

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНОЙ И АУСТЕНИТНО-ФЕРРИТНОЙ СТАЛЕЙ

В.А. Ключников

slavchuk2@yandex.ru

В.В. Мишакин

imndt31@mts-nn.ru

Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород,  
Российская Федерация

### Аннотация

Приведены результаты исследования влияния пластического деформирования на магнитные и акустические характеристики аустенитной стали 12X18H10Г и аустенитно-ферритной стали 12X21H5Г. Установлены закономерности изменений ультразвуковых параметров и содержания ферритной фазы в процессе пластического деформирования аустенитной и аустенитно-ферритной сталей при разных скоростях деформации. Выявлены различия в характере изменения магнитных характеристик при деформировании исследованных материалов

### Ключевые слова

Пластическое деформирование, аустенитная и аустенитно-ферритная стали, мартенситное превращение, акустические характеристики, скорость деформации, вихретоковый метод

Поступила в редакцию 05.06.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-38-60155 мол\_а\_дк)*

**Введение.** Коррозионно-стойкие стали широко используются в разных отраслях промышленности, поэтому очень важно контролировать эволюцию их микроструктуры и физико-механические свойства в процессе эксплуатации. Эксплуатационные свойства изделий, изготовленных из аустенитных и аустенитно-ферритных сталей, в значительной степени зависят от структуры и фазового состава, которые могут изменяться в процессе эксплуатации изделия.

Известно, что в метастабильных сталях таких классов даже при комнатной температуре силовое воздействие деформации вызывает образование фазы  $\alpha'$ -мартенсита вследствие распада  $\gamma$ -аустенита, что приводит к существенным изменениям физических свойств материала [1]. На мартенситное превращение, вызванное пластической деформацией, влияют различные внешние параметры, такие как температура [2, 3], напряженное состояние [4, 5] и скорость деформации [6–8]. Содержание феррита в аустенитно-ферритных сталях при этом остается неизменным [2]. Фаза  $\alpha'$ -мартенсита является ферромагнетиком в отличие от исходной парамагнитной фазы аустенита.

Отличие модулей упругости выделившейся фазы мартенсита от модулей матрицы материала приводит к изменению упругих и акустических характеристик всего сплава. Объемная доля  $\alpha'$ -мартенсита зависит от напряженно-деформированного состояния материала [3–5], скорости [6–8] и температуры [9–11] деформирования, а также от химического состава и энергии дефектов упаковки [5, 12, 13].

Изменение модулей упругости всего сплава вследствие выделения дополнительной фазы можно учесть, используя различные приближения [14]. В приближении Фойгта модули упругости всего материала рассчитываются с помощью следующего выражения:

$$M_C = \sum_{i=1}^N M_i \nu_i, \quad (1)$$

где  $M_C$  — модули упругости всего материала;  $M_i$  и  $\nu_i$  — модули упругости и объемное содержание  $i$ -й фазы,  $N$  — число фаз.

Модули упругости функционально связаны со скоростями распространения упругих волн в материалах. Связь модуля Юнга  $E$  и модуля сдвига  $\mu$  со скоростью упругих волн выражается следующим образом [15]:

$$E = \frac{\rho v_\tau^2 (4v_\tau^2 - 3v_l^2)}{v_\tau^2 - v_l^2}; \quad \mu = \rho v_\tau^2, \quad (2)$$

где  $v_\tau$  и  $v_l$  — скорости распространения сдвиговой и продольной ультразвуковых волн;  $\rho$  — плотность материала.

Коэффициент Пуассона изотропного материала определяется как [16]:

$$\nu = \frac{v_l^2 - 2v_\tau^2}{2(v_l^2 - v_\tau^2)}. \quad (3)$$

Одновременно с мартенситным превращением в процессе пластического деформирования происходит изменение текстуры аустенитной фазы [17–19], оказывающее влияние на анизотропию всего материала, в том числе и на акустическую анизотропию [20, 21]. Наличие анизотропии упругих свойств приводит к разности в скоростях поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек осей анизотропии (эффект двулучепреломления).

Для описания анизотропии упругих свойств поликристаллических материалов, состоящих из кристаллов с кубической решеткой, используется параметр акустической анизотропии  $A$ , который пропорционален разности модулей упругости  $A \sim (c_{55} - c_{44})$  и определяется в основном кристаллографической текстурой поликристаллического материала [20, 21]. Для изотропного материала  $c_{44} = c_{55} = \mu$ . В любом направлении анизотропного материала могут распространяться три плоские упругие волны — одна продольная и две поперечные [22].

Для определения степени влияния фазовых изменений на акустические и магнитные характеристики материала проведены экспериментальные исследования сталей аустенитного класса 12X18H10T и аустенитно-ферритного 12X21H5T при пластическом деформировании.

