УДК 53.08

МОНИТОРИНГ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦИИ ВИХРЕТОКОВЫМ И АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

© Василий Васильевич Мишакин¹, Александр Викторович Гончар¹, Константин Владимирович Курашкин¹, Вячеслав Александрович Ключников¹, Максим Сергеевич Аносов²

¹Институт проблем машиностроения РАН - филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
imndt31@mts-nn.ru

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Россия
anosov-maksim@list.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследования методами акустического и вихретокового контроля процесса усталостного разрушения силового элемента, выполненного из аустенитной нержавеющей стали. В качестве элемента конструкции было выбрано заклепочное соединение пластины из аустенитной метастабильной стали с ребром жесткости, которые широко используются в промышленности, например, при изготовлении сосудов. В процессе усталостного нагружения в зонах, близких к заклепочному отверстию, исследовалось изменение упругих характеристик и объемной доли деформационного мартенсита. С помощью ранее разработанного алгоритма, по данным ультразвуковых и вихретоковых измерений, рассчитано относительное число циклов нагружения. Проведено сравнение циклической долговечности пластины без концентратора и ребра жесткости и испытанного силового элемента.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, усталость, аустенит, деформационный мартенсит, ультразвуковой эхо-импульсный метод.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00637).

DAMAGE FATIGUE MONITORING OF THE PRIMARY ELEMENT OF STRUCTURE BY EDDY CURRENT AND ACOUSTIC METHODS

© Vasily Mishakin¹, Alexander Gonchar¹, Konstantin Kurashkin¹, Vyacheslav Klyushnikov¹, Maxim Anosov²

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science – Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod, Russian Federation
imndt31@mts-nn.ru

²Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation
anosov-maksim@list.ru

Abstract. *The paper presents the results of a study by acoustic and eddy current methods of the fatigue loading process of a power structural element made of austenitic stainless steel. A riveted joint of a plate made of austenitic metastable steel with a stiffener, which is widely used in industry, for example, in the manufacture of vessels, was chosen. During fatigue loading the change in elastic characteristics and the volume fraction of strain-induced martensite was studied in zones close to the rivet hole. The relative number of loading cycles by using an earlier developed technique, based on the ultrasonic and eddy current measurements was calculated. A comparison of the cyclic lives of the tested power structural element and the plate without a concentrator was carried out.*

Keywords: *stainless steel, fatigue, austenite, strain-induced martensite, ultrasonic echo-pulse method.*

Acknowledgements. *This work was supported by the Russian Science Foundation, grant number 19-19-00637.*

1. Введение. Одним из наиболее часто встречающихся в промышленности соединений является заклепочное. Для изготовления такого соединения в деталях изготавливаются сквозные отверстия, которые являются концентраторами напряжений. С учётом воздействия негативных факторов, например, ослабление заклепочного соединения, его усталостные характеристики могут быть значительно снижены.

С целью верификации и адаптации к реальным условиям разработанного ранее алгоритма определения усталостной поврежденности и циклической долговечности нержавеющей стали аустенитного класса ультразвуковым и вихретоковым видами контроля [1] проводились следующие исследования. Плоский элемент, закрепленный на ребре жесткости, подвергался циклическому деформированию по схеме консольного изгиба вплоть до появления макротрещины в районе отверстия, выполненного под заклепочное соединение. Используемые ультразвуковой и вихретоковый методы контроля позволяют учитывать структурные изменения, происходящие при циклическом деформировании метастабильной аустенитной стали.

Известно, что основные изменения, влияющие на физические характеристики метастабильных аустенитных сталей при их деформировании, являются накопление микрповреждений и фазовые превращения [2-4]. Фазовые превращения заключаются в формировании из фазы аустенита (γ фаза, парамагнетик) двух типов мартенситных фаз: α' – мартенсита (ферромагнетик), имеющего объемно-центрированную кубическую кристаллическую (ОЦК) решетку и ε - мартенсита, обладающего гексагональной плотноупакованной решеткой (ГПУ) [5-8]. Из-за различий в структуре α' -мартенсит обладает более высокой прочностью и термодинамической устойчивостью в отличие от ε -мартенсита, и его формирование является более предпочтительным. Мартенситные превращения могут происходить следующими способами: $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ или $\gamma \rightarrow \alpha'$ [9]. Характерной и важной особенностью мартенсита является его высокое сопротивление пластической деформации [10]. Принимая во внимание сильные изменения магнитных свойств в результате фазовых преобразований магнитный [11, 12] и вихретоковый [13-15] методы получили достаточно широкое распространение при диагностике состояния метастабильных сталей. Однако изменение объемного содержания мартенсита или изменение электромагнитных характеристик, связанное с этим процессом, не может дать достаточной информации об изменениях в структуре материала, связанных с микрповрежденностью. Это связано с тем,

