



УДК 669:539.381.296

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-162-167

Оригинальная статья
Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

С. А. Баранникова[✉], М. В. Надежкин, П. В. Исакова

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ bsa@ispms.ru

Аннотация. В работе исследованы зависимости между скоростью распространения ультразвука и механическими характеристиками в процессе одноосного растяжения аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T, обладающей уникальным комплексом физико-механических свойств, включая высокие показатели прочности, пластичности, ударной вязкости и хладостойкости. Данный комплекс физико-механических свойств обеспечивается благодаря действию различных механизмов пластической деформации (дислокационное скольжение/двойникование, образование дефектов упаковки, мартенситное превращение). Следует отметить, что оценка изменения механических характеристик металлов (особенно при низких температурах) является весьма трудоемкой задачей и требует применения неразрушающих методов контроля. Экспериментальные результаты были получены с помощью стенда, предназначенного для синхронизированного с записью диаграммы напряжение – деформация определения скорости распространения ультразвука и коэффициента затухания ультразвуковой волны как функций деформации. Процедура измерения скорости распространения ультразвука заключается в фиксации времени прохождения ультразвукового рэлеевского импульса между передающим и приемным преобразователями. Затухание ультразвуковой волны вычисляется по изменению формы этого импульса. Импульсы возбуждаются пьезоэлектрическим преобразователем на частоте 5 МГц. Исследовано изменение акустических характеристик в условиях статического нагружения и рассчитаны критические параметры перехода материала в деструктивное состояние. Скорость распространения рэлеевских ультразвуковых волн непосредственно в ходе нагружения материала является информативным признаком для анализа природы процессов, контролирующей пластичность. Обнаружено влияние температуры испытаний на акустические и механические характеристики стали. Исследуемый температурный интервал $180\text{ K} \leq T \leq 318\text{ K}$ выбран с учетом возможности реализации в стали прямого $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситного превращения при растяжении.

Ключевые слова: прочность, пластическая деформация, разрушение, скорость ультразвука, нержавеющие стали

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-29-01608, <https://rscf.ru/project/22-29-01608/>.

Для цитирования: Баранникова С.А., Надежкин М.В., Исакова П.В. Исследование механических и акустических свойств деформируемых сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):162–167. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-162-167>

MECHANICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF DEFORMABLE ALLOYS

S. A. Barannikova[✉], M. V. Nadezhkin, P. V. Iskhakova

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
(2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ bsa@ispms.ru

Abstract. The paper is devoted to the correlation dependences of ultrasound velocity with characteristics of strength and plasticity in uniaxial tension of Fe18Cr10Ni austenitic stainless steel with a unique set of physical and mechanical properties. Such a successful set of mechanical properties is provided by dislocation slip and twinning, the formation of stacking faults, and martensitic transformation. It should be noted that the assessment of changes in the mechanical characteristics of metals (especially at low temperatures) is a very laborious task and requires the use of non-destructive control methods. Experimental data were obtained using a bench designed to synchronize with recording of the "stress-strain" diagram for determining the values of ultrasound velocity propagation and the attenuation coefficient of the ultrasonic wave as a function of deformation. Measurement of ultrasound velocity propagation was reduced to determining the time of passage of an ultrasonic Rayleigh pulse between the transmitting and receiving transducers. The attenuation was determined from the change in pulse shape. The pulses were excited by a piezoelectric transducer at a frequency of 5 MHz. The authors experimentally studied the static loading effect on acoustic characteristics and calculated the destruction

parameters. The propagation ultrasound velocity in a deformable material is an informative feature for analyzing the nature of the processes that control plasticity. The effect of test temperature in the range $180\text{ K} \leq T \leq 320\text{ K}$ on the acoustic and mechanical characteristics of the steel was studied to ensure control of its structural state and mechanical properties by means of non-destructive testing. The temperature range was chosen taking into account the possibility of direct $\gamma \rightarrow \alpha'$ martensitic transformation.

Keywords: strength, plastic deformation, failure, ultrasound velocity, stainless steel

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-01608, <https://rscf.ru/project/22-29-01608/>).

