

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 534.222+539.24

К.В. Курашкин, В.В. Мишакин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

В целях разработки алгоритма безнулевой акустической тензометрии исследовано влияние структурного состояния сталей 15 и 08 пс на их акустические характеристики. Показано, что между параметрами структурной текстуры зерен и акустической анизотропии существует высокая корреляционная связь. Найденная связь может использоваться для оценки механических напряжений на элементах конструкций без их разгружения. Конструкции должны быть выполнены из тех же материалов, что и исследуемые образцы, и иметь схожую термическую и пластическую обработку.

Приведены результаты исследования сварного образца из стали 14ХГС, подвергнутого пластическому деформированию при одноосном растяжении. Показано, что в основном металле параметр акустической анизотропии и коэффициент затухания монотонно возрастают с увеличением пластической деформации. Изменение затухания и акустической анизотропии вблизи шва позволило оценить ширину зоны термического влияния.

Ключевые слова: структурное состояние, параметры упругих волн, оптический и акустический методы контроля.

Введение

В настоящее время для определения напряженного состояния элементов металлических конструкций успешно применяется акустический метод контроля, отличающийся простотой, эффективностью, низкой стоимостью и безопасностью. Применение ультразвука для определения напряженного состояния материала основано на эффекте акустоупругости, который отражает нелинейную связь между механическими напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости распространения упругих волн [1–3].

Существующие методики определения значений механических напряжений через соотношения акустоупругости [4] требуют измерения начальных акустических параметров объекта в разгруженном состоянии. Зачастую разгружение конструкции не представляется возможным ввиду условий эксплуатации. В связи с этим, весьма перспективной является разработка метода акустической тензометрии, при котором посредством дополнительных исследований структурной текстуры материала, находящегося в нагруженном состоянии, оценивается величина начальной акустической анизотропии [5]. Величина начальной акустической анизотропии зависит в первую очередь от кристаллографической текстуры [3, 6], которая формируется при пластической и термической обработке материала. В пластически деформированном материале акустическая анизотропия изменяется вследствие формирования кристаллографической текстуры деформации. Термическое воздействие, например при сварке, также влияет на текстуру материала. На разных участках сварного соединения значения акустической анизотропии могут существенно отличаться. Влияние термического и пластического воздействия на параметр анизотропии упругих волн необходимо учитывать при оценке механических напряжений.

Факторы, определяющие влияние структурного состояния материала на его акустические свойства

В случае одноосного напряженного состояния величина напряжения может быть выражена через параметр акустической анизотропии [3, 5]:

$$\sigma = K_A (A_\sigma - A_0), \quad (1)$$

где A_σ – величина акустической анизотропии в нагруженном материале; A_0 – начальное значение параметра анизотропии в разгруженном материале; K_A – коэффициент, выражаемый через упругие модули второго и третьего порядков.

Для определения механических напряжений акустическим методом необходимо учитывать значение A_0 , связанное со структурным состоянием материала.

В отсутствии механических напряжений упругие свойства конкретного материала зависят от его структурного состояния: фазового состава, плотности микродефектов, текстуры, размера зерен и других факторов [7].

В ортотропном материале, каким являются катаные листовые сплавы, могут распространяться две поперечные и одна продольная объемные волны. В отсутствии напряжений скорости объемных упругих волн в ортотропном материале определяются следующими уравнениями [3]:

$$\begin{aligned} \rho V_1^2 &= \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}}W_{420}), \\ \rho V_2^2 &= \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}}W_{420}), \\ \rho V_3^2 &= \lambda + 2\mu + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35} cW_{400}, \end{aligned} \quad (2)$$

где V_1, V_2 – скорости поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно; V_3 – скорость продольной волны; λ, μ – константы Ламе, упругие модули поликристаллического материала, c – параметр анизотропии кристаллитов; W_{400}, W_{420} – коэффициенты функции распределения ориентировок; ρ – плотность материала.

Параметр акустической анизотропии определяется соотношением скоростей поперечных упругих волн:

$$A = \frac{2(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)}. \quad (3)$$

В случае, когда измерения скоростей V_1 и V_2 проводятся при одной и той же толщине, например эхо-импульсным методом, относительную величину A можно с большой точностью определять через значения времен распространения упругих волн:

$$A = \frac{2(t_2 - t_1)}{t_2 + t_1}, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно.

