

УДК 620.179.(147+162)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н9Т

© Вячеслав Александрович Ключников, Василий Васильевич Мишакин,
Александр Викторович Гончар

Институт проблем машиностроения РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия
imndt31@mts-nn.ru

Аннотация. Исследовано влияние пластического деформирования сварного соединения из стали 12Х18Н9Т на электромагнитные, магнитные и акустические характеристики материала. Получено, что неоднородность структурного состояния в зоне термического влияния приводит к неравномерному распределению характеристик в сварном соединении. По данным ультразвуковых исследований показана возможность определять ресурс пластичности материала.

Ключевые слова: аустенитная сталь, пластическая деформация, мартенситное превращение, ультразвуковой метод, вихретоковый метод, пондеромотрный метод, сварное соединение, зона термического влияния, ресурс пластичности.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60155 мол_а_дк.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF PLASTIC DEFORMATION OF WELDED JOINT FROM STEEL 12Kh18N9T

© V.A. Klyushnikov, V.V. Mishakin, A.V. Gonchar

Mechanical Engineering Research Institute of RAS (MERI RAS) branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences" (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia
imndt31@mts-nn.ru

Abstract. The effect of plastic deformation of a welded joint of steel 12X18H9T on the electromagnetic, magnetic and acoustic characteristics of the material was investigated. The heterogeneity of the structural state in the heat affected zone leading to an uneven distribution of the elastic characteristics of the welded joint was obtained. The possibility to determine the extent of the degradation and resource of the material ductility using ultrasound method was shown.

Key words: austenitic steel, plastic deformation, martensitic transformation, ultrasonic method, eddy current method, ponderomotive method, welded joint, heat-affected zone, resource of the material ductility.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-38-60155 mol_a_dk

Введение. Большинство неразъемных соединений в металлических конструкциях выполнены с помощью сварки. Особенностью материала сварных соединений, как правило, является сильная структурная неоднородность. В зоне термического влияния (ЗТВ), как правило, наблюдается градиент упругих, прочностных и пластических свойств, что затрудняет расчет деформаций в локальных зонах сварного соединения. Оперативная оценка методами неразрушающего контроля (НК) величины пластической деформации металла сварных соединений является на сегодня актуальной задачей. Исследование изменения акустических параметров, упругих и электромагнитных характеристик материала при силовом нагружении сталей перлитного класса, в том числе и сварных соединений, методами НК проведено в [1, 2]. Эксплуатационные свойства изделий, изготовленных из аустенитных сталей, в значительной степени зависят от структуры и фазового состава, которые могут изменяться в процессе эксплуатации изделия.

Изменение свойств аустенитных сталей в результате пластического деформирования связано не только с изменением дислокационной структуры, кристаллографической текстуры, накоплением микроповреждений, но и с активным изменением фазового состава – формированием α' -мартенсита, обладающего сильными магнитными свойствами и отличными от матрицы упругими модулями [3, 4]. Это необходимо учитывать при исследовании стали методами НК.

Из структурно - чувствительных методов неразрушающего контроля состояния металла в объеме удобным и эффективным является акустический метод благодаря его большой проникающей способности, безопасности, возможности контроля при одностороннем доступе к изделию [5].

Другим структурно - чувствительным методом, позволяющим исследовать процесс разрушения на поверхности и в приповерхностном слое металла, является вихретоковый метод. Величина сигнала, поступающая с вихретокового преобразователя, связана с удельным электрическим сопротивлением и магнитными характеристиками металла [6], которые зависят, в частности, от концентрации дислокаций, концентрации доменов, фазового состава и других характеристик, значение которых изменяется в процессе пластического деформирования металла.

Контроль изменения магнитных свойств вследствие выделения ферромагнитного α' -мартенсита удобно проводить пондеромоторным методом, основанном на измерении отрывной силы постоянного магнита к поверхности образца контроля.

Целью работы является исследование влияния пластического деформирования сварного соединения, изготовленного из стали 12X18H9T, на электромагнитные, магнитные и акустические характеристики материала.

