

Received: 15.10.2022

Revised: 25.11.2022

Accepted: 23.12.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.095-106

EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON THE PHASE COMPOSITION AND ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE 321N AUSTENITIC STEEL (08Kh18N10T)

L. S. Goruleva^{a), *}, S. M. Zadvorkin^{b)}, and A. N. Mushnikov^{c)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  sherlarisa@yandex.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;

c)  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: sherlarisa@yandex.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (343) 362 3029

The changes in the phase composition and electromagnetic properties of the 321N chromium-nickel austenitic steel under plastic deformation by uniaxial tension are studied. As strain increases from 0 to 0.37, the content of ferromagnetic α' -martensite in the steel increases monotonically to 60%. The electrical resistivity and the initial magnetic permeability increase monotonically by factors of 1,25 and 18, respectively. To monitor the strain state and the content of α' -martensite in products made of the 321N steel, it is preferable to use initial magnetic permeability rather than electrical resistance. The skin layer thickness of the deformed 321N steel for frequencies from 5 to 1000 kHz is calculated from the experimental values of initial magnetic permeability and electrical resistivity. Eddy current diagnostics of the state of the surface of products made of this steel, hardened by surface plastic deformation, is proposed to be performed at frequencies ranging between 100 and 200 kHz.

Keywords: metastable austenitic steels, uniaxial tension, phase composition, skin layer thickness, eddy current method.

Acknowledgment

The work was performed under state assignment No. AAAA-A18-118020790148-1. The study used the equipment of the Plastometriya shared research facilities.

We appreciate the assistance of R. A. Savrai, P. A. Skorynina, and I. A. Zabolotskikh, members of the laboratory of construction materials science, IES UB RAS, for providing us with test specimens.

References

1. Filippov M.A., Litvinov V.S., Nemirovskiy Yu.R. *Stali s metastabilnym austenitom* [Steels with metastable austenite]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 255 p. (In Russian).
2. Borgioli F. From austenitic stainless steel to expanded austenite-S phase: formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase. *Metals*, 2020, vol. 10, iss. 2, No. 187, pp. 1–46. DOI: 10.3390/met10020187.

3. Basak S., Sharma S.K., Mondal M., Sahu K.K., Gollapudi S., Majumdar J.D., Hong S.T. Electron beam surface treatment of 316L austenitic stainless steel: improvements in hardness, wear, and corrosion resistance. *Metals and Materials International*, 2020, vol. 27, iss. 5, pp. 953–961. DOI: 10.1007/s12540-020-00773-y.
4. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering R-Reports*, 2009, vol. 65, iss. 4–6, pp. 39–104. DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
5. Savrai R.A., Makarov A.V., Malygina I.Yu., Rogovaya S.A., Osintseva A.L. Improving the Strength of the Aisi 321 Austenitic Stainless Steel by Frictional Treatment. *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 5, pp. 43–62. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.043-062.
6. Makarov A.V., Skorynina P.A., Osintseva A. L., Yurovskikh A.S., Savrai R. A. Improving the tribological properties of austenitic 12KH18N10T steel by nanostructuring frictional treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2015, No. 4 (69), pp. 80–92. DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92. (In Russian).
7. Khaksaran A., Taghiabadi R., Jafarzadegan M. Tribological properties of surface friction hardened AISI 316L steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74 (8), pp. 1979–1989. DOI: 10.1007/s12666-021-02306-6.
8. Makarov A.V., Skorynina P.A., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. Effect of the conditions of the nanostructuring frictional treatment process on the structural and phase states and the strengthening of metastable austenitic steel. *The Physics of Metals and Metallography*, 2017, vol. 118, No. 12, pp. 1225–1235. DOI: 10.1134/S0031918X17120092.
9. Takaki S., Fukunaga K., Syarif J., Tsuchiyama T. Effect of Grain Refinement on Thermal Stability of Metastable Austenitic Steel. *Mater. Trans.*, 2004, 45 (7), pp. 2245–2251. DOI: 10.2320/matertrans.45.2245.
10. Wu Y., Guelorget B., Sun Z., Déturche R., Retraint D. Characterization of gradient properties generated by SMAT for a biomedical grade 316L stainless steel. *Materials Characterization*, 2019, vol. 155, pp. 109788. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109788.
11. Makarov A.V., Savray R.A., Skorynina P.A., Volkova E.G. Development of Methods for Steel Surface Deformation Nanostructuring. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, vol. 62, pp. 61–69. DOI: 10.1007/s11041-020-00529-w.
12. Savrai R.A., Kolobylin Y.M., Volkova E.G. Micromechanical characteristics of the surface layer of metastable austenitic steel after frictional treatment. *The Physics of Metals and Metallography*, 2021, vol. 122, No. 8, pp. 800–806. DOI: 10.1134/S0031918X21080123.
13. Savrai R.A., Kogan L.K. Effect of Hardening Frictional Treatment on Features of Eddy Current Testing of Fatigue Degradation of Metastable Austenitic Steel under Gigacycle Contact Fatigue Loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, vol. 58, pp. 722–731. DOI: 10.1134/S1061830922080095.
14. Silva V.M.A., Camerini C.G., Pardal J.M., De Blas J.G., Pereira G.R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, vol. 7, iss. 3, pp. 395–401. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
15. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, vol. 21, iss. 8, pp. 1772–1776. DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.
16. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mitropolskaya S.Yu., Vichuzhanin D.I., Solov'ev K.E. Change in magnetic properties of metastable austenitic steel due to elastoplastic deformation. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, vol. 51, pp. 423–428. DOI: 10.1007/S11041-010-9185-X.
17. Mirkin L.I. *Rentgenostrukturnyj kontrol mashinostroitelnykh materialov: spravochnik* [X-ray structural control of machine-building materials]. Moscow, MGU Publ., 1976, 134 p. (In Russian).