Из уравнений (2) и (3) нетрудно получить, что величина анизотропии упругих волн в ортотропном материале пропорциональна коэффициенту функции распределения ориентировок W_{420} :

$$A = k W_{420}, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Кристаллографическая текстура изменяется при пластическом и термическом воздействии на материал как при его производстве, так и в процессе эксплуатации готового изделия.

Процесс производства листового проката связан обычно с интенсивной пластической и термической обработкой материала. Структура металла при этом претерпевает сильные изменения: изменяются размеры и форма зерен, плотность микродефектов. Сложные процес-

сы деформирования и фрагментации зерен формируют как кристаллографическую, так и структурную текстуру. При устойчивом технологическом процессе изготовления листа следует, в рамках конкретного материала, ожидать связь между параметрами кристаллографической и структурной текстуры. Мы предполагаем, что между значениями структурной текстуры зерен и акустической анизотропии в прокатном материале может существовать корреляционная связь, которая может быть использована для оценки напряженного состояния конструкции из данного материала без разгружения.

Многие металлические конструкции имеют сварные соединения. В процессе сварки прилегающий ко шву металл нагревается до температуры, при которой происходят структурные изменения. Наряду с тепловым воздействием, материал сварного соединения, как правило, претерпевает и пластическую деформацию. Структура металла, сформировавшаяся на различных участках сварного соединения в результате нагрева и последующего остывания, определяет его свойства, в том числе акустические. Значения акустической анизотропии основного металла, металла зоны термического влияния и металла сварного шва могут существенно отличаться. Для большинства сварных соединений также характерно более значительное, по сравнению с основным металлом, рассеяние в околошовной зоне.

Исследование влияния пластических деформаций и термического влияния сварки на значение начальной акустической анизотропии позволит повысить эффективность контроля напряженного состояния с помощью предлагаемого алгоритма.

Объекты исследования и методика измерений

В работе исследовались образцы сталей 15, 08 пс и 14ХГС.

Образцы стали 08 пс были вырезаны из разных листов проката толщиной от 1,8 до 4,0 мм. Сталь 08 пс – качественная конструкционная углеродистая сталь, предназначенная для изготовления прокладок, шайб, вилок, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке – втулок, проушин, тяг. Химический состав стали 08 пс (ГОСТ 1050-74): 0.05-0.11% С, 0.05-0.17% Si, 0.35-0.65% Mn, не более 0.25% Ni, не более 0,04% S, не более 0.035% P, не более 0.1% Cr, не более 0.25% Cu, не более 0.08% As.

Пять образцов стали 15 были вырезаны поперек проката из одного листа толщиной 4,5 мм, затем четыре образца были деформированы при одноосном растяжении на 4%, 6%, 11% и 16%. Направление растяжения образцов было перпендикулярно направлению проката. Сталь 15 – качественная конструкционная углеродистая сталь, предназначенная для изготовления болтов, винтов, крюков и других деталей, к которым предъявляются требования высокой пластичности, работающих при температуре от 40 до 450°C. Химический состав образцов из стали 15: 0.154-0.158% С, 0.27% Si, 0.56% Mn, 0.066% Ni, 0.013% S, 0.012% P, 0.087% Cr, 0.091% Cu, 0.02% Al.

Образец стали 14ХГС был вырезан из листа поперек проката. Толщина образца составляла около 7 мм. В середине образца с помощью электродуговой сварки было выполнено соединение встык. Образец был подвержен одноосному растяжению до разрушения. Направление растяжения образца было перпендикулярно направлению проката. Сталь 14ХГС – конструкционная низколегированная сталь для сварных конструкций, предназначенная для изготовления электросварных труб магистральных газопроводов высокого давления, сварных конструкций, листовых, клапанных конструкционных деталей. Химический состав стали 14ХГС (ГОСТ 19282-73): 0.11-0.16% С, 0.4-0.7% Si, 0.9-1.3% Mn, не более 0.3% Ni, не более 0,04% S, не более 0.035% P, 0.5-0.8% Cr, не более 0.3% Cu, не более 0.08% As.

На всех образцах были проведены измерения параметров структуры и акустических характеристик.