Методика проведения исследований. Исследования проводились на сварные образцы из аустенитной стали 12X18H9T. Сварное соединение было выполнено в середине образца ручной аргоно-дуговой сваркой встык. Длина рабочей зоны составляла 200 мм, ширина 20 мм, толщина 6 мм. Проводилось ступенчатое одноосное растяжение при комнатной температуре. Исследования акустическим, вихретоковым и пондеромоторным методами выполнялись до испытаний и после каждого этапа нагружения.

Для измерения акустических характеристик применялся эхо-импульсный метод. Рабочая часть образца, за исключением области шва, разбивалась на 20 зон. Для возбуждения продольных и поперечных волн применялись пьезоэлектрические преобразователи V110 и V156 диаметром 8 мм фирмы Olympus. Несущая частота составляла 5 МГц. Регистрировалась амплитудно-временная диаграмма акустических сигналов. В результате обработки данных в программе Mathcad были получены времена распространения продольных и поперечных упругих волн (УВ) в каждой зоне. На рис. 1 изображена схема проведения ультразвуковых измерений.

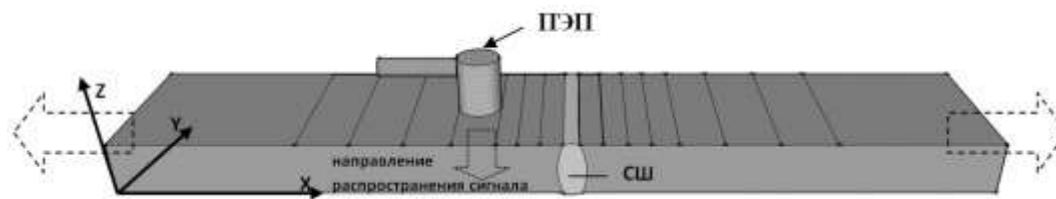


Рис. 1. Схема проведения ультразвуковых исследований.

Для ортотропных материалов (к ортотропным материалам относятся, в частности, катаные листы, уголки и другие изделия проката) удобно использовать акустические параметры, выражающиеся только через соотношения времен распространения ультразвуковых волн (УВ), так как в этом случае исключается измерение толщины. Таким параметром является, например, коэффициент Пуассона ν , который определяется с помощью следующего выражения [5]:

$$\nu = \frac{V_l^2 - 2V_t^2}{2(V_l^2 - V_t^2)} = \frac{t_t^2 - 2t_l^2}{2(t_t^2 - t_l^2)}, \quad (1)$$

где V_t , t_t , V_l , t_l – скорости и времена распространения сдвиговой и продольной УВ соответственно.

При наличии анизотропии материала вместо коэффициента Пуассона используются коэффициенты ν_{zx} и ν_{zy} , (измеренные вдоль и поперек направления нагружения соответственно), которые рассчитываются аналогично формуле (1):

$$\begin{aligned} \nu_{zx} &= \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zx}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zx}^2)} = \frac{t_{zx}^2 - 2t_{zz}^2}{2(t_{zx}^2 - t_{zz}^2)}, \\ \nu_{zy} &= \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zy}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zy}^2)} = \frac{t_{zy}^2 - 2t_{zz}^2}{2(t_{zy}^2 - t_{zz}^2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

где V_{zx} , t_{zx} и V_{zy} , t_{zy} – скорости и времена распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек оси нагружения соответственно, V_{zz} , t_{zz} – скорость и время распространения продольных УВ.

Для описания анизотропии упругих свойств поликристаллических материалов, состоящего из кристаллов с кубической решеткой, используется параметр акустической анизотропии, который определяется следующей комбинацией скоростей [7]:

$$A = \frac{2(V_{zx} - V_{zy})}{(V_{zx} + V_{zy})} = \frac{2(t_{zy} - t_{zx})}{(t_{zy} + t_{zx})} \quad (3)$$

Абсолютная погрешность измерения времени распространения УВ – около 2-3 нс, коэффициентов ν_{zx} и ν_{zy} - $7 \cdot 10^{-4}$.