18. Dorofeev A.L., Kazamanov Yu.G., Cherenkova Z.V. *Metod vikhrevykh tokov (induktsionnaya strukturoskopiya, defektoskopiya i tolshchinometriya)* [Eddy current method (induction structroscopy, non-destructive testing and thickness measurement)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 89 p. (In Russian).
19. Bobrov A.L., Vlasov K.V., Bekher S.A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushaiushchego kontrolya: uchebnoe posobie* [Principles of eddy current non-destructive testing: textbook]. Novosibirsk, Izd-vo SGUPS Publ., 2019. 98 p. (In Russian).
20. Vychuzhanin D.I., Makarov A.V., Smirnov S.V., Pozdeeva N.A., Malygina I.Y. Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, vol. 40, No. 6, p. 554–560. DOI: 10.3103/S1052618811050190.
21. Savrai R.A., Osintseva A.L. Effect of hardened surface layer obtained by frictional treatment on the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 802, pp. 140679. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140679.

Подана в журнал: 15.10.2022

УДК 669.14:621.787.4

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.095-106

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ МАРКИ 321Н (08Х18Н10Т)

Л. С. Горюлева^{а),*}, С. М. Задворкин^{б)}, А. Н. Мушников^{в)}

Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0001-8635-5213>  sherlarisa@yandex.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>  zadvorkin@imach.uran.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0001-7073-6476>  mushnikov@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: sherlarisa@yandex.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 362–30–29

Изучены закономерности изменения фазового состава и электромагнитных свойств хромоникелевой аустенитной стали марки 321Н при пластической деформации одноосным растяжением. Установлено, что с ростом степени деформации от 0 до 0,37 содержание ферромагнитного α' -мартенсита в исследованной стали монотонно возрастает до 60 %, при этом удельное электросопротивление и начальная магнитная проницаемость монотонно увеличиваются в 1,25 и 18 раз, соответственно. Сделан вывод о предпочтительном использовании начальной магнитной проницаемости, нежели электросопротивления, для контроля деформированного состояния изделий из стали 321Н и содержания в них α' -мартенсита. По экспериментальным значениям начальной магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления рассчитана толщина скин-слоя деформированной стали 321Н для частот от 5 до 1000 кГц. Предложено вихретоковую диагностику состояния поверхности изделий из этих сталей, упрочненных с помощью поверхностной пластической деформации, проводить на частотах 100...200 кГц.

Ключевые слова: аустенитные метастабильные стали, одноосное растяжение, фазовый состав, толщина скин-слоя, вихретоковый метод.

1. Введение

Аустенитные хромоникелевые стали находят широкое применение в промышленности вследствие высокой коррозионной стойкости, однако для этих сталей характерен низкий уровень прочностных свойств [1–4]. Известно, что эффективным методом упрочнения и повышения износостойкости аустенитных сталей является поверхностная пластическая деформация (ППД) [5–9]. ППД хромоникелевых сталей с метастабильной аустенитной структурой сопровождается образованием упрочняющей ферромагнитной фазы – α' -мартенсита деформации, что с одной стороны приводит к повышению уровня прочностных свойств изделия, а с другой стороны снижает коррозионную стойкость стали вследствие межкристаллитной коррозии [1, 10–12].

Для диагностики состояния поверхности упрочненных с помощью ППД стальных изделий широкое применение находит вихретоковый метод [13–15]. Зачастую при этом не учитывается изменение степени деформации с глубиной и, в случае изделий из метастабильных аустенитных сталей, неравномерное распределение α' -мартенсита в металле. Данное обстоятельство может негативно сказаться на точности вихретоковой оценки толщины деформиро-

ванного слоя, а также содержания в нем α' -мартенсита. Для повышения достоверности такой оценки необходимо определить зависимости параметров, определяющих показания вихретоковых приборов, а именно начальной магнитной проницаемости и удельного электросопротивления, а также содержания α' -мартенсита от степени пластической деформации метастабильных аустенитных сталей. Причем исследования необходимо проводить на образцах с однородным распределением деформации по объему. Такое деформированное состояние может обеспечиваться только одноосным растяжением (или сжатием) образцов и только до стадии локализации деформации.