что на фоне сильных изменений магнитных свойств за счет фазовых преобразований изменение магнитных характеристик за счет микроповреждений практически не обнаруживаются. Для этой цели необходимо использовать метод неразрушающего контроля, чувствительный как к изменениям объемной доли мартенсита, так и к процессу накопления микропор, микротрещин и других микродефектов. Таким методом, успешно применяемым для структурно-чувствительных исследований, является акустический метод [16-17]. Он оперативен, относительно безопасен, по сравнению, например, с рентгеновским методом, является инженерным методом, т. е. позволяет проводить измерения непосредственно на элементах конструкции. Не редко для изготовления конструкций используется листовой прокат. Как правило, листовые катаные материалы относятся к ортотропным и обладают анизотропией упругих свойств. Связь модулей упругости со скоростями распространения продольной V_{zz} и поперечными волнами V_{zx} и V_{zy} [18], распространяющимися вдоль оси Z , для ортотропного материала записывается в виде:

$$V_{zz} = \sqrt{C_{33}/\rho}, V_{zx} = \sqrt{C_{55}/\rho}, V_{zy} = \sqrt{C_{44}/\rho} \quad (1)$$

где C_{33} , C_{44} , C_{55} - модули упругости (матричное обозначение); ρ - плотность материала. Первый индекс (z) в обозначении скоростей соответствует направлению распространения волны, второй - направлению поляризации (поляризация поперечных волн направлена вдоль и поперек осей анизотропии).

Отношение модулей C_{33}/C_{44} и C_{33}/C_{55} , используя (1), можно записать в виде:

$$\frac{C_{33}}{C_{44}} = \frac{\tau_{zy}^2}{\tau_{zz}^2}, \frac{C_{33}}{C_{55}} = \frac{\tau_{zx}^2}{\tau_{zz}^2} \quad (2)$$

τ_{zx} и τ_{zy} - время распространения сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек проката, τ_{zz} - время распространения продольной волны.

Соотношения C_{33}/C_{44} и C_{33}/C_{55} определяются с малой погрешностью, так как измерение времени распространения с помощью современных акустических приборов можно проводить с большой точностью. Этот факт позволяет использовать данные соотношения в качестве структурно чувствительных параметров. Модули упругости деформационного мартенсита имеют упругий контраст с матрицей материала [19], поэтому изменение фазового состава в процессе циклического деформирования ведет к заметному изменению эффективных модулей упругости C_{ij} . Кроме того, необходимо учитывать, что накопление микроповреждений уменьшает модули упругости и изменяет их соотношение. В [1] показаны результаты исследования изменения параметров C_{33}/C_{44} , C_{33}/C_{55} стали 08X18H10T при ее циклическом деформировании. Результаты анализа показали, что изменение соотношения модулей и объемной доли образовавшегося мартенсита деформации $\Delta\Phi$ с относительным количеством циклов N/N_f хорошо описывается зависимостью:

$$\frac{N}{N_f} = m_0 + m_1\Delta\Phi + m_2P + m_3\Delta\Phi P \quad (3)$$

Параметр P является мерой скорости изменения соотношения модулей, т.е.:

$$P = \Delta(C_{33}/C_{44})/\Delta(C_{33}/C_{55}) \quad (4)$$

Из проведенных ранее исследований [1] процесса усталостного разрушения нержавеющей стали аустенитного класса AISI 321 (12X18H10T) при отнулевом жестком режиме в диапазоне амплитуд деформаций цикла от 0,3% до 0,5% (размах деформации цикла от 0,6% до 1%) были получены следующие числовые значения: $m_0=0,262$, $m_1=0,0566$, $m_2=-0,141$, $m_3=-0,0153$.