For citation: Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Iskhakova P.V. Mechanical and acoustic properties of deformable alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):162–167. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-162-167>

ВВЕДЕНИЕ

На уровень безопасности ответственных объектов в атомной энергетике, авиационной, судостроительной, нефтегазовой и других отраслях промышленности огромное влияние оказывает эффект истощения ресурса конструктивных элементов оборудования в процессе эксплуатации конструкционных материалов. Поэтому возникает необходимость предсказания критического состояния материала, контроля его физико-механических свойств до появления нарушений сплошности, а также реального технического состояния ответственных конструктивных элементов с применением методов неразрушающего контроля. К перспективным методам оценки характеристик металлов относят метод ультразвукового контроля состояния материалов [1–3], подвергающихся пластическому деформированию. Особенно актуально исследование влияния структурных изменений на акустические параметры задолго до образования макроскопических трещин. Основным фактором, оказывающим заметное влияние на акустические параметры, является изменение микронеоднородности при деформировании материалов, связанное с изменением параметров дислокационной структуры, плотности вакансий, накоплением микропор и микротрещин и т.д. Все эти процессы влияют на скорость распространения ультразвука – параметра, широко используемого в диагностике состояния материалов [4–7]. Как было показано ранее [8–10], изменение скорости ультразвуковых волн при нагружении имеет немонотонный характер. В работе [8] установлена связь скорости ультразвука и механических свойств на примере высокохромистой стали. Закономерности изменения скорости распространения ультразвука при варьировании состава, структуры и состояния металлов и сплавов обнаружены и детально описаны в работах [11–13]. В то же время возникает необходимость исследования температурных зависимостей характеристик ультразвука, включая диапазон пониженных температур, в связи с недостаточным объемом данных в литературе [1–7].

В настоящей работе установлены зависимости скорости распространения ультразвуковых волн V и коэффициента затухания α от величины общей деформации до разрушения, предела прочности в широком температурном интервале для аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты выполнены на поликристаллах аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T с размером зерна приблизительно 12,5 мкм. Плоские образцы с размерами рабочей части $40 \times 5 \times 2$ мм подвергали одноосному растяжению на испытательной машине Instron-1185 с постоянной скоростью деформации $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Температуру испытаний в интервале $180\text{ K} \leq T \leq 320\text{ K}$ задавали скоростью продувки парами азота из сосуда Дьюара рабочей камеры с деформируемым образцом и контролировали хромель-алюмелевой термопарой, спай которой контактировал с образцом [14]. Исследуемый температурный интервал выбирали с учетом возможности реализации в стали прямого $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситного превращения [15–18].

Одновременно с регистрацией кривых нагружения на экспериментальном стенде измеряли скорость распространения поверхностных волн Рэлея [19]. Импульсы возбуждались пьезоэлектрическим преобразователем на частоте 5 МГц. Ошибка определения скорости не превышала ± 3 м/с. Обработку экспериментальных данных выполняли с использованием стандартных методов статистического анализа. Применение стенда позволило существенно дополнить получаемую в процессе механических испытаний информацию о стандартных характеристиках материала, таких как предел текучести, временное сопротивление, коэффициент деформационного упрочнения. Как известно, эти характеристики являются условными, слабо отражают природу процессов, протекающих в твердых телах при деформации, и с трудом связываются с существующими дислокационными механизмами упрочнения [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диаграммы растяжения в условных координатах напряжение (σ) – деформация (ϵ) образцов стали марки 12X18H10T охватывали области упругих, пластических деформаций и разрушения. Далее диаграммы перестраивали в координатах истинные напряжения (S) – истинные деформации (e) [20] и в зависимости $S(e^{1/2})$ с выявлением на них точек перегиба (рис. 1, а), находящихся между пределом текучести и пределом прочности. Эти критические точки указывают на переход от упругопластической к пластически-деструкционной