В [16] подробно исследовалось влияние упругопластической деформации одноосным растяжением на фазовый состав и некоторые магнитные характеристики широко распространенной метастабильной аустенитной стали 12X18H10T. Однако основной задачей авторы [16] ставили обоснование магнитной диагностики напряженно-деформированного состояния изделий из аустенитной стали, но они не изучали эволюцию электромагнитных свойств, влияющих на эффективность вихретокового контроля.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей изменения фазового состава и электромагнитных свойств хромоникелевой аустенитной стали марки 321Н по американскому стандарту ASTM A240/A240M (русский аналог этой стали – сталь 08X18H10T) при пластической деформации одноосным растяжением.

2. Образцы и методика исследований

Химический состав исследованной стали, определенный с помощью спектрометра Spectromaxx, приведен в таблице.

Химический состав исследованной стали марки 321Н, масс. %

Элемент	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Cu	Mo	P	S	Fe
Содержание	0,04	16,77	8,44	1,15	0,67	0,32	0,31	0,26	0,04	0,005	Основа

Эксперименты проводили на плоских разрывных образцах с головками. Длина рабочей части образцов составила 45 мм, а сечение рабочей части – 16×4 мм. Механические испытания на растяжение были проведены на универсальной испытательной машине Tinius Olsen SuperL60 в соответствии с ГОСТ 1497-84. По результатам предварительных испытаний одного из образцов определены основные механические характеристики материала: условный предел текучести – 195 МПа, временное сопротивление разрыву – 615 МПа, относительное удлинение после разрыва – 60 %.

На рис. 1 приведена диаграмма «напряжение – степень деформации» исследованной стали 321Н. Степень деформации ε рассчитывали по формуле

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}, \quad (1)$$

где l и l_0 – текущая и начальная длины рабочей части образца, соответственно. Точки на рис. 1 соответствуют деформациям, при достижении которых растяжение образцов останавливали и определяли их фазовый состав и электромагнитные характеристики. После этих измерений процесс деформирования возобновляли до достижения следующей величины степени деформации. Таким образом, для одного и того же образца получили набор напряженно-деформированных состояний со степенями пластической деформации $\varepsilon = 0; 0,006; 0,05; 0,09; 0,14; 0,18; 0,22; 0,26; 0,30; 0,33; 0,37$. При этом максимальная степень деформации заведомо меньше, чем деформации, соответствующие нисходящей ветви диаграммы «напряжение – деформация», то есть стадии локализации деформации.

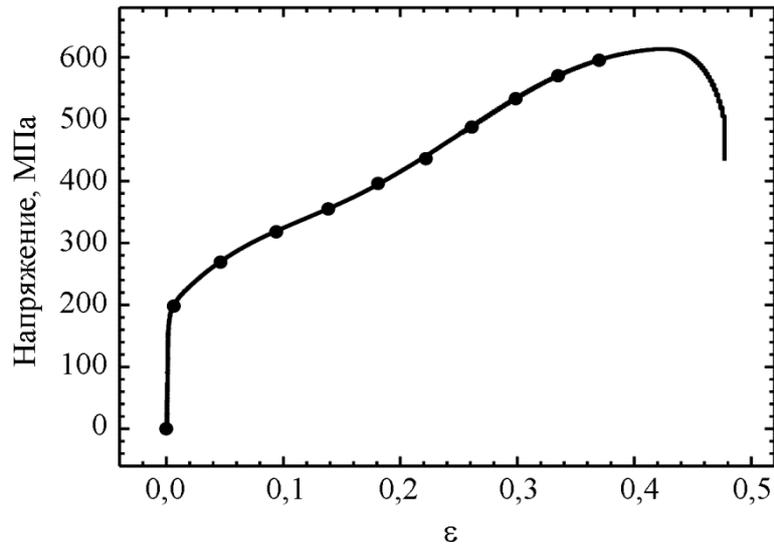


Рис. 1. Диаграмма «напряжение – степень деформации» стали 321Н

Рентгеноструктурные исследования проводили с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с использованием монохроматизированного $K\alpha$ -излучения хромового анода. Фазовый состав определяли методом гомологических пар [17].

Начальную магнитную проницаемость определяли по начальной кривой намагничивания, полученной на магнитоизмерительном комплексе Remagraph С-500, который реализует измерения в замкнутой магнитной цепи по схеме пермеметра. Магнитное поле прикладывалось вдоль длинной оси образца.

Электросопротивление определяли по четырехпроводной схеме с помощью микроомметра БСЗ-010-2, а затем рассчитывали удельное электросопротивление ρ образца, учитывая, что в процессе растяжения площадь поперечного сечения образца уменьшалась с 64 до 46 мм². Расстояние между потенциальными электродами составляло 22 мм.

