

УДК 620.179.(147+162)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 12X18H10T АКУСТИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ МЕТОДАМИ¹

© В. В. Мишакин, В. А. Ключников²*Статья поступила 28 июля 2016 г.*

Представлены результаты исследования влияния пластического деформирования на магнитные и акустические характеристики материала сварного соединения из аустенитной стали 12X18H10T. Показано, что неоднородность структурного состояния в зоне термического влияния приводит к неравномерному распределению акустических характеристик и магнитных свойств материала сварного соединения. В процессе пластического деформирования происходит образование мартенситной фазы, влияющей на свойства всего материала и имеющей модули упругости, отличные от модулей упругости исходной фазы — аустенита. Увеличение объемной доли мартенсита приводит к уменьшению модулей упругости материала и, как следствие, к уменьшению скоростей распространения ультразвуковых волн. Изменение скоростей распространения ультразвуковых волн ведет к заметным погрешностям в измерении характеристик исследуемого материала, например, толщины листа с помощью ультразвуковой толщинометрии. Выделение мартенсита (ферромагнетика) меняет также магнитные свойства материала. Установлена зависимость скорости распространения сдвиговых ультразвуковых волн от характеристики, связанной с изменением фазового состава аустенитной стали при пластическом деформировании. Разработан алгоритм определения толщины металла сварного соединения, подвергаемого обработке давлением и пластическому деформированию при эксплуатации конструкций. Показано, что дополнительное измерение магнитным методом характеристики, связанной с изменением фазового состава стали при деформации, существенно уменьшает погрешности измерения толщины металла сварного соединения.

Ключевые слова: аустенитная сталь; сварное соединение; пластическая деформация; мартенситное превращение; ультразвуковая толщинометрия; вихретоковый метод.

В сталях аустенитного класса при пластическом деформировании происходят интенсивные фазовые превращения, которые приводят к существенным изменениям физических свойств материала.

В зависимости от химического состава стали, скорости деформации, вида приложенного нагружения и др. из исходной парамагнитной γ -фазы аустенита, имеющего гранецентрированную решетку, могут сформироваться две различные мартенситные фазы: ϵ - и α' -мартенситы (пара- и ферромагнетики). Первый обладает гексагональной плотноупакованной решеткой, второй — в общем случае тетрагональной, образованной в результате искажения объемно-центрированной решетки атомами углерода. Формирование мартенситных фаз может происходить следующими способами: $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ или $\gamma \rightarrow \alpha'$ [1–4]. В работе [1] показано, что с увеличением степени деформации объем ϵ -мартенсита сначала увеличивается (до деформации 5 %), а затем при дальнейшем деформировании

уменьшается. Объемная доля α' -мартенсита при этом неуклонно возрастает.

Эти превращения влияют как на интенсивность деформационного упрочнения, так и на образование микроскопических трещин. Экспериментальные исследования показали, что существует тесная взаимосвязь между плотностью микротрещин и объемной долей кристаллов мартенсита [5].

Выделение в процессе деформирования жесткой упрочняющей фазы мартенсита приводит к изменению модулей упругости, акустических и магнитных характеристик сплава. Это в свою очередь ведет к заметным погрешностям в измерении параметров исследуемого материала, например, толщины листа с помощью ультразвуковой толщинометрии (УЗТМ).

Как известно, УЗТМ-метод заключается в определении времени и скорости распространения ультразвуковых волн (УВ) в материале [6]. Дополнительные измерения, связанные с изменением магнитных свойств аустенитных сталей, и выявление связей магнитных свойств со скоростями УВ позволят уменьшить погрешности измерения толщины и расширить области применения ультразвуковых толщиномеров.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-38-60155 мол_а_дк).

² Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия;
e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Снижение погрешностей при определении акустическим методом толщины элементов конструкций, в материале которых наблюдаются интенсивные фазовые изменения, — актуальная задача. Особенно это касается материала сварных соединений, подвергаемых пластическому деформированию.

Цель работы — на основе акустических и магнит разработку алгоритма для снижения погрешности определения толщины стали 12X18H10T, подвергнутой пластическому деформированию.

Изменение модулей упругости материала вследствие выделения второй фазы (в нашем случае α' -мартенсита) можно рассчитать, используя, например, приближение Фойгта [7]:

$$M_c = M_1 v_1 + M_2 v_2, \quad (1)$$

где M_c , M_1 , M_2 — модули упругости всего материала, фаз 1 и 2 соответственно; v_1 , v_2 — процентное содержание 1-й и 2-й фаз ($v_1 + v_2 = 1$).