**Методика исследования.** Эксперименты проводили на образцах из аустенитной стали 12X18H10T и аустенитно-ферритной 12X21H5T. Были изготовлены плоские образцы толщиной 6, шириной 20 и рабочей длиной 85 мм. Химический состав, полученный в результате химического анализа оптико-эмиссионным спектрометром, представлен в таблице.

## Химический состав исследуемых сталей

Сталь	Состав стали									
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	P	S	Si	Fe
12X18H10T	0,03	17,27	9,02	0,56	0,22	0,31	0,029	0,003	0,43	Основа
12X21H5T	0,0783	22,6	5,82	0,356	0,0993	0,533	0,0196	0,0082	0,56	Основа

Одноосное растяжение проводили при комнатной температуре и разных скоростях нагружения для каждого образца. Скорость деформации  $\epsilon$  образцов из стали 12X18H10T составляла  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , для образцов из стали 12X21H5T —  $2 \cdot 10^{-4}$ ,  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Растяжение проводили поэтапно. До испытаний и после каждого этапа выполняли ультразвуковые исследования, а также исследовали изменения магнитных характеристик, связанных с образованием магнитной фазы  $\alpha'$ -мартенсита.

Для измерения акустических характеристик применяли эхоимпульсный метод. На рис. 1 приведена схема ультразвуковых измерений. В настоящей работе использовали упругие волны (УВ), для возбуждения которых применяли пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) V156 и A110 с диаметром излучающей пластины 6 мм фирмы Olympus и несущей частотой 5 МГц. Продольные и поперечные волны распространяются вдоль оси Z, поляризация поперечных волн может быть направлена как вдоль оси нагружения X, так и поперек — вдоль оси Y. Рабочую часть образца разбивали на несколько зон, расстояние между которыми составляло 6 мм. В каждой зоне регистрировали амплитудно-временную диаграмму акустических сигналов. В результате обработки данных определено время распространения УВ, по которому были рассчитаны скорости.

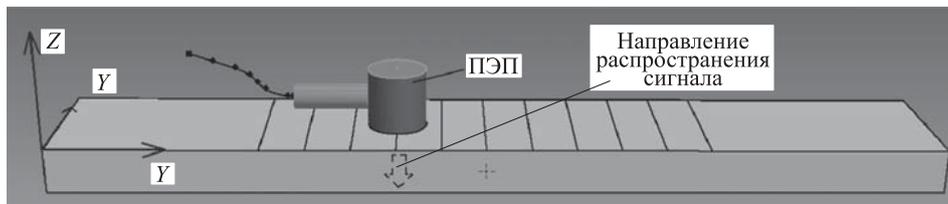


Рис. 1. Схема проведения акустических исследований

При наличии анизотропии материала вместо коэффициента Пуассона использовали коэффициенты  $\mu_{ZX}$  и  $\mu_{ZY}$ , рассчитанные аналогично формуле (3):

$$\mu_{ZX} = \frac{v_{ZZ}^2 - 2v_{ZX}^2}{2(v_{ZZ}^2 - v_{ZX}^2)}; \quad \mu_{ZY} = \frac{v_{ZZ}^2 - 2v_{ZY}^2}{2(v_{ZZ}^2 - v_{ZY}^2)}, \quad (4)$$

где  $v_{ZX}$  и  $v_{ZY}$  — скорости распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек оси нагружения;  $v_{ZZ}$  — скорость распространения продольных УВ.

Для описания анизотропии упругих свойств поликристаллических материалов, состоящих из кристаллов с кубической решеткой, использовали следующую комбинацию скоростей [21]:

$$A = \frac{v_{ZX}^2 - v_{ZY}^2}{v_{ZZ}^2 + v_{ZX}^2 + v_{ZY}^2}. \quad (5)$$

Современные аппаратура и методы обработки сигнала позволяют проводить прецизионные измерения времени распространения УВ различных типов и поляризации [21].

Погрешность измерения времени распространения УВ составляла 2...3 нс, скорости УВ 5 м/с, погрешность измерения коэффициентов  $\mu_{ZX}$  и  $\mu_{ZY}$  составляла  $7 \cdot 10^{-4}$ , параметра  $A$   $5 \cdot 10^{-4}$ .

Исследование изменения магнитных характеристик, связанного с образованием  $\alpha'$ -мартенсита, проводили с помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М», показания которого отображали процентное содержание  $\Phi$  ферритной фазы. Погрешность определения ферритной фазы не превышала  $\pm 0,05(1 + \Phi)$  %.

Металлографический анализ микроструктуры выполняли с использованием оптического микроскопа Альтами МЕТ 3М. Перед экспериментом был изготовлен шлиф и проведено электролитическое травление в 10 %-ном водном растворе щавелевой кислоты.