Амплитуду A и фазовый угол φ вихретокового сигнала определяли с помощью серийно выпускаемого универсального вихретокового дефектоскопа «Вектор», оснащенного дифференциальным преобразователем ВТ-4.03. Параметры вихретокового сигнала определяли как среднее арифметическое по пяти измерениям на частотах 5, 10, 50, 100, 500 и 1000 кГц. Используя варьирование частоты, изменяли толщину анализируемого слоя (то есть толщину скин-слоя), которую рассчитывали по формуле [18, 19]

$$\delta \cong 0,503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_{нач} f}}, \quad (2)$$

где δ – толщина скин-слоя, мм; ρ – удельное электросопротивление, мкОм×мм; $\mu_{нач}$ – относительная начальная магнитная проницаемость; f – частота, кГц.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость содержания мартенсита деформации, определенного методами рентгеноструктурного анализа, от степени деформации при одноосном растяжении образца аустенитной стали 321Н. С ростом степени деформации до 0,37 содержание мартенсита деформации в структуре стали монотонно увеличивается до 60 %. Эти результаты согласуются с приведенными в [16] данными для близкой по составу стали марки 12X18Н10Т.

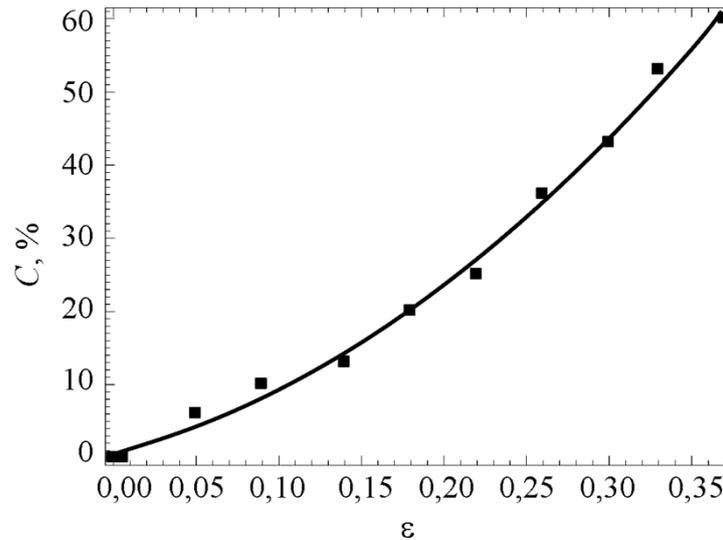


Рис. 2. Зависимость содержания α' -мартенсита (C) в стали 321Н от степени пластической деформации одноосным растяжением. Точки – эксперимент; линия – расчет по формуле (3)

Зависимость содержания α' -фазы (C) от степени пластической деформации описывается полиномом 2-й степени с коэффициентом корреляции более 0,99:

$$\tilde{N} = 0,63 + 51,64\varepsilon + 285,61\varepsilon^2. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены зависимости $\mu_{нач}$ и ρ от степени пластической деформации и содержания α' -фазы. Как видно, с ростом степени деформации от 0 до 0,37 начальная магнитная проницаемость монотонно увеличивается более чем в 18 раз по отношению к исходному уровню (до деформации), в то время как удельное электросопротивление увеличивается меньше, чем в 1,25 раза. Зависимости $\mu_{нач}(\varepsilon)$, $\rho(\varepsilon)$, $\mu_{нач}(C)$ и $\rho(C)$ описываются полиномиальными уравнениями регрессии

$$\begin{aligned} \mu_{i\dot{a}\dot{z}}(\varepsilon) &= 1,08 + 4,833\varepsilon - 77,49\varepsilon^2 + 526,69\varepsilon^3; \\ \rho(\varepsilon) &= 733 - 106,69\varepsilon + 1524,80\varepsilon^2; \\ \mu_{i\dot{a}\dot{z}}(\tilde{N}) &= 1,08 - 0,05\tilde{N} + 0,006\tilde{N}^2; \\ \rho(\tilde{N}) &= 733 + 0,41\tilde{N} + 0,07\tilde{N}^2 - 0,0005\tilde{N}^3 \end{aligned} \quad (4)$$

с коэффициентами корреляции более 0,99. Однозначность этих зависимостей свидетельствует о возможности использования данных параметров для контроля степени пластической деформации стали 321Н и, соответственно, количества образовавшейся при этом α' -фазы. При этом предпочтительным является контроль по начальной магнитной проницаемости, которая значительно интенсивнее реагирует на изменение ε и C , нежели электросопротивление. Очевидно, что изменение начальной магнитной проницаемости оказывает большее влияние также на величину толщины скин-слоя и такие параметры вихретокового сигнала, как амплитуда и фазовый угол.