Структурно-чувствительные исследования изменения электромагнитных характеристик проводились с помощью вихретокового дефектоскопа (ВД) ВД-70 с накладным трансформаторным дифференциальным преобразователем – ПН-6-ТД-С. Преобразователь включался по абсолютной схеме, регистрировалось напряжение измерительной обмотки. При калибровке в качестве эталона в данной работе использовался недеформированный образец, изготовленный из того же материала. Использовались следующие настройки: амплитуда возбуждения – 100 ед., коэффициент усиления – 100 ед., рабочая частота - 75 кГц, режим анализа сигнала – по постоянной составляющей, полярность сигнала – обратная. Вихретоковые измерения проводились по всей рабочей части образца. Погрешность измерения составила не более 0,5 ед.

Измерение пондеромоторным методом проводили с помощью высокоточного динамометра и магнита.

Результаты исследования и их обсуждение. Структурная неоднородность материала сварного соединения ведет к неравномерному распределению пластической деформации в образце. Как правило в ЗТВ наблюдается локализация пластической деформации.

При пластическом деформировании происходят изменения акустических и упругих характеристик материала, связанные с накоплением микрповреждений, изменением кристаллографической текстуры, выделением дополнительных фаз и другими факторами [1, 4, 8].

Наблюдается неравномерное распределение коэффициентов ν_{zx} и ν_{zy} и параметра акустической анизотропии A по зонам при разной степени пластической деформации ε_{xx} , причем наибольшие изменения, в основном, происходят в ЗТВ, рис. 3, рис. 4.

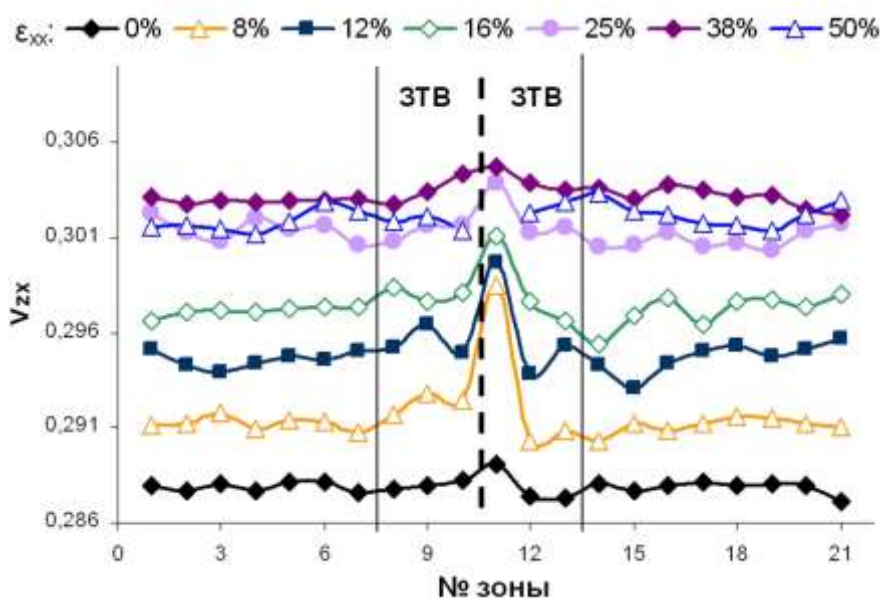


Рис. 2. Распределение коэффициента ν_{zx} по зонам при разной степени ε_{xx} .