**Результаты исследования.** Микроструктура исследованной аустенитной стали типа 12X18H10T в состоянии поставки приведена на рис. 2, а, на котором видны равноосные зерна аустенита со многими отожденными двойниками и агломерациями медных осадков. На рис. 2, б показана микроструктура стали 12X18H10T после пластического деформирования.

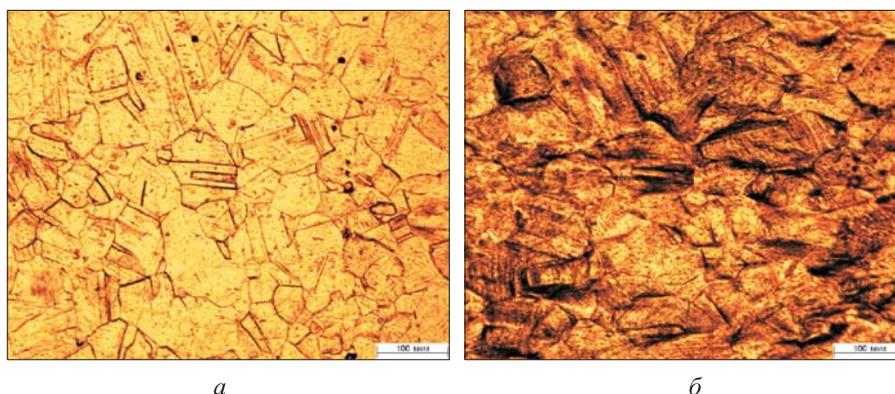
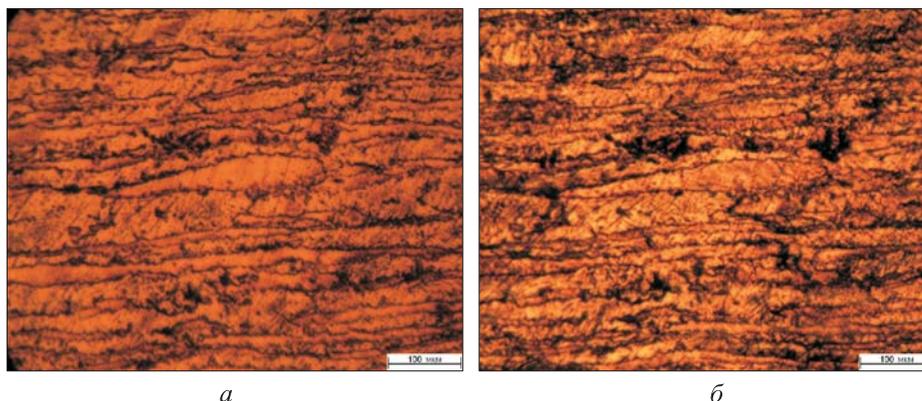


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 20$ ) стали 12X18H10T при деформации:

а —  $\varepsilon = 0$  %; б —  $\varepsilon = 34$  %

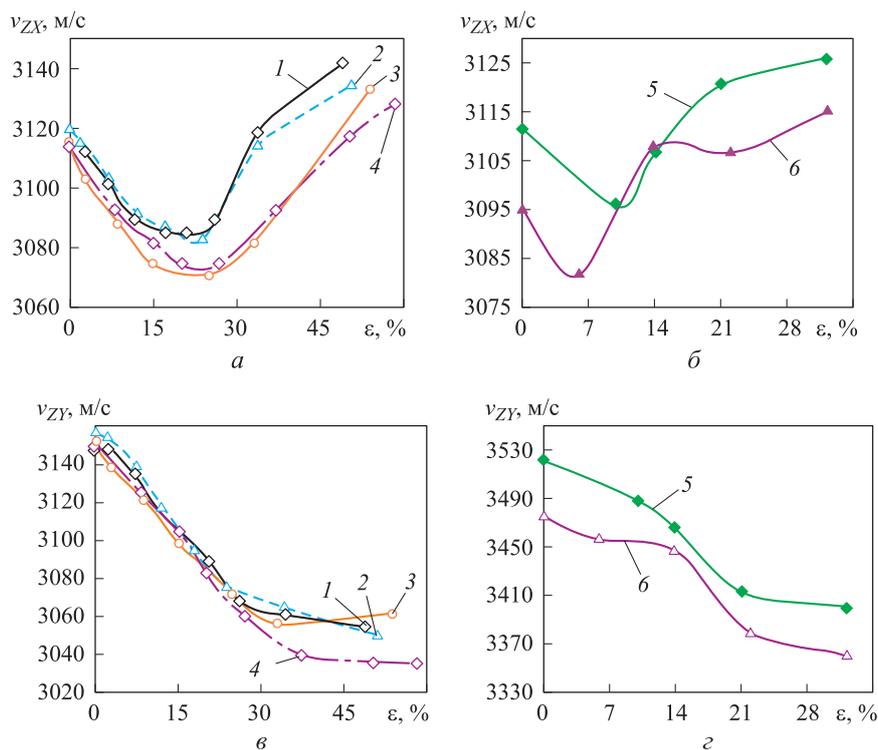
Микроструктура аустенитно-ферритной стали 12X21H5T до и после деформирования показана на рис. 3. Можно отметить высокую степень морфологической анизотропии.