В отличие от тестовых образцов реальные элементы конструкции имеют концентраторы напряжений, градиенты напряжений и деформаций по объему материала конструкций. Реальная долговечность силового узла конструкции сильно зависит от этих факторов. Для адаптации разработанных структурно-чувствительных методов и подходов неразрушающего контроля к применению на типовых узлах конструкций необходимы дополнительные исследования. Целью работы является исследование ультразвуковым и вихретоковым видами контроля силового узла обшивки – ребро жесткости, изготовленного из стали 12X18H10T, для оценки возможности применения разработанного ранее структурно-чувствительного неразрушающего метода определения относительного числа циклов до разрушения.

2. Методика. Исследовалась нержавеющая сталь аустенитного класса 12X18H10T следующего химического состава (масс.%): С 0,02, Si 0,43, Mn 0,74, Cr 17,76, Ni 9,16, Ti 0,32, S 0,002, P 0,033, Cu 0,23.

Схема усталостных испытаний силового узла и фотография нагружающего устройства приведены на рис.1а и рис. 1б соответственно.

Рис. 1. Схема испытаний (а) и фотография нагружающего устройства (б).

Установка работает следующим образом. Полоса I размерами 110x15 мм и толщиной 3 мм, вырезанная из листа с отверстием (диаметр 4 мм) для заклепочного соединения II, закрепляется в станине III. На расстоянии 10 мм от станины полоса прикреплена к ребру жесткости IV. С помощью нагружающего устройства V проводится симметричное циклическое деформирование по схеме консольного изгиба. Коэффициент асимметрии цикла $R = -1$, режим – жесткий, частота ~ 1 Hz.

До испытаний и после 2000, 4000, и 5600 циклов в зонах 1-6 проводились структурно-чувствительные измерения ультразвуковым эхо-импульсным и вихретоковым методами.

Расстояние от центра заклепочного соединения до центра установки ультразвуковых преобразователей составляло 4,7 мм (зоны 5-6). Расстояние между зонами 1-5 составляло 3 мм. Вихретоковым прибором МВП-2М в исследуемых зонах измерялось объемное содержание магнитной фазы Φ .

С помощью акустической установки (рис.2) в исследуемых зонах измерялись времена распространения поперечных и продольных объемных волн. Для измерения акустических характеристик применялся эхо-импульсный метод. В работе использовались сдвиговые и продольные волны, для возбуждения которых применялись пьезоэлектрические преобразователи производства Olympus V157 и V1091 соответственно. Диаметр излучающей пластины 3 мм, центральная частота 5 МГц. Акустическая установка работает следующим образом: с генератора 1 на пьезоэлектрический преобразователь 2 поступают электрические импульсы, возбуждающие упругие сигналы в исследуемом материале 3. Серия отраженных эхо-сигналов поступает на АЦП 4 и регистрируется на ПК 5. С помощью специализированной программы определяются времена распространения поперечных и продольных упругих волн. Погрешность измерения времени распространения не превышала 2 нс. Погрешность определения параметров C_{33}/C_{44} и C_{33}/C_{55} составляла $5 \cdot 10^{-4}$. Испытания проводились при комнатной температуре. Циклическая долговечность (момент появления видимой глазом трещины) составила 5 600 циклов. Более подробно методика проведения ультразвуковых измерений эхо-импульсным методом приведена в ранних работах [20].

Рис. 2. Блок схема установки для проведения акустических измерений, 1- ультразвуковой дефектоскоп, 2 – ПЭП, 3 – образец, 4 – цифровой осциллограф, 5 – ПК.

Для получения сравнительных характеристик и выявления влияния концентратора и ребра жесткости на долговечность дополнительно исследовался тестовый образец, не имеющий отверстия и не соединенный с ребром жесткости. Образец нагружался с аналогичной амплитудой до появления трещины размером 1 мм.

2. Результаты исследований. На рис.3а приведено значение объемной доли деформационного мартенсита Φ в исследуемых зонах при циклическом нагружении узла. Как видно из этого рисунка, по мере приближения к ребру жесткости наблюдается монотонное увеличение объемной доли мартенсита. При появлении макротрещины величина Φ достигает своего максимального значения 4,2% в зоне 6 вблизи концентратора напряжений. Как видно из полученных результатов, метод вихретокового контроля позволяет фиксировать начало необратимых процессов в структуре материала задолго до

появления макротрещины. Связь изменения объемной доли деформационного мартенсита $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0$ от количества циклов в шестой зоне можно аппроксимировать квадратичной зависимостью:

$$\Delta\Phi = 9,56 \times 10^{-10} N^2 + 1,63 \times 10^{-6} N \quad (5)$$

Коэффициент корреляции составил 0,97.