Скорости сдвиговых и продольных УВ выражаются через модули сдвига μ и Юнга E следующим образом [6]:

$$V_\tau = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где V_τ и V_l — скорости распространения сдвиговой и продольной УВ; ρ — плотность материала; ν — коэффициент Пуассона.

Содержание объемной фазы α' -мартенсита в процессе пластического деформирования сталей аустенитного класса (AISI 301LN и AISI 304L) меняется [8, 9].

При пластическом деформировании объемная доля мартенсита возрастает (рис. 1). Поскольку модули упругости мартенсита ($E = 184$, $\mu = 69$ ГПа) меньше модулей упругости аустенита ($E = 206$; $\mu = 80$ ГПа) [10], увеличение объемной доли мартенсита приводит к уменьшению модулей упругости всего материала и скоростей УВ.

Исследовали образцы нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T толщиной 6 и шириной 20 мм, имеющие в середине сварной шов (СШ), выполненный с помощью аргонодуговой сварки встык. Химический состав стали, % масс.: 0,02 С, 0,43 Si, 0,74 Mn, 17,76 Cr, 9,16 Ni, 0,32 Ti, 0,002 S, 0,033 P, 0,23 Cu.

Одноосное растяжение проводили при комнатной температуре поэтапно. Скорости нагружения образцов составляли 0,5 и 5 мм/мин, скорости деформации $\dot{\epsilon}$ — 10^{-4} и 10^{-3} с $^{-1}$. До испытаний и после каждого этапа выполняли ультразвуковые исследования и анализ изменений магнитных характеристик, связанных с образованием магнитной фазы α' -мартенсита.

На рис. 2 представлена схема проведения ультразвуковых измерений. Акустические характеристики определяли эхо-импульсным методом. Сдвиговые

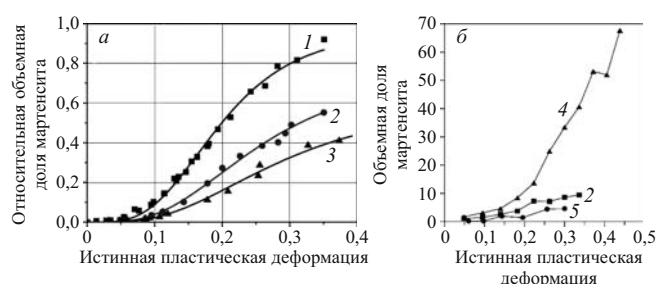


Рис. 1. Зависимость объемной доли α' -мартенсита от истинной пластической деформации для сталей AISI 301LN (а) и AISI 304L (б) при скоростях деформации $3 \cdot 10^{-4}$ (1), 10^{-1} (2), $2 \cdot 10^{-2}$ (3), $1,25 \cdot 10^{-4}$ (4) и 10^2 (5) с $^{-1}$

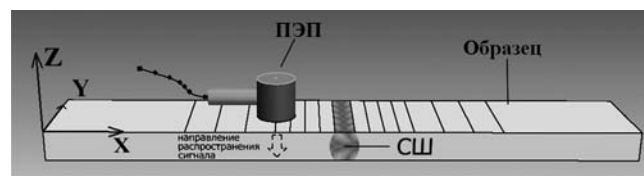


Рис. 2. Схема проведения акустических исследований

волны возбуждали с помощью пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) V156 фирмы Olympus (диаметр — 6 мм, несущая частота — 5 МГц). Рабочую часть образца разбивали на несколько зон, расстояние между которыми в основном материале составляло 6, а в зоне термического влияния (ЗТВ) и СШ — 4 мм. В выделенных зонах регистрировали амплитудно-временные диаграммы акустических сигналов. В результате обработки полученных данных (программа MathCAD) находили время распространения поперечных УВ, затем рассчитывали скорости (погрешности составляли около 3 нс и 5 м/с соответственно).

Изменение магнитных характеристик, связанное с образованием α' -мартенсита, исследовали с помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М» (показания прибора отображают процентное содержание магнитной фазы Φ).

В результате акустических и магнитных исследований получили распределения по длине образцов скоростей сдвиговых УВ V_{zy} , поляризованных поперек нагружения, и величины Φ при различных значениях пластической деформации ϵ (рис. 3) (СШ — зоны 8 – 12, ЗТВ — зоны 6 – 8 и 12 – 14).