Акустические исследования проводились эхо-импульсным методом с помощью пьезоэлектрических преобразователей, возбуждающих продольные и поперечные объемные упругие волны, распространяющиеся перпендикулярно поверхности материала. Использовались преобразователь поперечных волн V156 Panametrics частотой 5 МГц и диаметром 6 мм

и преобразователь продольных волн П111-5.0-КН частотой 5 МГц и диаметром 10 мм. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность образца в месте установки преобразователя шлифовалась, обезжиривалась спиртом и смазывалась эпоксидной смолой или глицерином. Исследования проводились при комнатной температуре. Для получения амплитудно-временной диаграммы серии отраженных импульсов использовался цифровой осциллограф PCS500 Velleman. Измерения в каждой точке повторялись от 3 до 10 раз для разных образцов. Полученные данные были обработаны в программе MathCad.

Время распространения упругих волн измеряли между первым и четвертым отраженными импульсами. Относительная погрешность измерения времени распространения поперечных волн составляла $0,01 \div 0,06\%$, продольных волн – $0,02 \div 0,1\%$.

Для всех исследованных образцов по формуле (4) рассчитывали значение параметра акустической анизотропии. Погрешность измерения параметра акустической анизотропии не превышала 0,0008.

В образце из стали 14ХГС измеряли также коэффициент затухания продольной волны:

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{|S_i|}{|S_{i+1}|} - \alpha_d, \quad (6)$$

где S_i, S_{i+1} – амплитудно-частотные характеристики i -го и $i+1$ -го отраженных импульсов; h – толщина образца в зоне измерений; α_d – дифракционная поправка, которая рассчитывалась следующим образом:

$$\alpha_d = \frac{1}{2h} \ln \frac{\left| \sin \frac{\pi \cdot f \cdot r^2}{2 \cdot C \cdot x_i} \right|}{\left| \sin \frac{\pi \cdot f \cdot r^2}{2 \cdot C \cdot x_{i+1}} \right|}, \quad (7)$$

где $f = 5$ МГц – центральная частота ультразвуковых колебаний; $C = 6000$ м/с – скорость продольной волны для стали [8]; $r = 5$ мм – радиус преобразователя; x_i, x_{i+1} – длина акустического пути для i -го и $i+1$ -го отраженных импульсов.

Дифракционная поправка определялась на основании формул, приведенных в [8], для расчета поля излучения преобразователя с круглой пластиной. Для измерения затухания в дальней зоне выбирались 3 и 4 отраженные импульсы. Погрешность измерения затухания составляла $1 \div 3$ Нп/м.

Металлографические исследования проводились с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР МЕТ. На поверхности образцов в месте установки датчика упругих волн с помощью шлифовальной машинки Akkropol были подготовлены шлифы. Для выявления границ зерен шлифы несколько секунд травились в 10%-ном спиртовом растворе HNO_3 . Фотографирование осуществлялось под микроскопом с помощью цифровой фотокамеры.

В образцах из стали 08пс и стали 15 определяли средний размер зерен в направлениях вдоль и поперек проката. В образце из стали 14ХГС оценили средний размер зерен в направлении растяжения образца. Измерения производили методом секущих по ГОСТ 5639-82 с помощью программного пакета металлографического анализа MicroconMet 5.7. В результате получали статистическое распределение количества зерен по баллам. Количество зерен, обрабатываемых при измерении в одном направлении, составляло не менее 300. Средний размер зерен в нужном направлении вычисляли на основе статистического распределения. Среднеквадратическое отклонение размеров зерен от среднего не превышало 1 мкм для стали 08 пс и 0,4 мкм для стали 15. Для исследованных образцов сталей 15 и 08 пс была также определена величина структурной текстуры:

$$D = \frac{2(d_1 - d_2)}{d_1 + d_2}, \quad (8)$$

где d_1, d_2 – средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях в плоскости проката. Погрешность определения параметра структурной текстуры не превышала 0,1 для стали 08 пс и 0,04 для стали 15.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены фотографии структуры нескольких образцов стали 08 пс с различными значениями акустической анизотропии. Структура состоит в основном из феррита, количество перлита весьма мало. Зерна феррита имеют неправильную форму. Как можно видеть, чем больше величина акустической анизотропии, тем заметнее вытянутость зерен.