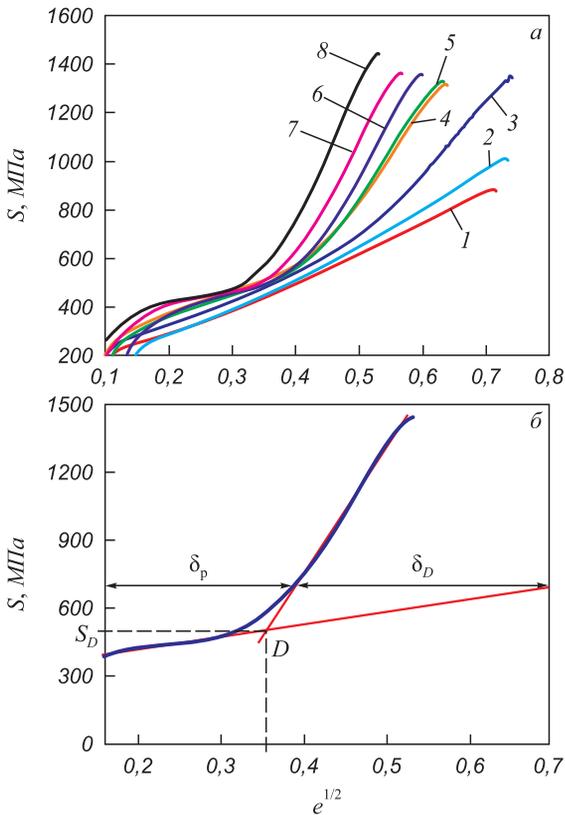


Рис. 1. Диаграммы нагружения $S(e^{1/2})$ при температурах 334, 318, 297, 270, 254, 227, 211 и 180 К (1 – 8) (а) и при температуре 211 К (б)

Fig. 1. Loading diagrams $S(e^{1/2})$ at temperatures 334, 318, 297, 270, 254, 227, 211 and 180 K (1 – 8) (a) and at a temperature of 211 K (b)

стадии деформирования, которая связана с накоплением микрповреждений в стали. Критической точке D на диаграмме соответствуют напряжение S_D и деформация e_D (рис. 1, б), которые можно принять за критичес-

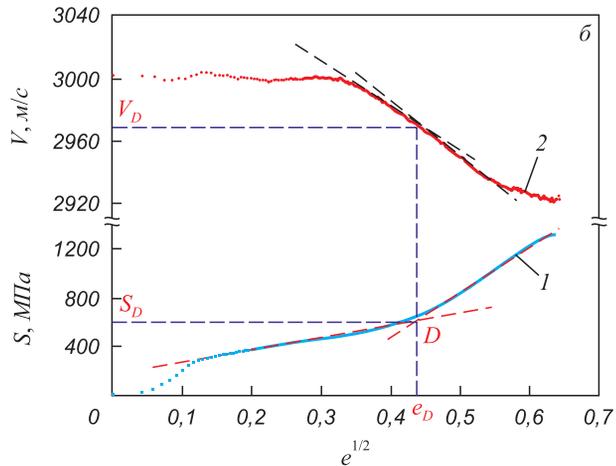
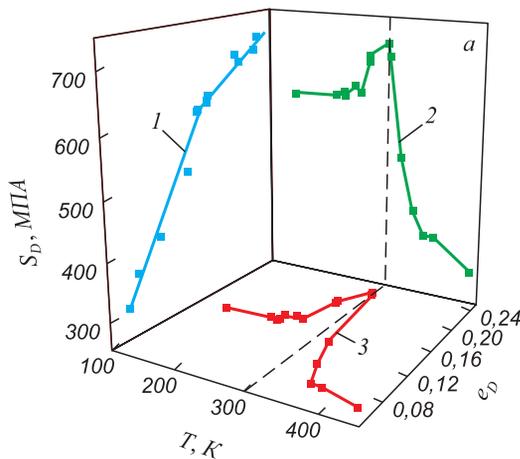


Рис. 2. Температурные зависимости деформационно-прочностных характеристик, соответствующих критической точке (а), а также диаграмма $S(e^{1/2})$ (1) и изменение скорости ультразвука $V(e^{1/2})$ (2) с ростом общей деформации при температуре 318 К (б)

Fig. 2. Temperature dependences of deformation-strength characteristics corresponding to the critical point (a) and diagram $S(e^{1/2})$ (1) and the change in ultrasound velocity $V(e^{1/2})$ (2) with an increase in total deformation at a temperature of 318 K (b)

кие параметры для обеспечения максимальной работоспособности металла в исследуемом температурном интервале.