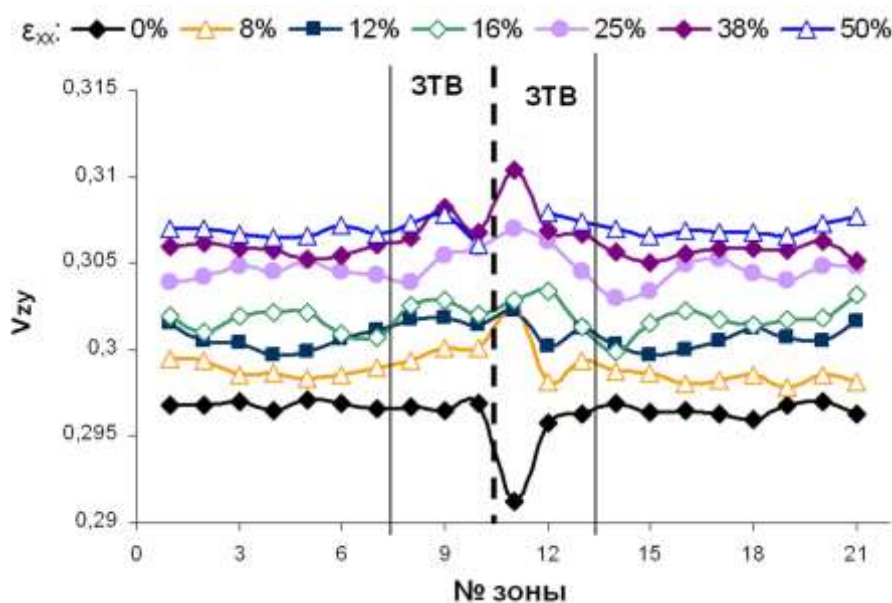


Рис. 3. Распределение коэффициента ν_{zy} по зонам при разной степени ε_{xx} .

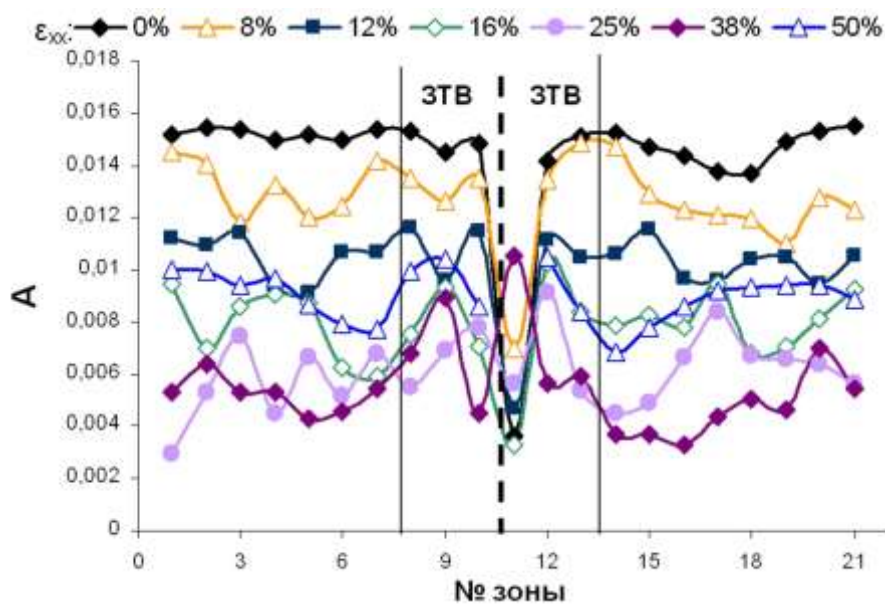


Рис. 4. Распределение параметра А по зонам при разной степени ϵ_{xx} .

Было получено, что зависимость коэффициента \bar{v}_{zx} и \bar{v}_{zy} , усредненных по всем измеряемым зонам сварного образца, от величины пластической деформации в ЗТВ и в зоне основного металла (ОМ) носит монотонный характер, рис. 5.