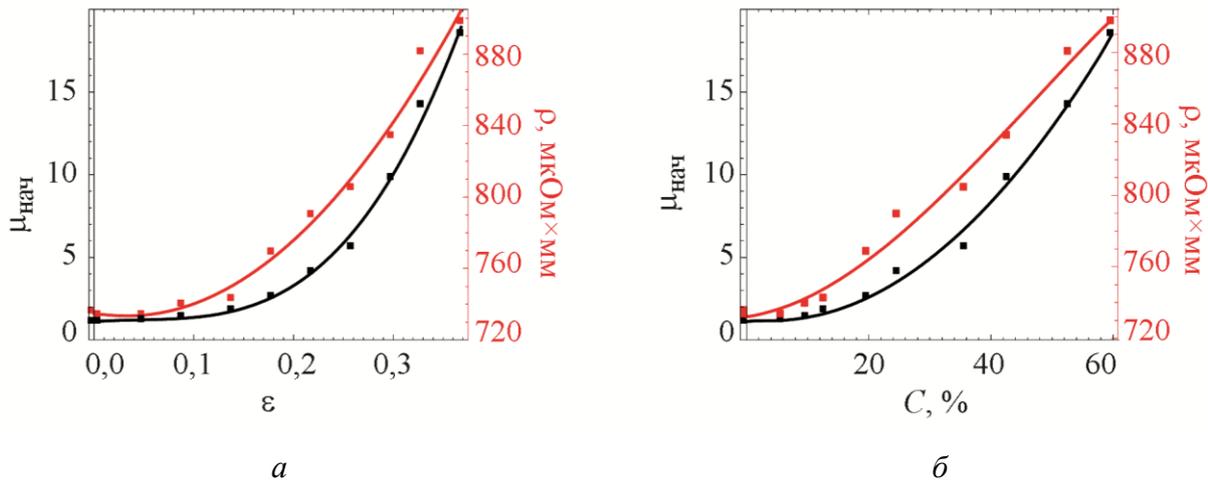


Рис. 3. Зависимости относительной начальной магнитной проницаемости и удельного электросопротивления стали 321Н от степени пластической деформации (а) и содержания α' -мартенсита (б). Точки – эксперимент; линии – аппроксимация по формулам (4)

Используя полученные значения начальной магнитной проницаемости и удельного электросопротивления стали 321Н, по формуле (2) рассчитали толщину скин-слоя в этой стали при разной степени ее пластической деформации растяжением и при варьировании частоты электромагнитного поля. Полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно, при увеличении степени деформации от 0 до 0,37 толщина скин-слоя уменьшается примерно в 4 раза при любой фиксированной частоте электромагнитного поля. При этом увеличение частоты в 200 раз, от 5 до 1000 кГц, вызывает уменьшение толщины скин-слоя примерно в 14 раз.

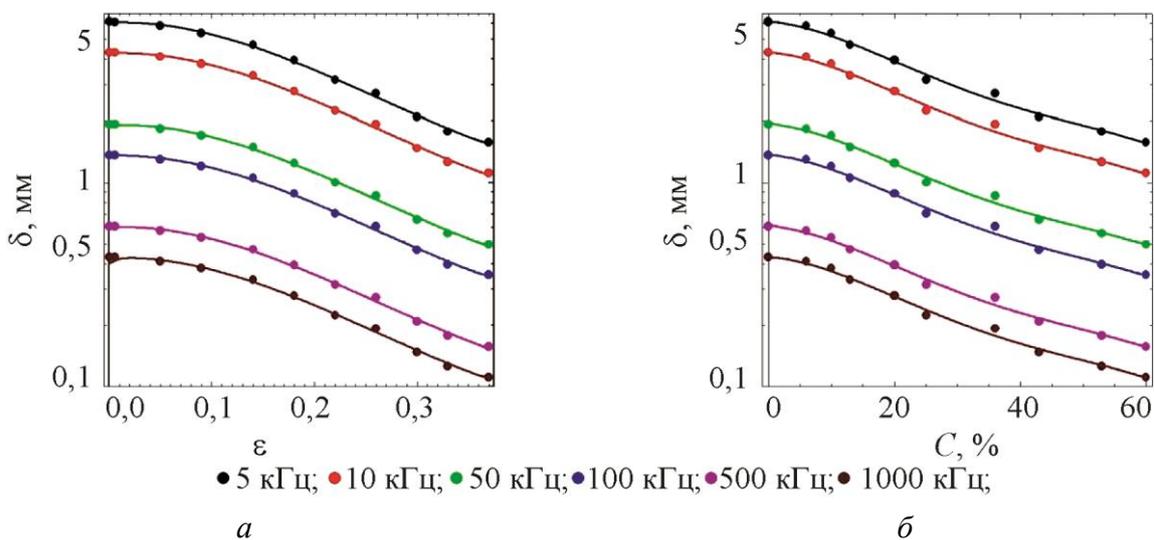


Рис. 4. Изменение толщины скин-слоя δ в стали 321Н с ростом степени пластической деформации (а) и содержания α' -мартенсита (б) при различных частотах электромагнитного поля. Точки – расчет δ по экспериментальным значениям $\mu_{нач}$ и ρ по формуле (2); линии – аппроксимация по формулам (5)

Зависимости толщины скин-слоя в стали 321Н от степени пластической деформации и содержания α' -мартенсита можно аппроксимировать полиномами 3-й и 4-й степеней с коэффициентами корреляции более 0,99:

для $f = 5$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 6,1 - 1,74\varepsilon - 83,14\varepsilon^2 + 148,0\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 6,1 - 0,04\tilde{N} - 0,007\tilde{N}^2 + 1,91 \times 10^{-4}\tilde{N}^3 - 1,52 \times 10^{-6}\tilde{N}^4;$$

для $f = 10$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 4,3 - 1,23\varepsilon - 58,79\varepsilon^2 + 104,65\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 4,3 - 0,03\tilde{N} - 0,005\tilde{N}^2 + 1,35 \times 10^{-4}\tilde{N}^3 - 1,07 \times 10^{-6}\tilde{N}^4;$$