На рис. 2, а показаны зависимости деформационно-прочностных характеристик, соответствующих точке D : $S_D(e_D)$ (кривая 1), $S_D(T)$ (кривая 2) и $e_D(T)$ (кривая 3). Температурные зависимости деформационно-прочностных характеристик демонстрируют экстремальный характер. Для всех точек D можно рассчитать критический параметр $\Delta = \delta_D / \delta_p$ (где δ_p – упругопластическая составляющая в относительном удлинении до разрыва; δ_D – пластически-деструкционная составляющая в относительном удлинении до разрыва) (рис. 1, б).

На рис. 2, б совмещены диаграмма $S(e^{1/2})$ (кривая 1) и данные измерений скорости распространения ультразвука $V(e^{1/2})$ (кривая 2) в зависимости от общей деформации и указана точка D , которой соответствует критическое значение скорости ультразвука V_D . Понижение температуры испытаний в процессе растяжения стальных образцов приводит к увеличению плотности дефектов и росту объема мартенситной фазы, и, как следствие, к увеличению локальных внутренних напряжений (напряжений II-го рода). Все это отражается на уменьшении величины скорости ультразвука с ростом общей деформации и действующих напряжений. Достижение значения скорости ультразвука $V = V_D$ при исследуемых температурах указывает на переход от упругопластической к пластически-деструкционной стадии деформирования.

Обработка результатов изменения скорости распространения ультразвука при различной температуре для фиксированных значений общей пластической деформации позволила установить линейный характер зависимости $V(T)$ с коэффициентом корреляции $R = 0,97$. При понижении температуры испытаний в исследуемом интервале изменение скорости ультразвука достигает

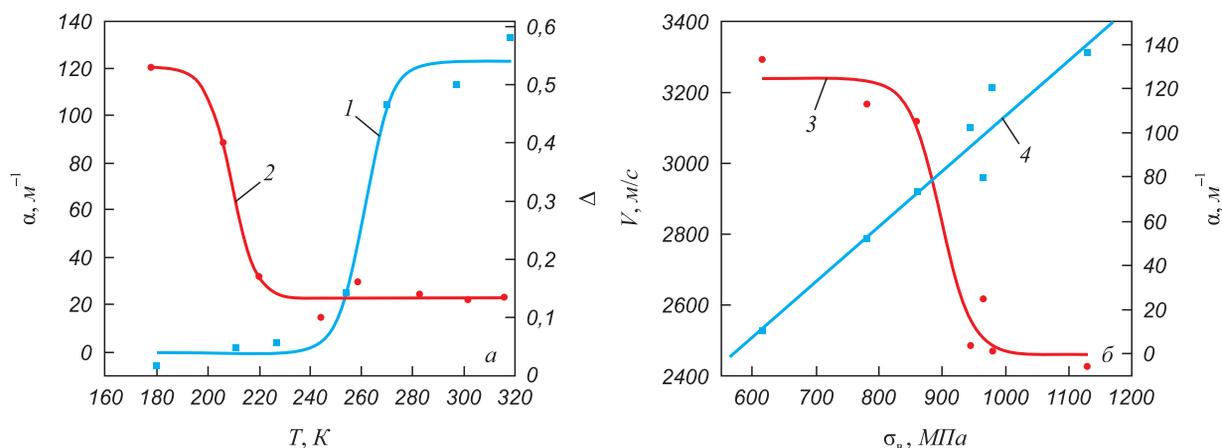


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента затухания ультразвука (1) и критического параметра Δ (2) (а) и зависимости коэффициента затухания α (3) и скорости ультразвука V (4) от предела прочности σ_b (б)

Fig. 3. Temperature dependences of the attenuation coefficient of ultrasound (1) and the critical parameter Δ (2) (a); dependences of the attenuation coefficient α (3) and ultrasound velocity V (4) on the strength limit σ_b (b)

20 % в недеформированном образце и 15 % в деформированном образце (при общей деформации 0,3) по сравнению с величиной скорости ультразвука в недеформированном материале при комнатной температуре.