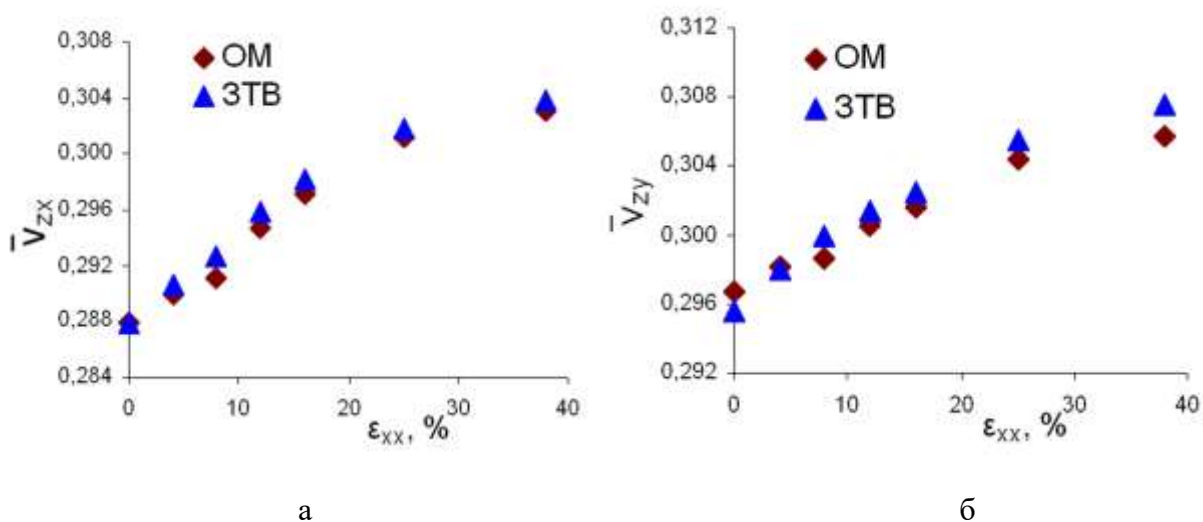


Рис. 5. Зависимости среднего значения коэффициентов \bar{v}_{zx} (а) и \bar{v}_{zy} (б) в ЗТВ и зоне основного металла от величины пластической деформации ϵ_{xx} .

Зависимости среднего значения коэффициента \bar{v}_{zy} от среднего значения коэффициента \bar{v}_{zx} в ЗТВ и зоне основного металла близки к линейной, рис. 6.

В работе [8] была предложена методика определения степени деградации материала при усталостном разрушении аустенитной стали. В силу того, что зависимости $\bar{v}_{zy}(\bar{v}_{zx})$ линейные, целесообразно использовать такой же подход для определения параметра деградации П при одноосном растяжении.

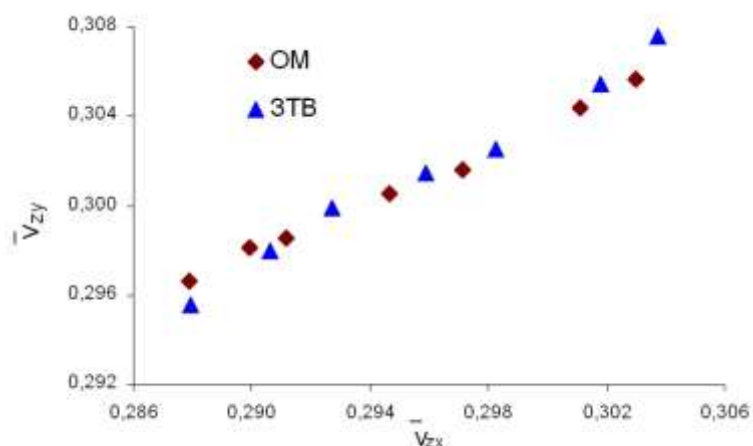


Рис. 6. Зависимости коэффициентов \bar{v}_{zy} от \bar{v}_{zx} в ЗТВ и зоне основного металла.

При мониторинге исследуемого материала можно проследить всю траекторию кривой $\bar{v}_{zy}(\bar{v}_{zx})$ и рост длины этой кривой L вплоть до разрушения при $L=L^*$ (L^* - критическое значение L). Соотношение $\Pi = L/L^*$ изменяется от 0 до 1.