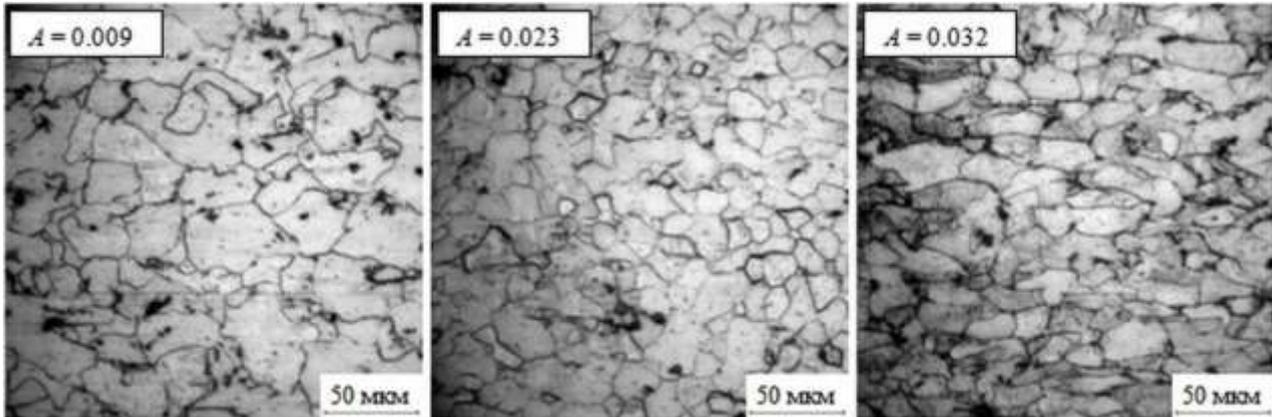


Рис. 1. Структура образцов стали 08 пс

Результаты металлографических и акустических исследований, представленные на рис. 2, показывают, что между параметрами акустической анизотропии и структурной текстурой существует корреляционная связь. Эта связь хорошо описывается (коэффициент корреляции 0.995) уравнением

$$D = k_{DA} A^2, \quad (9)$$

где k_{DA} – коэффициент пропорциональности. Для стали 08пс $k_{DA} = 580 \pm 20$.

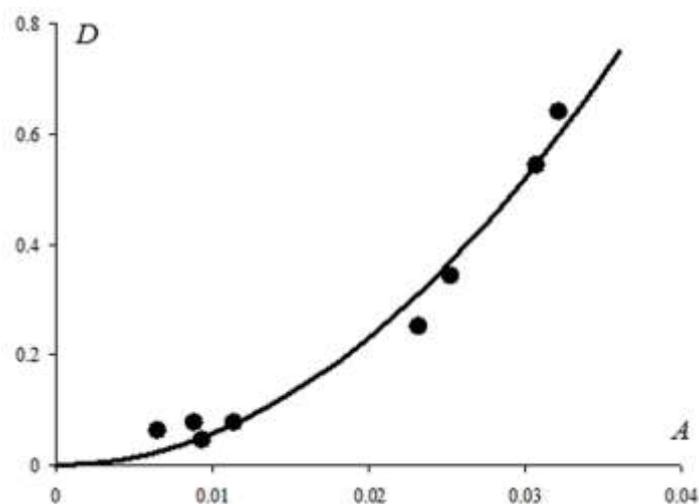


Рис. 2. Связь параметров структурной текстуры и акустической анизотропии для стали 08 пс

Формоизменение зерен, возникающее в результате пластической обработки при прокатке, на порядок выше, чем формоизменение под влиянием механических напряжений.

Таким образом, определение величины структурной текстуры на нагруженной конструкции позволяет оценить по формуле (9) начальное значение акустической анизотропии.

На рис. 3 представлены фотография структуры стали 15 и статистические распределения зерен по баллам для образцов разной деформации. Структура (рис. 3, а) состоит в основном из зерен феррита неправильной формы, между которыми находится небольшое количество перлита. На рис. 3, б при увеличении деформации средний размер зерен вдоль оси растяжения растет. Он увеличивается с 9 до 13 мкм.