С ростом пластической деформации происходит развитие (причем в СШ и ЗТВ по-разному) неоднородности акустических и магнитных характеристик. В основном материале наблюдаются монотонные уменьшение скорости сдвиговых УВ V_{zy} и увеличение величины Φ , связанное с выделением магнитной фазы (рис. 4).

На рис. 5 показана зависимость изменения Φ ($\Delta\Phi$) от изменения V_{zy} (ΔV_{zy}) в зонах основного материала.

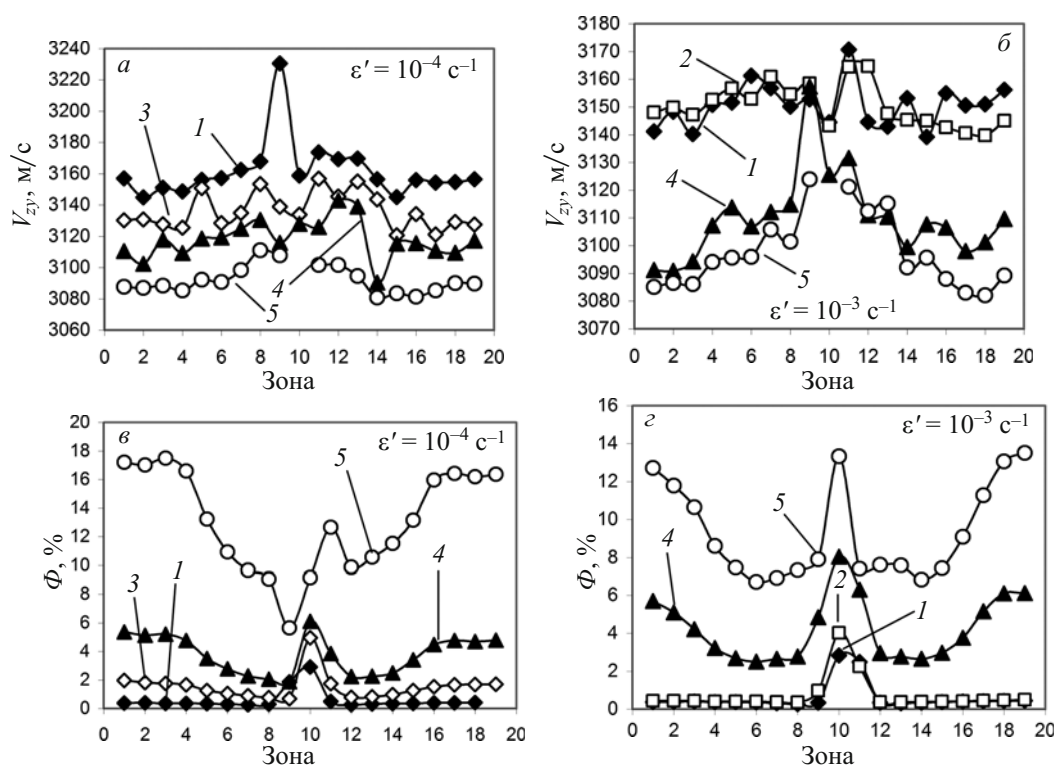


Рис. 3. Распределение скоростей V_{zy} (а, б) и величины Φ (в, г) по длине образцов при степенях пластической деформации ε 0 (1), 2 (2), 9 (3), 14 (4) и 24 (5) %

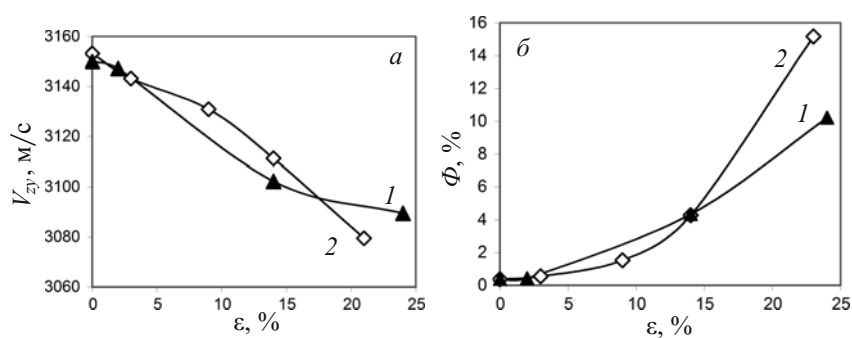


Рис. 4. Зависимости V_{zy} (а) и Φ (б) в основном материале от пластической деформации ε (1 и 2 — $\varepsilon = 10^{-3}$ и 10^{-4} с⁻¹ соответственно)

Приведенная зависимость хорошо аппроксимируется логарифмическим выражением вида:

$$\Delta V_{zy} = k_1 \ln(\Delta \Phi) + k_2, \quad (3)$$

где k_1 и k_2 равны -10 и -36 м/с (для $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}$ с⁻¹), -14 и -29 м/с (для $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}$ с⁻¹).