Исследования показали, что величина Π хорошо коррелирует с изменением ресурса пластичности R_p при деформировании материала. Ресурс пластичности материала определяется следующим выражением:

$$R_p = 1 - \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^*}, \quad (1)$$

где ε_{xx} – текущее значение деформации; ε_{xx}^* – значение деформации, соответствующее образованию “шейки” при растяжении.

Получено, что связь параметра деградации с ресурсом пластичности R_p имеет линейный вид (коэффициент корреляции 0,94), рис. 7, и хорошо аппроксимируется линейной зависимостью:

$$R_p = 1 - 0.78 \cdot \Pi \quad (5)$$

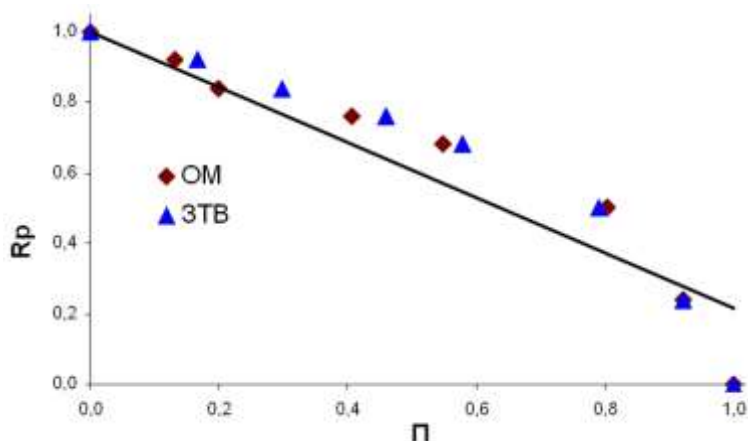


Рис. 7. Связь параметра деградации Π с ресурсом пластичности R_p .

Таким образом, по данным акустических измерений можно оценить степень деградации материала и рассчитать исчерпание ресурса пластичности в процессе нагружения.

В процессе одноосного растяжения происходит образование мартенсита α' , который, в отличие от аустенита, является ферромагнетиком. Изменение магнитных свойств материала, связанное с образованием новой фазы, контролировалось пондеромоторным методом.

Распределение значений силы отрыва F по зонам для различных значений ε_{xx} приведено на рис. 8.

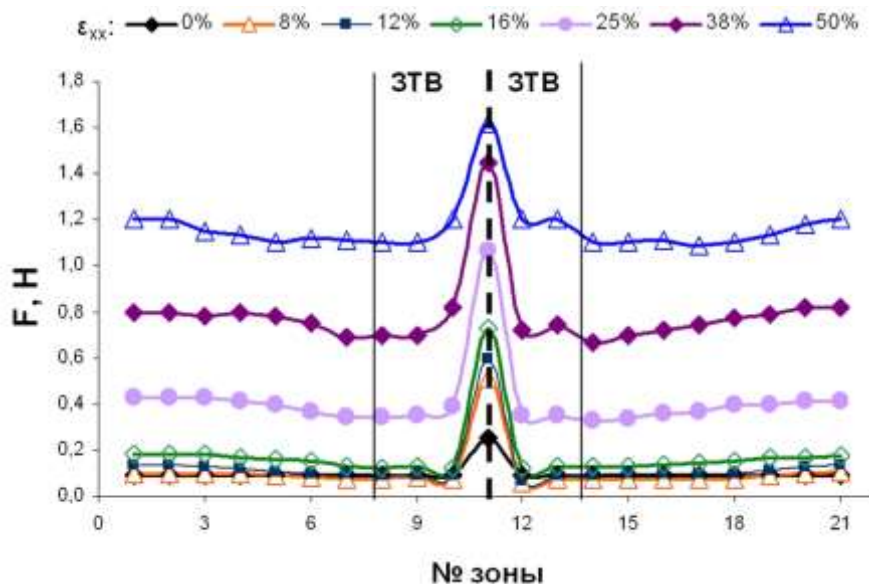


Рис. 8. Распределение показаний силы отрыва по зонам для различных значений ε_{xx} .