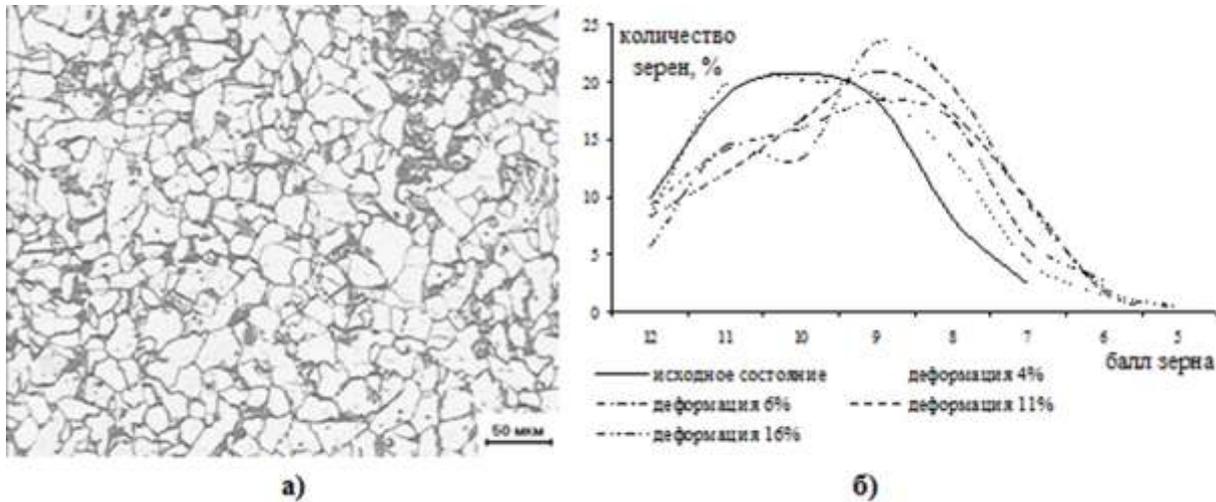


Рис. 3. Структура стали 15 и статистические распределения зерен по баллам

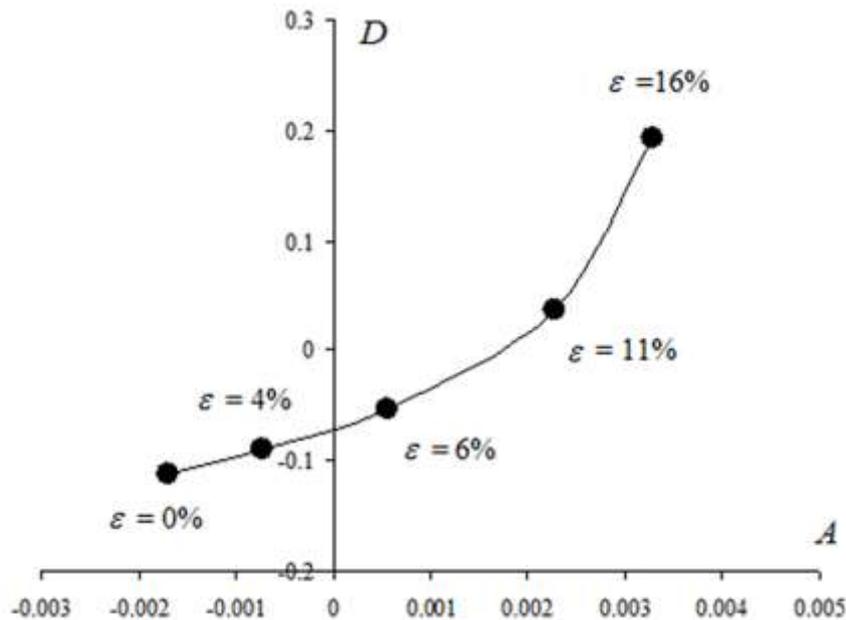


Рис. 4. Параметры структурной текстуры и акустической анизотропии стали 15 при разной деформации

На рис. 4 представлены результаты акустических и металлографических исследований образцов стали 15 разной деформации. Как видно из графика, параметры акустической анизотропии и структурной текстуры монотонно изменяются с ростом величины пластической деформации. Связь между параметрами акустической анизотропии и структурной текстурой для исследованных образцов хорошо аппроксимируется (коэффициент корреляции 0,989) полиномом второго порядка:

$$D = 14168A^2 + 33.48A - 0.0854. \quad (10)$$

Найденная связь может использоваться для оценки параметра начальной акустической анизотропии, связанного со структурным состоянием материала, по результатам металлографического анализа.