Накопление микроповреждений, изменение кристаллографической текстуры, выделение дополнительных фаз при пластическом деформировании и другие факторы оказывают влияние на акустические и упругие характеристики материала [19, 23–25].

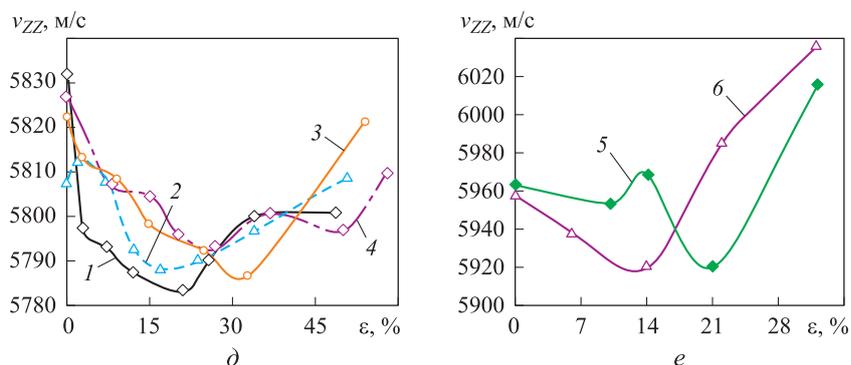


**Рис. 3.** Микроструктура стали ( $\times 20$ ) 12Х21Н5Т при деформации:  
 а —  $\varepsilon = 0\%$ ; б —  $\varepsilon = 34\%$ ;

В результате акустических исследований получены сдвиговые, поляризованные вдоль  $v_{ZX}$  и поперек  $v_{ZY}$  оси нагружения и продольные  $v_{ZZ}$  скорости УВ в зависимости от пластической деформации  $\varepsilon$  (рис. 4). Изменение скоростей  $v_{ZX}$  носит монотонный характер, тогда как скорости  $v_{ZX}$  и  $v_{ZZ}$  изменяются немоно-



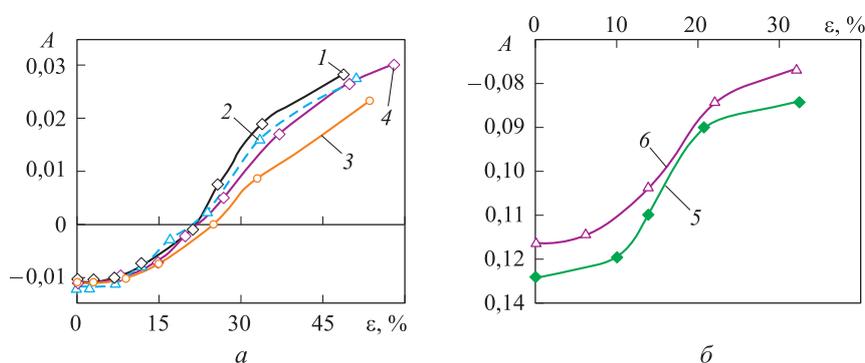
**Рис. 4 (начало).** Зависимость от пластической деформации  $\varepsilon$  скоростей  $v_{ZX}$  (а, б),  $v_{ZY}$  (в, г) в сталях 12Х18Н10Т (а, в) и 12Х21Н5Т (б, г) с  $\varepsilon = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (1);  $\varepsilon = 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (2);  $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (3);  $\varepsilon = 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  (4);  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (5);  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (6)



**Рис. 4 (окончание).** Зависимость от пластической деформации  $\varepsilon$  скоростей  $v_{ZZ}$  ( $\partial$ ,  $e$ ) в сталях 12X18H10T ( $\partial$ ) и 12X21H5T ( $e$ ) с  $\varepsilon = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (1);  $\varepsilon = 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (2);  $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (3);  $\varepsilon = 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  (4);  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (5);  $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  (6)