для $f = 50$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 1,9 - 0,55\varepsilon - 26,29\varepsilon^2 + 46,80\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 1,9 - 0,01\tilde{N} - 0,002\tilde{N}^2 + 6,05 \times 10^{-5}\tilde{N}^3 - 4,80 \times 10^{-7}\tilde{N}^4;$$

для $f = 100$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 1,4 - 0,39\varepsilon - 18,59\varepsilon^2 + 33,09\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 1,4 - 0,009\tilde{N} - 0,0015\tilde{N}^2 + 4,28 \times 10^{-5}\tilde{N}^3 - 3,39 \times 10^{-7}\tilde{N}^4;$$

для $f = 500$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 0,6 - 0,17\varepsilon - 8,31\varepsilon^2 + 14,80\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 0,6 - 0,004\tilde{N} - 6,61 \times 10^{-4}\tilde{N}^2 + 1,91 \times 10^{-5}\tilde{N}^3 - 1,52 \times 10^{-7}\tilde{N}^4;$$

для $f = 1000$ кГц

$$\delta(\varepsilon) = 0,4 - 0,12\varepsilon - 5,88\varepsilon^2 + 10,46\varepsilon^3,$$

$$\delta(\tilde{N}) = 0,4 - 0,003\tilde{N} - 4,67 \times 10^{-4}\tilde{N}^2 + 1,35 \times 10^{-5}\tilde{N}^3 - 1,07 \times 10^{-7}\tilde{N}^4.$$

(5)

Из рис. 4 следует, что вихретоковую диагностику состояния поверхности упрочненных с помощью ППД изделий из стали 321Н целесообразно проводить на частотах выше 100 кГц, поскольку ППД приводит к изменению структуры и свойств поверхностного слоя толщиной примерно до 1 мм [5–6; 20–21]. При этом необходимо учесть, что с ростом частоты уменьшается амплитуда вихретокового сигнала, как это показано на рис. 5, где представлены зависимости амплитуды A фазового угла φ вихретокового сигнала от степени деформации стали 321Н при различных частотах возбуждения вихревых токов. Кроме того, на показания вихретокового прибора с повышением частоты все сильнее начинает влиять шероховатость поверхности объекта контроля.

Однозначность зависимостей амплитуды и фазового угла вихретокового сигнала от степени деформации стали 321Н, соответственно и от содержания в ней α' -фазы, обуславливает применимость вихретокового контроля для диагностики деформированного состояния и фазового состава этой стали. При этом фазовый угол демонстрирует достаточно высокую чувствительность к изменению степени пластической деформации в диапазоне ε от 0 до $\approx 0,1$, а при дальнейшем увеличении ε практически не изменяется. В то же время амплитуда вихретокового сигнала наиболее интенсивно возрастает при увеличении степени деформации ε в интервале от 0,1 до 0,37, а при $\varepsilon \leq 0,1$ изменяется очень мало, особенно на частотах 500 и 1000 кГц. Таким образом, при оценке степени пластической деформации стали 321Н в диапазоне до $\approx 0,1$ предпочтительней использовать фазовый угол, а при степени деформации выше 0,1 – амплитуду вихретокового сигнала.