Используя выражение (3) и значение скорости V_{0zy} ($\varepsilon = 0$ %), можно определить скорость УВ при наличии пластической деформации:

$$V_{zy}^{\Phi} = V_{0zy} + \Delta V_{zy} = V_{0zy} + k_1 \ln(\Delta \Phi) + k_2. \quad (4)$$

Толщину металла h_{Φ} , определяемую с помощью V_{zy}^{Φ} , рассчитывали по следующей формуле:

$$h_{\Phi} = \frac{1}{2} V_{zy}^{\Phi} t, \quad (5)$$

где t — текущее время распространения УВ.

При использовании УЗТМ-метода толщина материала

$$h_a = \frac{1}{2} V_{zy}^{\text{снр}} t, \quad (6)$$

где $V_{zy}^{\text{снр}} = 3120$ м/с — скорость распространения сдвиговых волн в нержавеющей стали [6].

На рис. 6 представлены распределения по зонам толщины металла, измеренной микрометром h_m и определенной с помощью выражения (5) h_{Φ} и методом ультразвуковой толщинометрии с использованием зависимости (6) h_a . Толщину в ЗТВ и СШ рассчитывали аналогично, как и толщину основного материала.

Абсолютные погрешности определения толщины (при начальном значении 6 мм) представлены в таблице. Видно, что предлагаемый подход, учитывающий изменение величины Φ , заметно точнее традиционного УЗТМ-метода.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при пластическом деформировании скорости

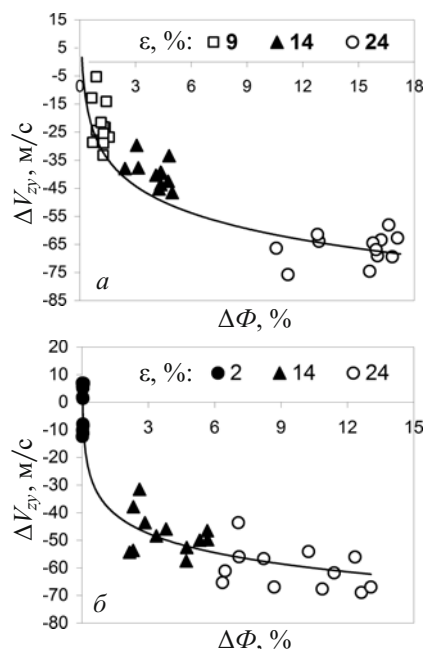


Рис. 5. Изменение Φ в зависимости от изменения V_{γ} для образца с $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (а) и 10^{-3} с^{-1} (б)

Абсолютные погрешности определения толщины материала, мм

Область	УЗТМ-метод	Предлагаемый алгоритм
Основной материал	$\leq 0,07$	$\leq 0,01$
ЗТВ	$\leq 0,1$	$\leq 0,03$
СШ	$\leq 0,1$	$\leq 0,09$

распространения сдвиговых УВ и характеристика магнитных свойств Φ основного материала сварного соединения из аустенитной стали 12X18H10T меняются монотонно (связь их изменений характеризуется логарифмической зависимостью). Разработанный алгоритм определения толщины металла сварного соединения в сравнении с традиционным УЗТМ-методом позволяет существенно снизить погрешности измерения. Его можно использовать при измерении толщины металла, подвергаемого обработке давлением и пластическому деформированию при эксплуатации конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mangonon P., Thomas G. The Martensite Phases in 304 Stainless Steel / Metallurg. Trans. 1970. Vol. 1. P. 1577 – 1586.
2. Гольдштейн М. И., Бронфин Б. М., Литвинов В. С. Металлофизика высокопрочных сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 312 с.
3. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
4. Seetharaman V., Krishnan R. Influence of the martensitic transformation on the deformation behaviour of an AISI 316 stainless steel at low temperatures / J. Mater. Sci. 1981. Vol. 16. P. 523 – 530.
5. Терентьев В. Ф., Колмаков А. Г., Блинов В. М. Влияние мартенсита деформации на усталость аустенитных коррозионно-стойких сталей / Деформация и разрушение материалов. 2007. № 6. С. 2 – 9.
6. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие. — Минск: Высшая школа, 1987. — 271 с.