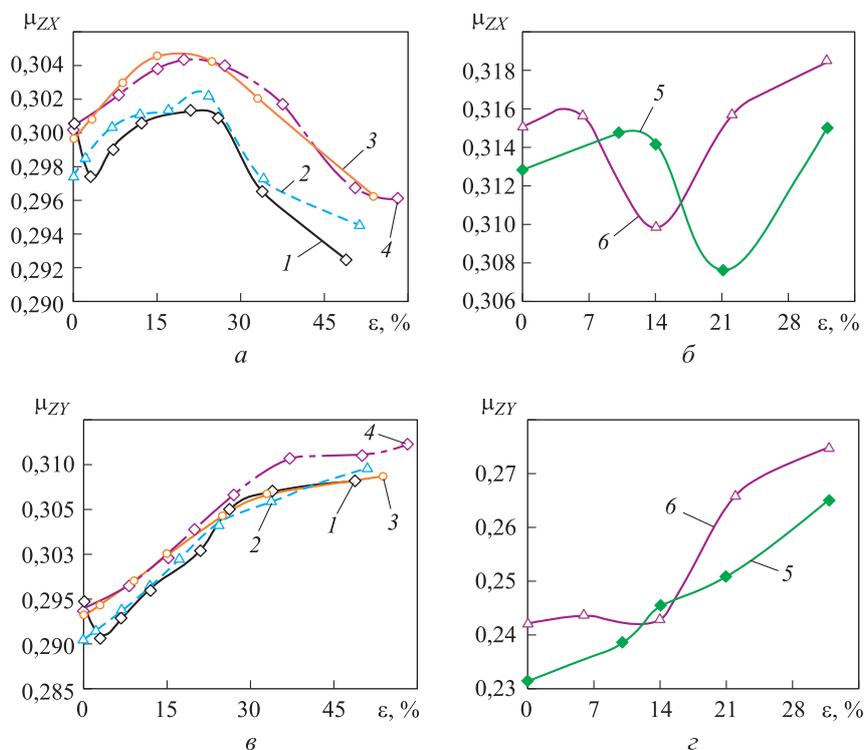
тонно. С увеличением деформации модули упругости и плотность материала изменяются таким образом, что на начальном этапе деформирования их соотношения, определяющие скорости УВ, уменьшаются. Однако при достижении определенного значения деформации скорости  $v_{ZX}$  и  $v_{ZZ}$  увеличиваются, что, по-видимому, связано с накоплением объемной доли мартенсита и его расположением в структуре материала.

Зависимости изменения параметра акустической анизотропии  $A$ , усредненной по всем измеряемым зонам, от пластической деформации  $\varepsilon$  показаны на рис. 5. Видно, что параметр  $A$  монотонно изменяется в зависимости от величины пластической деформации. Можно отметить, что на ранних стадиях нагружения изменение параметра акустической анизотропии минимально. Более интенсивное изменение происходит при превышении деформации 10...15 % как для стали аустенитного, так и для аустенитно-ферритного класса, что можно использовать при оценке пластической деформации. Также получено, что для исследуемых сталей практически одинакова величина изменения параметра акустической анизотропии при разрушении материала.

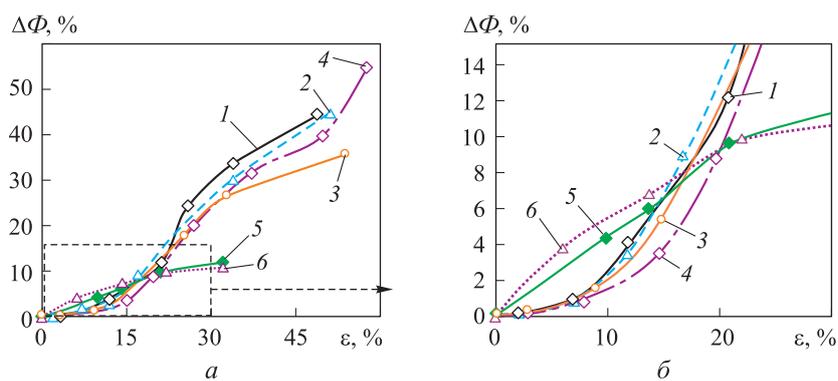


**Рис. 5.** Зависимость от пластической деформации  $\varepsilon$  анизотропии  $A$  в сталях 12X18H10T ( $a$ ) и 12X21H5T ( $b$ ) (1-6 — см. рис. 4)

С увеличением пластической деформации наблюдается немонотонное изменение коэффициента  $\mu_{ZX}$  (рис. 6, а, б) и монотонное увеличение коэффициента  $\mu_{ZY}$  (рис. 6, в, г), соотношение которых также определяет анизотропию материала.