В результате проведенных вихретоковых исследований получено распределение по зонам показаний ВТД ξ , пропорциональных детектированному напряжению с преобразователя, рис. 9.

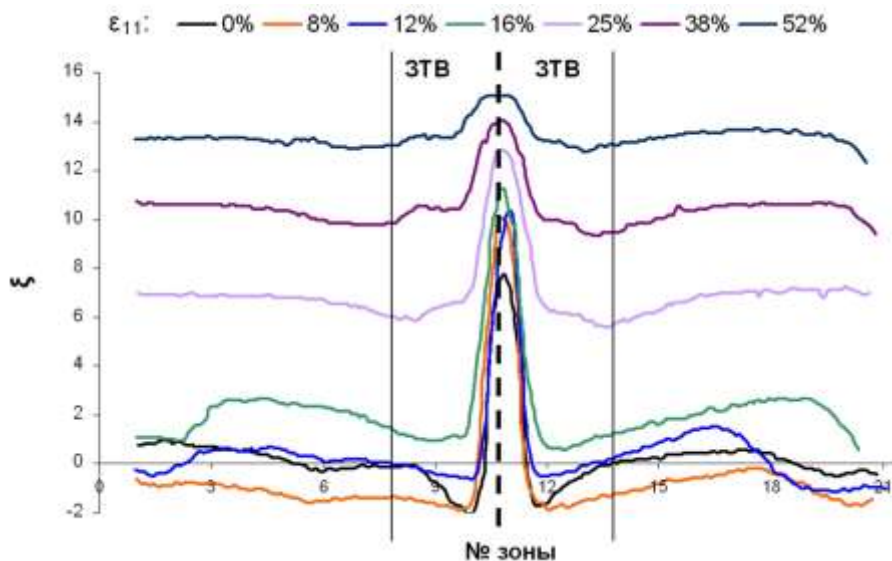


Рис. 9. Распределение показаний ВТД ξ по зонам для различных значений величины пластической деформации ε_{xx} .

Некоторое отличие характера кривых, приведенных на рис. 9 от кривых на рис. 8, можно объяснить тем, что на величину ξ влияет не только изменение магнитных характеристик, связанное с ростом магнитной фазы при деформировании, но и с изменением электрического сопротивления при накоплении микрповреждений на поверхности и приповерхностном слое деформируемого металла.

Зависимости усредненных по зонам основного металла и ЗТВ показаний силы отрыва F и детектированного напряжения на вихретоковом преобразователе $\xi_{\text{ср}}$ от величины пластической деформации образца приведены на рис. 10а и 10б соответственно.