На рис. 3, а представлены температурные сигмоидальные зависимости коэффициента затухания ультразвука $\alpha(T)$ (кривая 1), соответствующего точке D, и критического параметра $\Delta(T)$ (кривая 2). Установлено также, что в деформируемых образцах зависимость коэффициента затухания ультразвука от предела прочности $\alpha(\sigma_b)$ имеет сигмоидальную форму (рис. 3, б), в то время как зависимость скорости ультразвука от предела прочности $V(\sigma_b)$ является линейной в исследуемом температурном интервале. Определены напряжения, соответствующие максимальной скорости роста объемной доли мартенситной α' -фазы и спаду скорости ультразвука.

Механические испытания на одноосное растяжение стальных образцов показали, что понижение температуры испытаний приводит к увеличению пределов текучести и прочности на фоне снижения пластичности. Линейный характер зависимости скорости ультразвука от предела прочности $V(\sigma_b)$, вероятно, обусловлен функциональной связью предела прочности σ_b с упругими свойствами стали. Так как скорость поперечных ультразвуковых волн $V = (G/\rho)^{1/2}$ (где G – модуль сдвига; ρ – плотность), то отличие модулей упругости увеличивающейся фазы мартенсита при $\gamma \rightarrow \alpha'$ мартенситном превращении в процессе пластической деформации [15] от модулей матрицы стали приводит к изменению упругих и акустических характеристик всего сплава.

Таким образом, по значениям скорости распространения ультразвука и коэффициента затухания можно прогнозировать предел прочности и максимальную работоспособность исследуемого металла при низких

температурах. При этом предполагается, что выполнение условия $e < e_D$ сигнализирует о том, что текущая деформация соответствует упругопластической составляющей δ_p и $\Delta \rightarrow 0$. В результате изготовления или эксплуатации детали (изделия) $\Delta \neq 0$. Это свидетельствует о том, что материал работает уже в пластически-деструкционной стадии.

Выводы

Установлено, что процесс растяжения образцов аустенитной нержавеющей стали марки 12X18H10T в температурном интервале $180 \text{ K} \leq T \leq 320 \text{ K}$ приводит к существенным изменениям скорости ультразвука. Установлены температурные зависимости скорости ультразвука, коэффициента затухания, пределов текучести и прочности. Определены критические параметры перехода от упругопластической к пластически-деструкционной стадии деформирования. Полученные корреляционные связи между параметрами свидетельствуют о том, что можно построить между ними регрессионные зависимости, которые могут быть использованы для восстановления значений одной характеристики по экспериментально определенной другой. Из всех таких пар зависимостей наиболее интересными для практики представляются взаимосвязи между парами механических и акустических параметров, поскольку измерение последних менее трудоемко, их можно проводить прямо на исследуемом элементе конструкции в процессе эксплуатации, не разрушая его, а для проведения эксперимента не требуется изготовления образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ding X., Wu X., Wang Y. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an elec-