**Рис. 6.** Зависимость от пластической деформации  $\epsilon$  коэффициентов  $\mu_{ZX}$  (а, б) и  $\mu_{ZY}$  (в, г) в сталях 12X18H10T (а, в) и 12X21H5T (б, г) (1-6 — см. рис. 4)



**Рис. 7.** Зависимость от пластической деформации  $\epsilon$  изменения величины  $\Phi$  (1-6 — см. рис. 4)

Согласно данным работы [2], изменение магнитных характеристик аустенитной и аустенитно-ферритной сталей при пластическом деформировании обусловлено только образованием фазы мартенсита. На рис. 7, а приведено изменение

величины  $\Phi$ , отображающей процентное содержание ферритной фазы. Зависимость  $\Delta\Phi$  ( $\epsilon$ ) для аустенитной стали имеет сигмоидальную форму, аналогичную первоначально полученным и описанным в работах [9, 13]. Начальное значение  $\Phi$  для образцов, изготовленных из аустенитной стали 12X18H10T, составляло порядка 0 %, для образцов, изготовленных из аустенитно-ферритной 12X21H5T, 50 %.

Ферритная фаза в исходном материале (рис. 7, б) влияет на интенсивность изменения магнитных характеристик. Изменение магнитных свойств аустенитно-ферритной стали на ранних стадиях нагружения более интенсивно, чем в аустенитной стали.

**Выводы.** 1. Для исследованных сталей изменение параметра акустической анизотропии минимально на ранних стадиях нагружения. Более интенсивное изменение происходит при превышении деформации 10...15 %, причем при разрушении материала величина изменения практически одинакова.

2. С увеличением пластической деформации наблюдается немонотонное изменение коэффициента  $\mu_{zx}$  и монотонное увеличение коэффициента  $\mu_{zy}$ , соотношение которых также определяет анизотропию материала.

3. Изменения в процессе пластического деформирования параметра акустической анизотропии и содержания ферритной фазы в аустенитной стали имеют схожий характер.

4. На ранних стадиях нагружения изменение магнитных свойств аустенитно-ферритной стали более интенсивно, чем в аустенитной стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Lecroisey F., Pineau A.* Martensitic transformations induced by plastic deformation in the Fe–Ni–Cr–C system // *Metall. Mater. Trans. B.* 1972. Vol. 3. No. 2. P. 391–400. DOI: 10.1007/BF02642042 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02642042>
2. *Методы* выявления мартенсита деформации в аустенитно-ферритных сталях / М.Б. Ригмант, М.К. Корх, Д.И. Давыдов, Д.А. Шишкин, Ю.В. Корх., А.П. Ничипурук, Н.В. Казанцева // *Дефектоскопия.* 2015. № 11. С. 28–42.
3. *Powell G.W., Marshall E.R., Backofen W.A.* Strain hardening of austenitic stainless steel // *Trans. ASME.* 1958. Vol. 50. P. 478–497.
4. *Hecker S.S., Stout M.G., Staudhammer K.P., Smith J.L.* Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel. P. I. Magnetic measurements and mechanical behavior // *Metall. Trans. A.* 1982. Vol. 13. No. 4. P. 619–626. DOI: 10.1007/BF02644427 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02644427>
5. *Padilha A.F., Rios P.R.* Decomposition of austenite in stainless steel // *ISIJ International.* 2002. Vol. 42. No. 4. P. 325–327. DOI: 10.2355/isijinternational.42.325 URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/42/4/42\\_4\\_325/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/42/4/42_4_325/_article/-char/en)
6. *Huang G.L., Matlock D.K., Krauss G.* Martensite formation, strain rate sensitivity and deformation behavior of type 304 austenitic steel sheet // *Metall. Trans. A.* 1989. Vol. 20. No. 7. P. 1239–1246. DOI: 10.1007/BF02647406 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02647406>
7. *Talonen J., Nenonen P., Pape G., Hanninen H.* Effect of strain rate on the strain-induced  $\gamma \rightarrow \alpha'$  martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels // *Metall. Mater. Trans. A.* 2005. Vol. 36. No. 2. P. 421–432. DOI: 10.1007/s11661-005-0313-y URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-005-0313-y>