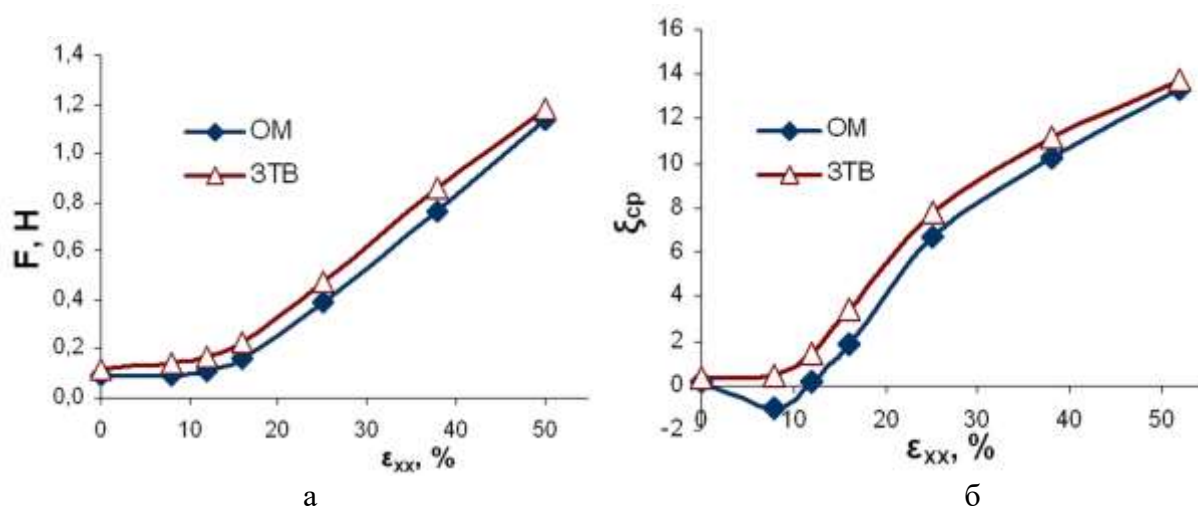


Рис.10. Зависимость усредненных по зонам основного металла и ЗТВ показаний силы отрыва $\Phi_{\text{ср}}$ (а) и детектированного напряжения на вихретоковом преобразователе $\xi_{\text{ср}}$ (б) от величины ϵ_{xx} .

Из графиков видно, что содержание α' -мартенсита, характеризующего магнитные свойства материала, с увеличением степени пластической деформации монотонно растёт (рис.10а), в то время как график показаний ВТД, отображающий совокупные изменения электрических и магнитных свойств, имеет минимум на начальных этапах нагружения (рис.10б). Таким образом, на начальном этапе деформирования ($\epsilon_{11} < 20\%$) магнитные свойства материала практически не меняются, тогда как происходит существенное изменение электрических свойств материала, не связанное, по-видимому, с образованием α' -мартенсита. Изменение электрических свойств материала на начальном этапе пластического деформирования может быть связано с процессом изменения дислокационной структуры, кристаллографической текстуры, накоплением микрповреждений.

При росте величины пластической деформации ($\epsilon_{11} > 20\%$) происходит интенсивное образование фазы α' - мартенсита, которая оказывает основное влияние в изменение электрических и магнитных свойств материала.

Выводы. Наличие структурной неоднородности в ЗТВ приводит к неравномерному распределению акустических характеристик и электромагнитных свойств материала сварного соединения.

Получено, что зависимости усредненных по зонам ЗТВ и основного металла коэффициентов v_{zy} от v_{zx} от величины пластической деформации носят монотонный характер.

Выявлено, что связь коэффициента \bar{v}_{zy} от \bar{v}_{zx} в ЗТВ и зоне основного металла характеризуется линейной зависимостью. Показана возможность определять ресурс пластичности материала по данным ультразвуковых измерений.

Показано, что на начальном этапе деформирования происходит существенное изменение электрических свойств материала, которое не связано с образованием новой фазы. Интенсивное образование α' - мартенсита на последующих этапах деформирования оказывает основное влияние на электрические и магнитные свойства стали 12X18H9T.

Список литературы

1. Мишакин В.В., Гончар А.В., Курашкин К.В., Данилова Н.В. Исследование разрушения при статическом нагружении сварных соединений акустическим методом. // Тяжелое машиностроение. - 2009. - №7. - С. 27-30.
2. Гончар А.В., Ключников В.А. Исследование усталостного разрушения сталей 08X18H10T и 15ЮТА акустическим, оптическим и вихретоковым методами // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н.Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – №4(4) – С. 1448–1450.
3. Behrens V.-A., Hübner S., Bouguecha A., Knigge J., Voges-Schwieger K., Weilandt K. Local Strain Hardening of Metal Components by Means of Martensite Generation // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 137. – P. 1-33.
4. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1986.– 312 с.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. - 488 с.
6. Шубочкин, А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография / А.Е. Шубочкин. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 288 с.
7. Sayers C. M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. - 1982. - V. 15. - P. 2157-2167.
8. Ключников В.А., Мишакин В.В., Митенков Ф.М., Данилова Н.В. Использование акустического метода для оценки поврежденности стали 08X18H10T при усталостном разрушении // Контроль. Диагностика. – 2012. – №7. –С.9–13.