Металлографические и акустические исследования сварного образца из стали 14ХГС показали существенные изменения размера зерна, анизотропии и затухания упругих волн в основном металле в результате пластического деформирования, а также выявили различия структуры и акустических свойств основного металла, металла зоны термического влияния и металла сварного шва. Измерение структурно чувствительных акустических характеристик – параметра анизотропии и коэффициента затухания – позволило выявить границы зоны термического влияния сварного шва. Ширина зоны термического влияния составила приблизительно 20 мм, что подтверждается проведенным металлографическим анализом.

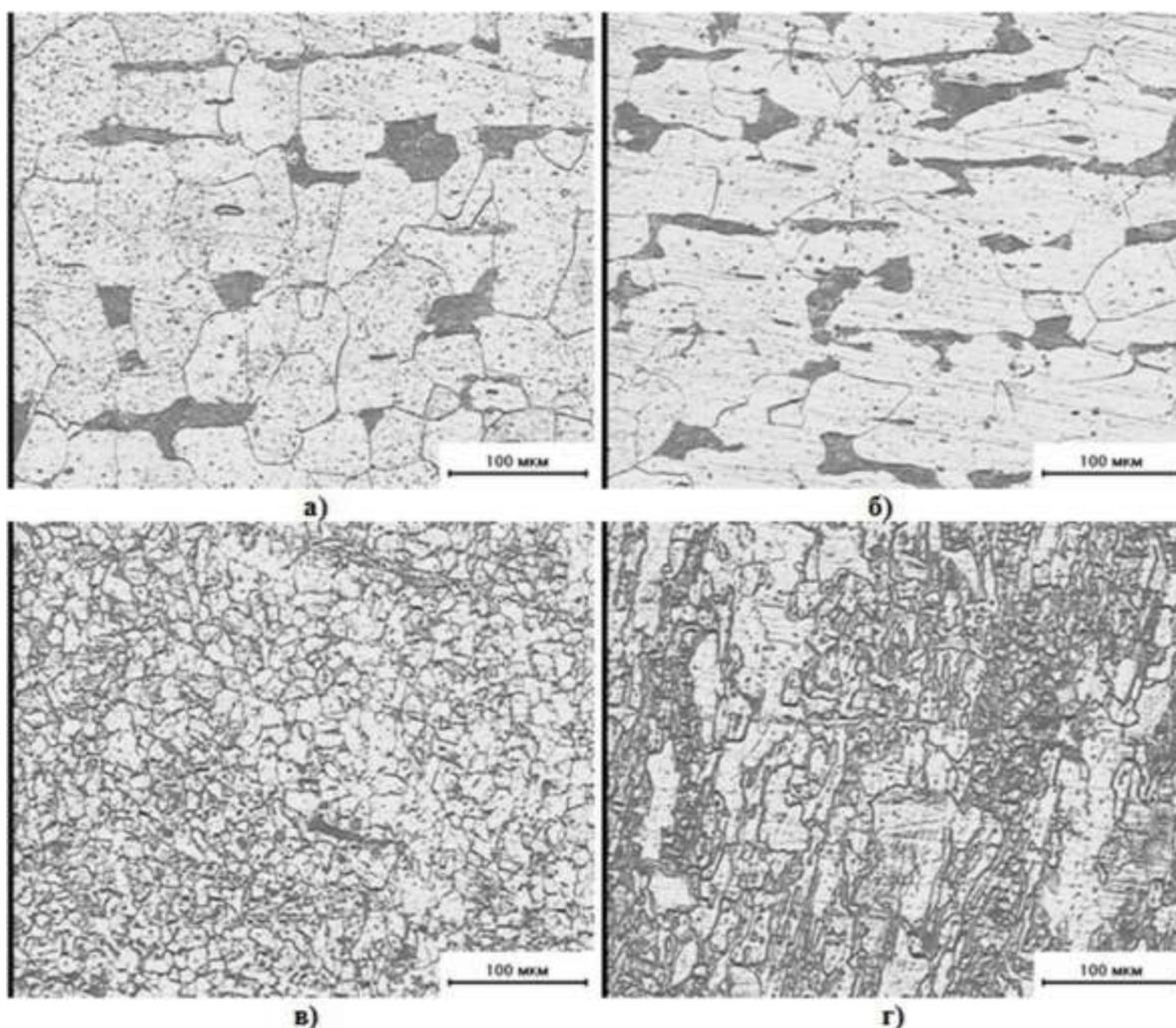


Рис. 5. Структура стали 14ХГС в зоне захвата (а), зоне разрушения (б), зоне термического влияния (в), структуре сварного шва (г)