- tromagnetic acoustic transducer. *Ultrasonics*. 2014;54(3): 914–920. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.11.003>
2. Kobayashi M. Analysis of deformation localization based on the proposed theory of ultrasonic wave velocity propagation in plastically deformed solids. *International Journal of Plasticity*. 2010;26(1):107–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.05.004>
 3. Marcantonio V., Monarca D., Colantoni A., Cecchini M. Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage. *Mechanical Systems and Signals Processing*. 2019;120:32–42. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.10.012>
 4. Yun H., Modarres M. Measures of entropy to characterize fatigue damage in metallic materials. *Entropy*. 2019;21(8): 804. <https://doi.org/10.3390/e21080804>
 5. Yang C.-H., Jeyaprakash N., Hsu Y.-W. Applicability of non-destructive laser ultrasound and non-linear ultrasonic technique for evaluation of thermally aged CF8 duplex stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2021;193:104451. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104451>
 6. Normando P.G., Moura E.P., Souza J.A., Tavares S.S.M., Padovese L.R. Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(12):2886–2891. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.017>
 7. Biezma M.V., Martin U., Linhardt P., Röss J., Rodríguez C., Bastidas D.M. Non-destructive techniques for the detection of sigma phase in duplex stainless steel: A comprehensive review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;122:105227. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105227>
 8. Баранникова С.А., Бочкарёва А.В., Лунёв А.Г., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации высокохромистой стали. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;59(8):558–564. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-558-564>
Barannikova S.A., Bochkareva A.V., Lunev A.G., Shlyakhova G.V., Zuev L.B. Ultrasound velocity variation at plastic deformation of high-chromium steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(8):558–564. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-558-564>
 9. Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Barannikova S.A., Zuev L.B. Acoustic parameters as criteria of localized deformation in aluminum alloys. *Acta Physica Polonica A*. 2018;134:342–345. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.134.342>
 10. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. *Скорость ультразвука и структура сталей и сплавов*. Новосибирск: Наука; 1996:181.
Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Ultrasound Speed and Structure of Steels and Alloys*. Novosibirsk: Nauka; 1996:181. (In Russ.).
 11. Murav'eva O., Murav'ev V., Volkova L., Kazantseva N., Nichipuruk A., Stashkov A. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. *Additive Manufacturing*. 2022;51: 102635. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102635>
 12. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.K. Some features in the behavior of magnetic and acoustic characteristics of hot-rolled 08G2B steel under cyclic loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55:827–836. <https://doi.org/10.1134/S1061830919110044>
 13. Murav'eva O.V., Volkova L.V., Murav'ev V.V., Sintsov M.A., Myshkin Yu.V., Basharova A.F. Sensitivity of electromagnetic-acoustic multiple shadow method using rayleigh waves in inspection of oil country tubular goods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020;56:950–1004. <https://doi.org/10.1134/S1061830920120050>
 14. Баранникова С.А., Колосов С.В., Никонова А.М. Изменение скорости ультразвука в процессе растяжения сплава Fe–Cr–Ni при температурах 180 – 318 К. *Известия вузов. Физика*. 2021;(3):47–53. <https://doi.org/10.17223/00213411/64/3/47>
Barannikova S.A., Kolosov S.V., Nikonova A.M. Changes in ultrasonic velocity at hydrogen embrittlement of high-chromium steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2021;(3):47–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/00213411/64/3/47>
 15. Talonen J., Hänninen H., Nenonen P., Pape G. Effect of strain rate on the strain-induced $\gamma \rightarrow \alpha'$ -martensite transformation and mechanical properties of austenitic stainless steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36:421–32. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0313-y>
 16. Zheng C., Yu W. Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;710:359–365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.003>
 17. Mallick P., Tewary N.K., Ghosh S.K., Chattopadhyay P.P. Effect of cryogenic deformation on microstructure and mechanical properties of 304 austenitic stainless steel. *Materials Characterization*. 2017;133:77–86. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.09.027>
 18. Zheng C., Yu W. Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;710:359–365. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.003>
 19. Torello D., Thiele S., Matlack K.H., Kim J.-Y., Qu J., Jacobs L.J. Diffraction, attenuation, and source corrections for nonlinear Rayleigh wave ultrasonic measurements. *Ultrasonics*. 2015;56:417–426. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.09.008>
 20. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer; 2013:634. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4342-7>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Светлана Александровна Баранникова, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-5010-9969
E-mail: bsa@ispms.ru

Svetlana A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-5010-9969
E-mail: bsa@ispms.ru

Михаил Владимирович Надежкин, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-4819-7653
E-mail: mvn@ispms.ru

Полина Валентиновна Исхакова, младший научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-8256-283X
E-mail: iskhakova.polina@gmail.com

Mikhail V. Nadezhkin, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4819-7653
E-mail: mvn@ispms.ru

Polina V. Iskhakova, Junior Researcher of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-8256-283X
E-mail: iskhakova.polina@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. А. Баранникова – формулирование концепции работы, обсуждение результатов, написание текста статьи.

М. В. Надежкин – проведение исследований акустических и механических характеристик, анализ результатов.

П. В. Исхакова – обзор литературы, подготовка образцов для исследований механических характеристик, обсуждение результатов.

S. A. Barannikova – concept formulation, discussion of the results, writing the text.

M V. Nadezhkin – conducting studies of acoustic and mechanical characteristics, analysis of the results.

P. V. Iskhakova – literary review, preparation of the samples for studies of mechanical characteristics, discussion of the results.

Поступила в редакцию 24.03.2022

После доработки 24.08.2022

Принята к публикации 25.08.2022

Received 24.03.2022

Revised 24.08.2022

Accepted 25.08.2022