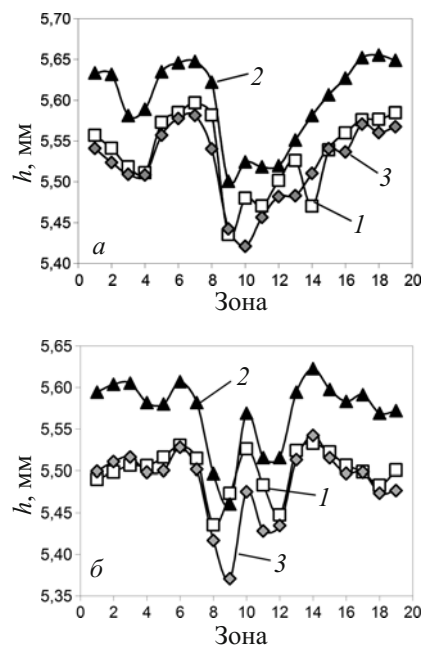


Рис. 6. Распределения h_m (1), h_a (2) и h_{ϕ} (3) по длине образцов с $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}$ (а) и 10^{-3} с^{-1} (б) ($\varepsilon = 14\%$)

7. Берестова С. А., Хананов Ш. М. О некоторых путях становления структурно-феноменологических теорий в механике деформируемого тела / Вестник ПНИПУ. Механика. 2010. № 4. С. 17 – 28.
8. Talonen J., Nenonen P., Pape G., Hänninen H. Effect of strain rate on the strain-induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ -martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels / Metallurg. Mater. Trans. A. 2005. Vol. 36A. P. 421 – 432.
9. Lichtenfeld J. A., Mataya M. C., Van Tyne C. J. Effect of strain rate on the strain-strain behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless steel / Metallurg. Mater. Trans. A. 2006. Vol. 37A. P. 147 – 161.
10. Ключников В. А. Определение деградации сталей аустенитного класса при статическом и усталостном нагружении на основе акустического метода: дис. ... канд. техн. наук. — Н. Новгород, 2013. — 130 с.

REFERENCES

1. Mangonon P., Thomas G. The Martensite Phases in 304 Stainless Steel / Metallurg. Trans. 1970. Vol. 1. P. 1577 – 1586.
2. Gol'dshtein M. I., Bronfin B. M., Litvinov V. S. Physics of metals of the high-strength alloys. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 312 p. [in Russian].
3. Gulyaev A. P. Metal science. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 544 p. [in Russian].
4. Seetharaman V., Krishnan R. Influence of the martensitic transformation on the deformation behaviour of an AISI 316 stainless steel at low temperatures / J. Mater. Sci. 1981. Vol. 16. P. 523 – 530.
5. Terent'ev V. F., Kolmakov A. G., Blinov V. M. Influence of martensite deformation on the fatigue of austenitic stainless steels / Deform. Razrush. Mater. 2007. N 6. P. 2 – 9 [in Russian].
6. Aleshin N. P., Lupachev V. G. Ultrasonic defectoscopy: field reference. — Minsk: Vyshshaya shkola, 1987. — 271 p. [in Russian].
7. Berestova S. A., Khananov Sh. M. O Some ways of becoming structurally-phenomenological theories in the mechanics of deformable bodies / Vestnik PNIPU. Mekh. 2010. N 4. P. 17 – 28 [in Russian].
8. Talonen J., Nenonen P., Pape G., Hänninen H. Effect of strain rate on the strain-induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ -martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels / Metallurg. Mater. Trans. A. 2005. Vol. 36A. P. 421 – 432.
9. Lichtenfeld J. A., Mataya M. C., Van Tyne C. J. Effect of strain rate on the strain-strain behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless steel / Metallurg. Mater. Trans. A. 2006. Vol. 37A. P. 147 – 161.
10. Klyushnikov V. A. Determination of degradation of austenitic steels under static and fatigue loading on the basis of the acoustic method: candidate's thesis. — N. Novgorod, 2013. — 130 p. [in Russian].