8. *Lichtenfeld J.A., Mataya M.C., Van Tyne C.J.* Effect of strain rate on stress-strain behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless steel // *Metall. Mater. Trans. A.* 2006. Vol. 37. No. 1. P. 147–161. DOI: 10.1007/s11661-006-0160-5  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-006-0160-5>
9. *Angel T.* Formation of martensite in austenitic stainless steels // *JISI.* 1954. Vol. 177. Pp. 165–174.
10. *Byun T., Hashimoto N., Farrell K.* Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels // *Acta Mater.* 2004. Vol. 52. No. 13. P. 3889–3899. DOI: 10.1016/j.actamat.2004.05.003  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645404002654>
11. *Talonen J., Hanninen H.* Damping properties of austenitic stainless steels containing strain-induced martensite // *Metall. Mater. Trans. A.* 2004. Vol. 35. No. 8. P. 2401–2406. DOI: 10.1007/s11661-006-0220-x  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-006-0220-x>
12. *Choi J.-Y., Jin W.* Strain induced martensite formation and its effect on strain hardening behavior in the cold drawn 304 austenitic stainless steels // *Scripta Mater.* 1997. Vol. 36. No. 1. P. 99–104. DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00338-7  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646296003387>
13. *Olson G.B., Cohen M.* Kinetics of strain-induced martensitic nucleation // *Metall. Trans. A.* 1975. Vol. 6. P. 791–795. DOI: 10.1007/BF02672301  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02672301>
14. *Chawla K.K.* Composite materials. Science and engineering. Springer, 2012. 542 p.
15. *Алешин Н.П., Лупачев В.Г.* Ультразвуковая дефектоскопия. Минск: Вышэйшая школа, 1987. 271 с.
16. *Клюев В.В., ред.* Неразрушающий контроль и диагностика. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
17. *Abreu H., Silva M., Herculano L., Bhadeshia H.* Texture analysis of deformation induced martensite in an AISI 301L stainless steel: microtexture and macrotexture aspects // *Material Research.* 2009. Vol. 12. No. 3. P. 291–297. DOI: 10.1590/S1516-14392009000300008  
URL: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392009000300008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392009000300008)
18. *Lindell D.* Texture evolution of warm-rolled and annealed 304L and 316L austenitic stainless steels // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering.* 2015. Vol. 82 (1). P. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/82/1/012101  
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/82/1/012101>
19. *Mertinger V., Nagyb E., Tranta F., Solyom J.* Strain-induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels // *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 481–482. P. 718–722. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.165  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509307012221>
20. *Sayers C.* Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // *Appl. Phys.* 1982. Vol. 15. No. 11. P. 2157–2167. DOI: 10.1088/0022-3727/15/11/011  
URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/15/11/011>
21. *Allen D., Sayers C.* The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique // *Ultrasonics.* 1984. Vol. 22. No. 4. P. 179–188. DOI: 10.1016/0041-624X(84)90034-9  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X84900349>
22. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 308 с.

23. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Оценка остаточных напряжений в сварных соединениях с помощью ультразвука // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 54–58.

24. 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.

25. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.

**Клюшников Вячеслав Александрович** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Неразрушающий контроль и диагностика материалов и конструкций» Института проблем машиностроения РАН (Российская Федерация, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85).

**Мишакин Василий Васильевич** — д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Неразрушающий контроль и диагностика материалов и конструкций» Института проблем машиностроения РАН (Российская Федерация, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д. 85).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Клюшников В.А., Мишакин В.В. Исследование влияния пластического деформирования на акустические и магнитные характеристики аустенитной и аустенитно-ферритной сталей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 2. С. 102–113. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-102-113

**INVESTIGATING THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON ACOUSTIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF AUSTENITIC AND DUPLEX STEEL**

V.A. Klyushnikov

slavchuk2@yandex.ru

V.V. Mishakin

imndt31@mts-nn.ru

**Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation**

**Abstract**

We present the results of investigating how plastic deformation affects acoustic and magnetic properties of austenitic 12X18H10T steel and duplex 12X21H5T steel. We established the patterns of change in ultrasound parameters and ferrite phase content during plastic deformation in austenitic and duplex stainless steels at various strain rates. We detected differences in how magnetic properties change when the materials under investigation are deformed

**Keywords**

*Plastic deformation, austenitic steel, duplex stainless steel, martensitic transformation, acoustic properties, strain rate, eddy current method*

Received 05.06.2017

© BMSTU, 2018

*The work was carried out with the state financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 16-38-60155 мол\_а\_дк)*

**REFERENCES**

[1] Lecroisey F., Pineau A. Martensitic transformations induced by plastic deformation in the Fe–Ni–Cr–C system. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1972, vol. 3, no. 2, pp. 391–400. DOI: 10.1007/BF02642042 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02642042>