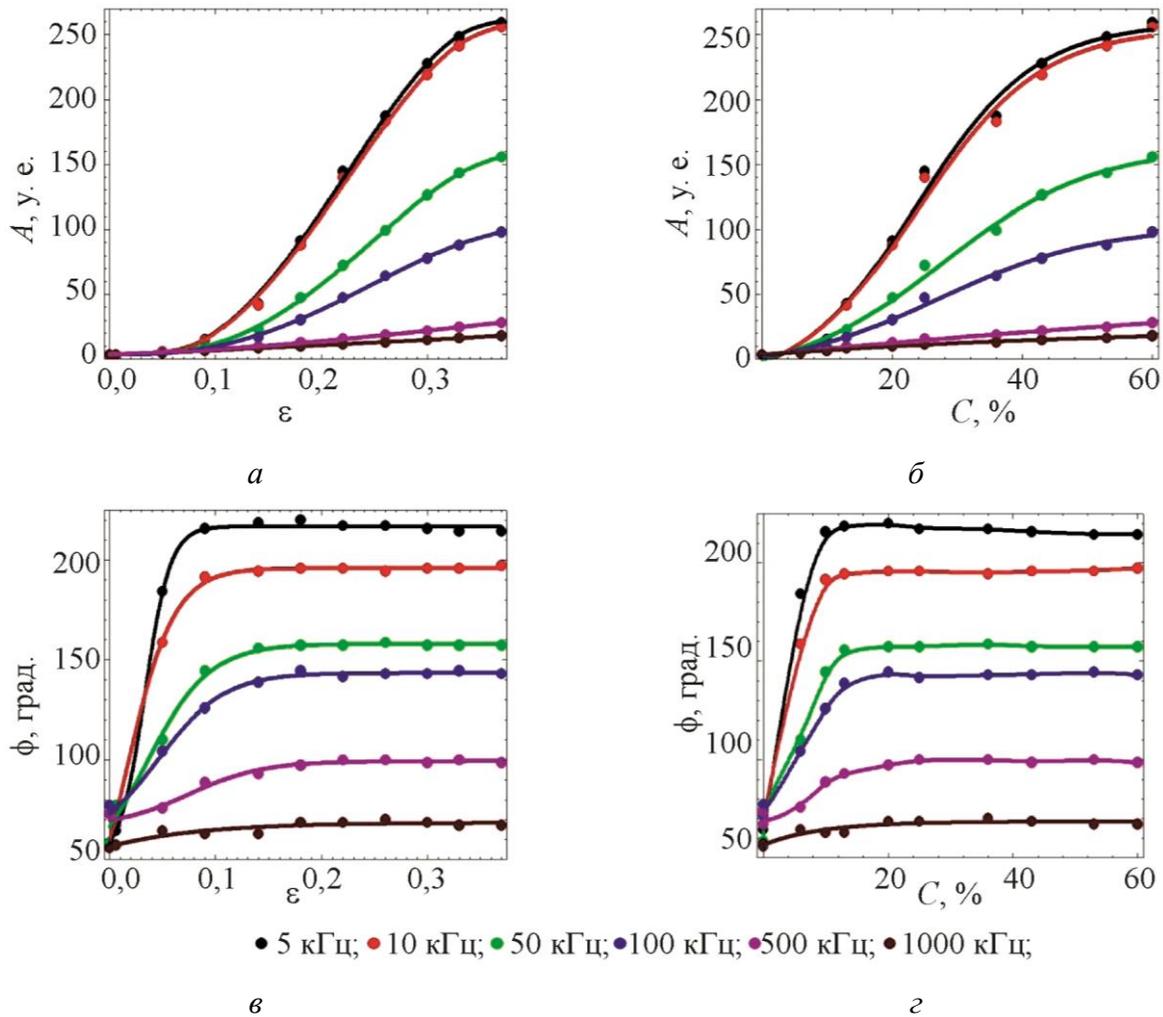


Рис. 5. Зависимости амплитуды A ($a, б$) и фазового угла ϕ ($в, з$) вихретокового сигнала стали 321Н от степени деформации ($a, в$) и содержания α' -мартенсита ($б, з$) при различных частотах возбуждения электромагнитного поля

Из приведенных на рис. 5 данных следует также нецелесообразность использования вихретокового контроля на частотах возбуждения выше примерно 200 кГц ввиду сравнительно малой амплитуды сигнала и незначительного влияния степени пластической деформации (и, соответственно, содержания α' -мартенсита) на величину фазового угла.

4. Заключение

Изучено влияние пластической деформации одноосным растяжением ϵ на фазовый состав, начальную магнитную проницаемость $\mu_{нач}$ и удельное электросопротивление ρ хромоникелевой коррозионностойкой стали 321Н с метастабильной структурой.

Показано, что с увеличением ϵ от 0 до 0,37 содержание ферромагнитного α' -мартенсита (C) в исследованной стали монотонно возрастает до 60%, зависимость $C(\epsilon)$ аппроксимируется полиномом 2-й степени с коэффициентом корреляции больше 0,99.

Установлено, что с ростом степени деформации удельное электросопротивление и начальная магнитная проницаемость стали 321Н монотонно увеличиваются. Причем с ростом ϵ от 0 до 0,37 (и соответствующим увеличением C) $\mu_{нач}$ увеличивается в 18 раз, а ρ – в 1,25 раза. На основании этого сделан вывод о предпочтительном использовании начальной магнитной проницаемости, нежели электросопротивления, для контроля деформированного состояния изделий из стали 321Н и содержания в них α' -мартенсита.

При вихретоковом контроле пластической деформации в качестве параметра контроля предпочтительней использовать амплитуду вихретокового сигнала при степени деформации выше 0,1, а при меньших значениях ϵ – фазовый угол вихретокового сигнала.

По экспериментальным значениям $\mu_{\text{нач}}$ и ρ рассчитана толщина скин-слоя деформированной стали 321Н для частот от 5 до 1000 кГц. На частоте 5 кГц с увеличением степени деформации от 0 до 0,37 толщина скин-слоя уменьшается с 6 до 1,5 мм, на частоте 100 кГц – с 1,4 до 0,4 мм, а на частоте 1000 кГц – с 0,4 до 0,1 мм. На основании этого предложено вихретоковую диагностику состояния поверхности изделий из стали 321Н, упрочненных с помощью поверхностной пластической деформации, проводить на частотах 100...200 кГц. На меньших частотах на результатах контроля будет сказываться влияние более глубоких, недеформированных слоев металла, а на больших – значительное уменьшение амплитуды вихретокового сигнала с увеличением частоты.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания, № государственной регистрации АААА-А18-118020790148-1. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории конструкционного материаловедения Савраю Р.А., Скорыниной П.А. и Заболотских И.А. за предоставление образцов для исследований.