На рис. 5 представлены фотографии структуры в не подверженной деформированию зоне (зоне захвата), зоне разрушения, зоне термического влияния и в зоне сварного шва. Структура основного металла (рис. 5, а и 5, б) состоит из крупнозернистого феррита и больших островков перлита. В результате пластического деформирования зерна вытягиваются вдоль направления растяжения. Средний размер зерен в этом направлении увеличивается с 45 в зоне захвата до 80 мкм в зоне разрушения. Структура материала в зоне термического влияния на расстоянии 10 мм от сварного шва (участок нормализации) отличается меньшим, по сравнению с основным металлом, зерном (средний размер зерен – 15 мкм). В сварном шве

наблюдается неоднородная структура, которая возникла в результате перегрева металла в процессе сварки и последовавшего продолжительного остывания.

На рис. 6 представлены результаты акустических исследований сварного образца из стали 14ХГС.

Значение параметра акустической анизотропии основного металла (рис. 6, а) монотонно растет с увеличением деформации: от -0.001 в зоне захвата до 0.003 в зоне разрушения. Изменение величины акустической анизотропии отражает формирование кристаллографической текстуры деформации. В сварном шве и вблизи него анизотропия отличается от анизотропии основного металла (рис. 6, в).

Рис. 6, б и 6, г позволяет судить об изменении коэффициента затухания продольной волны частотой 5 МГц при увеличении пластической деформации. Величина коэффициента затухания в зоне захвата составила 10 Нп/м, в зоне разрушения – 20 Нп/м, в сварном шве и околошовной зоне – 17 Нп/м. В зоне сварного соединения величина затухания больше, чем в основном металле, что связано с сильной неоднородностью структуры, сформировавшейся в процессе сварки. Наибольшее затухание наблюдается в зоне разрушения, что объясняется увеличением концентрации микродефектов и изменением размеров и формы зерен вследствие сильной пластической деформации.

