Isotropically oriented defects // *Acta Acust United Acust*. 2000. V. 86. P. 216—228.
15. *Зайцев В.Ю., Сас П.* Влияние высокосжимаемой фракции пористости на вариации скоростей Р- и S-волн в сухой и насыщенной породе: сопоставление модели и экспериментов // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № 1. С. 37—48.
16. *Kachanov M.* Elastic solids with many cracks and related problems // *Adv. Appl. Mech*. 1993. V. 30. P. 259—445.
17. *Sayers C.M., Kachanov M.* Microcrack-induced elastic wave anisotropy of brittle rocks // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1995. V. 100 (B3). P. 4149—4156.
18. *Macbeth C.* A classification for the pressure-sensitivity properties of a sandstone rock frame // *Geophysics*. 2004. V. 69. P. 497—510.
19. *Zaitsev V.Y., Radostin A.V., Pasternak E., Dyskin A.* Extracting shear and normal compliances of crack-like defects from pressure dependences of elastic-wave velocities // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017. V. 97. P. 122—133.
20. *Zaitsev V.Y., Radostin A.V., Pasternak E., Dyskin A.* Extracting real-crack properties from nonlinear elastic behavior of rocks: abundance of cracks with dominating normal compliance and rocks with negative Poisson's ratio // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017. V. 24. P. 543—551.
21. *Schoenberg M., Sayers C.M.* Seismic anisotropy of fractured rock // *Geophysics*. 1995. V. 60. No. 1. P. 204—211.
22. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.