Литература

1. Филиппов М. А., Литвинов В. С., Немировский Ю. Р. Стали с метастабильным аустенитом. – М. : Металлургия, 1988. – 255 с.
2. Borgioli F. From austenitic stainless steel to expanded austenite-S phase: formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, iss. 2, No. 187. – P. 1–46. – DOI: 10.3390/met10020187.
3. Electron beam surface treatment of 316L austenitic stainless steel: improvements in hardness, wear, and corrosion resistance / S. Basak, S. K. Sharma, M. Mondal, K. K. Sahu, S. Gollapudi, J. D. Majumdar, S. T. Hong // *Metals and Materials International*. – 2020. – Vol. 27, iss. 5. – P. 953–961. – DOI: 10.1007/s12540-020-00773-y.
4. Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. Recent developments in stainless steels // *Materials Science and Engineering R-Reports*. – 2009. – Vol. 65, iss. 4–6. – P. 39–104. – DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001.
5. Improving the Strength of the Aisi 321 Austenitic Stainless Steel by Frictional Treatment / R. A. Savrai, A. V. Makarov, I. Yu. Malygina, S. A. Rogovaya, A. L. Osintseva // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Iss. 5. – P. 43–62. – DOI: 10.17804/2410-9908.2017.5.043-062.
6. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева, А. С. Юровских, Р. А. Саврай // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 80–92. – DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-80-92.
7. Khaksaran A., Taghiabadi R., Jafarzadegan M. Tribological properties of surface friction hardened AISI 316L steel // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2021. – 74 (8). – P. 1979–1989. – DOI: 10.1007/s12666-021-02306-6.
8. Effect of the conditions of the nanostructuring frictional treatment process on the structural and phase states and the strengthening of metastable austenitic steel / A.V. Makarov, P. A. Skorynina, A. S. Yurovskikh, A. L. Osintseva // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2017. – Vol. 118, No. 12. – P. 1225–1235. – DOI: 10.1134/S0031918X17120092.

9. Effect of Grain Refinement on Thermal Stability of Metastable Austenitic Steel / S. Takaki, K. Fukunaga, J. Syarif, T. Tsuchiyama // *Mater. Trans.* – 2004. – 45 (7). – P. 2245–2251. – DOI: 10.2320/matertrans.45.2245.
10. Characterization of gradient properties generated by SMAT for a biomedical grade 316L stainless steel / Y. Wu, B. Guelorget, Z. Sun, R. Déturche, D. Reirant // *Materials Characterization.* – 2019. – Vol. 155. – P. 109788. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109788.
11. Development of Methods for Steel Surface Deformation Nanostructuring / A. V. Makarov, R. A. Savray, P. A. Skorynina, E. G. Volkov // *Metal Science and Heat Treatment.* – 2020. – Vol. 62. – P. 61–69. – DOI: 10.1007/s11041-020-00529-w.
12. Savrai R. A., Kolobylin Y. M., Volkova E. G. Micromechanical characteristics of the surface layer of metastable austenitic steel after frictional treatment // *The Physics of Metals and Metallography.* – 2021. – Vol. 122, No. 8. – P. 800–806. – DOI: 10.1134/S0031918X21080123.
13. Savrai R. A., Kogan L. K. Effect of Hardening Frictional Treatment on Features of Eddy Current Testing of Fatigue Degradation of Metastable Austenitic Steel under Gigacycle Contact Fatigue Loading // *Russian Journal of Nondestructive Testing.* – 2022. – Vol. 58. – P. 722–731. – DOI: 10.1134/S1061830922080095.
14. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel / V. M. A. Silva, C. G. Camerini, J. M. Pardal, J. G. de Blas, G. R. Pereira // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2018. – Vol. 7, iss. 3. – P. 395–401. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
15. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy current assessment of the cold rolled deformation behavior of AISI stainless steel // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2012. – Vol. 21, iss. 8. – P. 1772–1776. – DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.
16. Change in magnetic properties of metastable austenitic steel due to elastoplastic deformation / E. S. Gorkunov, S. M. Zadvorkin, S. Yu. Mitropolskaya, D. I. Vichuzhanin, K.E. Solov'ev // *Metal Science and Heat Treatment.* – 2009. – Vol. 51. – P. 423–428. – DOI: 10.1007/S11041-010-9185-X.
17. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов : справочник. – М. : Изд-во МГУ, 1976. – 140 с.
18. Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г., Черенкова З. В. Метод вихревых токов (индукционная структуроскопия, дефектоскопия и толщинометрия). – М. : Машиностроение, 1969. – 89 с.
19. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2019. – 98 с.
20. Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter / D. I. Vychuzhanin, A. V. Makarov, S. V. Smirnov, N. A. Pozdeeva, I. Y. Malygina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* – 2011. – Vol. 40, No. 6. – P. 554–560. – DOI: 10.3103/S1052618811050190.
21. Savrai R. A., Osintseva A. L. Effect of hardened surface layer obtained by frictional treatment on the contact endurance of the AISI 321 stainless steel under contact gigacycle fatigue tests // *Materials Science and Engineering: A.* – 2021. – Vol. 802. – P. 140679. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.140679.