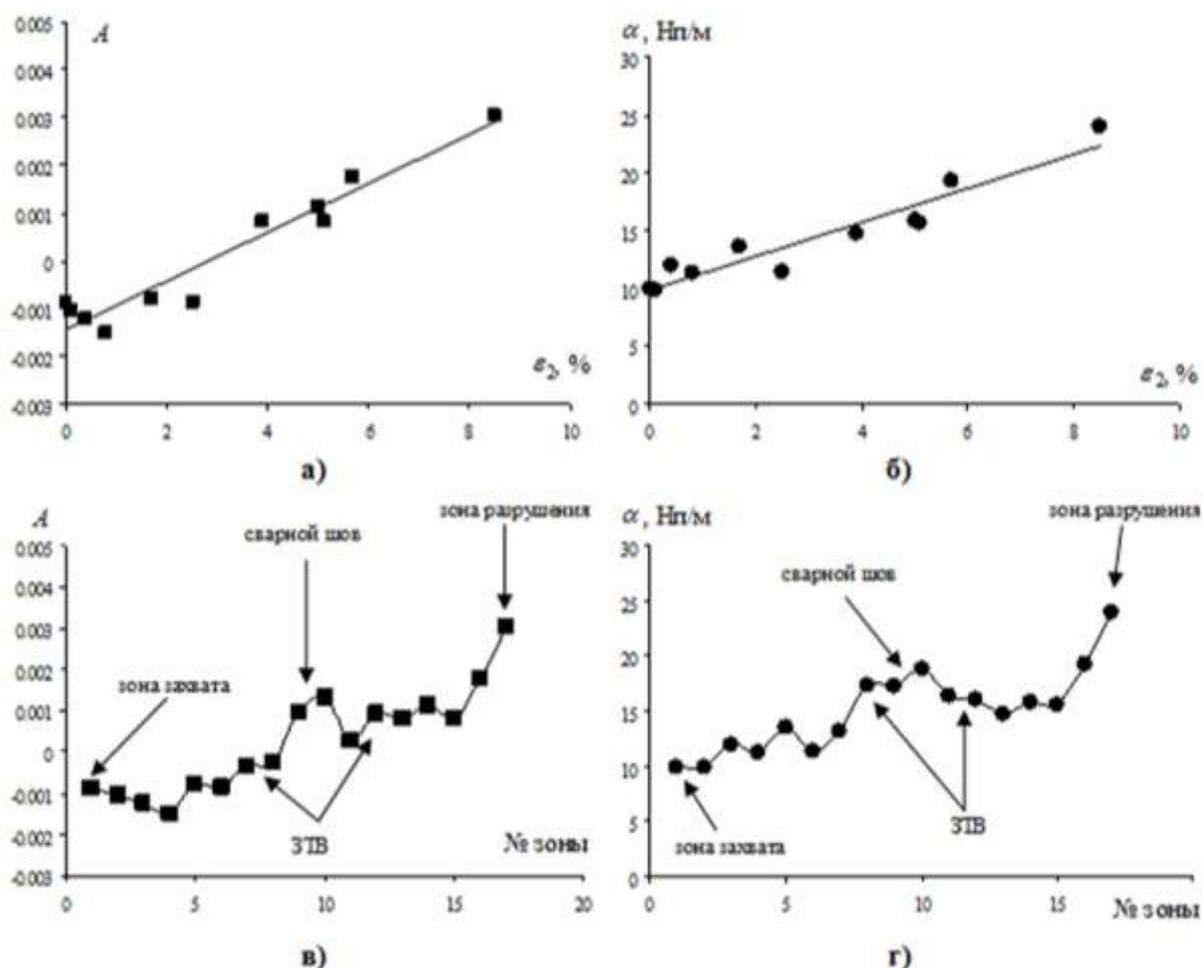


Рис. 6. Результаты акустических исследований сварного образца из стали 14ХГС

Выводы

В рамках решения задачи осуществления безнулевой акустической тензометрии предложен алгоритм, позволяющий определить на нагруженной конструкции значение параметра акустической анизотропии, связанное со структурным состоянием материала. Подход основан на использовании связи между параметрами акустической анизотропии и структурной

текстуры. Определение связи выполняется после акустических и металлографических исследований на образцах. Найденная связь может использоваться при оценке механических напряжений на элементах конструкций, выполненных из тех же материалов, что и исследуемые образцы, и имеющих схожую термическую и пластическую обработку. Параметр структурной текстуры может определяться непосредственно на объекте с помощью переносного металлографического комплекса. Для оценки напряжений с помощью предлагаемого алгоритма в зонах материала, подвергшихся термическому и пластическому воздействию, необходимо проводить дополнительные исследования на образцах, имеющих соответствующую технологическую обработку.

Показано, что параметр акустической анизотропии и коэффициент затухания монотонно возрастают с увеличением пластической деформации. Измерение затухания и акустической анизотропии металла в зоне термического влияния сварного соединения позволило оценить ее ширину.

Библиографический список

1. **Зарембо, Л.К.** Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
2. **Chatellier, J.-Y.** A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates / J.-Y. Chatellier, M. Touratier // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. № 1. P. 109–117.
3. **Allen, D.R.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique / D.R. Allen, C.M. Sayers // Ultrasonics. 1984. V. 22. P. 179–188.
4. **ГОСТ Р 52731-2007.** Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 27 с.
5. **Курашкин, К.В.** О возможности использования характеристик структуры материала для осуществления безнулевой акустической тензометрии / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. научных трудов. – Н. Новгород: издательство общества «Интелсервис». 2010. № 2 (17). С. 236–242.
6. **Sayers, C.M.** Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
7. **Труэлл, Р.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 488 с.
8. **Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева.** – М.: Машиностроение, 1995.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

K.V. Kurashkin, V.V. Mishakin

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MATERIAL'S STRUCTURE ON ACOUSTIC PARAMETERS

In order to develop an algorithm of nonzero acoustic tensometry the influence of the structural condition of steels 15 and 08pc on their acoustic characteristics was investigated. It is shown, that there is a high correlation between the parameters of structural textures of grains and acoustic anisotropy. Obtained relationship can be used to evaluate the mechanical stresses on the elements of constructions without their unloading. Constructions should be made from the same material as the investigated samples, and should have the similar thermal and plastic processing.

The results of investigations of the welded sample from steel 14HGS, subjected to plastic deforming under uniaxial tension are given. It is shown, that the parameter of acoustic anisotropy and the coefficient of attenuation increase monotonically with increasing deformation in basic metal. Change of attenuation and acoustic anisotropy near the weld allowed us to estimate the width of the heat affected zone.

Keywords: structural condition, parameters of elastic waves, optical and acoustic method of testing.