- [2] Rigmant M.B., Korkh M.K., Davydov D.I., Shishkin D.A., Korkh Y.V., Nichipuruk A.P., Kazantseva N.V. Methods for revealing deformation martensite in austenitic-ferritic steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 680–691.  
DOI: 10.1134/S1061830915110030  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1061830915110030>
- [3] Powell G.W., Marshall E.R., Backofen W.A. Strain hardening of austenitic stainless steel. *Trans. ASME*, 1958, vol. 50, pp. 478–497.
- [4] Hecker S.S., Stout M.G., Staudhammer K.P., Smith J.L. Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel. P. I. Magnetic measurements and mechanical behavior. *Metallurgical Transactions A*, 1982, vol. 13, no. 4, pp. 619–626.  
DOI: 10.1007/BF02644427 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02644427>
- [5] Padilha A.F., Rios P.R. Decomposition of austenite in stainless steel. *ISIJ International*, 2002, vol. 42, no. 4, pp. 325–327. DOI: 10.2355/isijinternational.42.325  
Available at: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/42/4/42\\_4\\_325/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/42/4/42_4_325/_article/-char/en)
- [6] Huang G.L., Matlock D.K., Krauss G. Martensite formation, strain rate sensitivity and deformation behavior of type 304 austenitic steel sheet. *Metall. Trans. A*, 1989, vol. 20, no. 7, pp. 1239–1246. DOI: 10.1007/BF02647406 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02647406>
- [7] Talonen J., Nenonen P., Pape G., Hanninen H. Effect of strain rate on the strain-induced  $\gamma \rightarrow \alpha'$  martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels. *Metall. Mater. Trans. A*, 2005, vol. 36, no. 2, pp. 421–432. DOI: 10.1007/s11661-005-0313-y  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-005-0313-y>
- [8] Lichtenfeld J.A., Mataya M.C., Van Tyne C.J. Effect of strain rate on stress-strain behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless steel. *Metall. Mater. Trans. A*, 2006, vol. 37, no. 1, pp. 147–161. DOI: 10.1007/s11661-006-0160-5  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-006-0160-5>
- [9] Angel T. Formation of martensite in austenitic stainless steels. *JISI*, 1954, vol. 177, pp. 165–174.
- [10] Byun T., Hashimoto N., Farrell K. Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels. *Acta Mater.*, 2004, vol. 52, no. 13, pp. 3889–3899.  
DOI: 10.1016/j.actamat.2004.05.003  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645404002654>
- [11] Talonen J., Hanninen H. Damping properties of austenitic stainless steels containing strain-induced martensite. *Metall. Mater. Trans. A*, 2004, vol. 35, no. 8, pp. 2401–2406.  
DOI: 10.1007/s11661-006-0220-x  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-006-0220-x>
- [12] Choi J.-Y., Jin W. Strain induced martensite formation and its effect on strain hardening behavior in the cold drawn 304 austenitic stainless steels. *Scripta Mater.*, 1997, vol. 36, no. 1, pp. 99–104. DOI: 10.1016/S1359-6462(96)00338-7  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646296003387>
- [13] Olson G.B., Cohen M. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation. *Metall Trans A*, 1975, vol. 6, pp. 791–795. DOI: 10.1007/BF02672301  
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02672301>
- [14] Chawla K.K. Composite materials. Science and engineering. Springer, 2012. 542 p.
- [15] Aleshin N.P., Lupachev V.G. Ul'trazvukovaya defektoskopiya [Ultrasonic defectoscopy]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1987. 271 p.

- [16] Klyuev V.V., red. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* [Non-destructive control and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 488 p.
- [17] Abreu H., Silva M., Herculano L., Bhadeshia H. Texture analysis of deformation induced martensite in an AISI 301L stainless steel: microtexture and macrotexture aspects. *Material Research*, 2009, vol. 12, no. 3, pp. 291–297. DOI: 10.1590/S1516-14392009000300008  
Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392009000300008](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392009000300008)
- [18] Lindell D. Texture evolution of warm-rolled and annealed 304L and 316L austenitic stainless steels. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 82 (1), pp. 012101. DOI: 10.1088/1757-899X/82/1/012101  
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/82/1/012101>
- [19] Mertinger V., Nagy E., Tranta F., Solyom J. Strain-induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels. *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, vol. 481–482, pp. 718–722. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.165  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509307012221>
- [20] Sayers C. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. *Appl. Phys.*, 1982, vol. 15, no. 11, pp. 2157–2167. DOI: 10.1088/0022-3727/15/11/011  
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/15/11/011>
- [21] Allen D., Sayers C. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. *Ultrasonics*, 1984, vol. 22, no. 4, pp. 179–188. DOI: 10.1016/0041-624X(84)90034-9  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X84900349>
- [22] Truell R., Elbaum C., Chick B.B. *Ultrasonic methods in solid state*. Academic press, 1969. 464 p.
- [23] Kurashkin K.V., Mishakin V.V. Evaluation of residual stresses using ultrasound. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials], 2013, no. 4, pp. 54–58 (in Russ.).
- [24] Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Danilova N.V. The joint weld destruction study after static loading by acoustic method. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2009, no. 7, pp. 27–30 (in Russ.).
- [25] Gol'dshteyn M.I., Litvinov V.S., Bronfin B.M. *Metallofizika vysokoprochnykh splavov* [Metallophysics of high-tensile alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 312 p.

**Klyushnikov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

**Mishakin V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Head of Laboratory of Nondestructive Testing and Diagnostics of Materials and Structures, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (Belinskogo ul. 85, Nizhny Novgorod, 603024 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. Investigating the Effect of Plastic Deformation on Acoustic and Magnetic Properties of Austenitic and Duplex Steel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 2, pp. 102–113 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-102-113