В результате акустических исследований определены времена распространения продольных и поперечных упругих волн и по формуле (2) проведен расчет отношения модулей C_{33}/C_{44} и C_{33}/C_{55} для всех исследуемых зон. Для шестой зоны зависимость отношения C_{33}/C_{44} от величины C_{33}/C_{55} приведена на рис. 4. Используя метод наименьших квадратов и предположение о линейной зависимости C_{33}/C_{44} от C_{33}/C_{55} на всем участке циклического деформирования, исходя из выражения (4), можно оценить численное значение параметра P .

Рис. 3. Распределение объемного содержания магнитной фазы Φ по зонам (а) и зависимость его изменения в девятой зоне от количества циклов (б).

Рис. 4. Зависимость отношения упругих модулей C_{33}/C_{44} (C_{33}/C_{55}) в шестой зоне для разного количества циклов нагружения.

Значение параметра P в шестой зоне при $N_f=5600$ циклов составило 1,33. Исходя из выражения (3), расчетное значение величины N/N_f в момент образования макротрещины составило 0,22. Для тестового образца без концентратора и не соединенного с ребром жесткости значение циклической долговечности составило 25000 циклов. Как и следовало ожидать, наличие концентратора существенно снизило ресурс изделия (в 4,5 раза). Объемное содержание деформационного мартенсита в шестой зоне ($\Phi = 4,2\%$) при появлении макротрещины меньше по сравнению с тестовым образцом ($\Phi = 20\%$) приблизительно в пять раз.

4. Выводы. Таким образом, исследование силового элемента с заклепочным соединением показало динамику изменения объемной доли деформационного мартенсита как вблизи концентратора напряжения, так и в зонах с меньшими амплитудами деформаций. Выявлена локальная зона с максимальной вероятностью разрушения. Оценочный расчет относительного числа циклов в этой зоне показал, что его величина составляет не более 22% от наработки материала, не имеющего концентратора напряжений. Мониторинг элемента конструкции методами неразрушающего контроля позволяет обнаруживать необратимые деградационные процессы задолго до появления макротрещины и произвести оценочные расчеты долговечности материала исследуемого узла с помощью методами ультразвукового и вихретокового контроля.

Список литературы

1. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M., Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 141, 105846, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105846.
2. Bayerlein M., Christ H.J., Mughrabi H. Plasticity-induced martensitic-transformation during cyclic deformation of AISI-304L stainless-steel // Materials Science and Engineering: A. – 1989. – Vol. 114: L11-L16. DOI:10.1016/0921-5093(89)90871-X
3. Kobayashi S., Kikuchi N., Takahashi S., Kamada Y., Kikuchi H.. Magnetic properties of α' martensite in austenitic stainless steel studied by a minor-loop scaling law // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108: 043904. DOI:10.3390/met8010002
4. Smaga M., Walther F., Eifler D. Deformation-induced martensitic transformation in metastable austenitic steels // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 483-484. – P. 394-397 DOI: 10.1016/j.msea.2006.09.140
5. Mangonon P.L., Thomas G. The martensite phases in 304 stainless steel // Metallurgical Transactions. – 1970. – Vol. 1. – P. 1577-86.
6. Olson G.B., Cohen M. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation // Metallurgical Transactions A. – 1975. – Vol. 6. – P.791–795.
7. Maxwell P.G., Goldberg A., Shyne J.C. Stress-assisted and strain-induced martensites in Fe-Ni-C alloys // Metallurgical Transactions. – 1974. – Vol. 5. – P. 1305-1318.
8. Rosen A., Jago R., Kjer T. Tensile properties of metastable stainless steels // Journal of Materials Science. – 1972. - Vol. 7. – P. 870-876.
9. Kobayashi S., Kikuchi N., Takahashi S., Kamada Y., Kikuchi H. Magnetic properties of α' martensite in austenitic stainless steel studied by a minor-loop scaling law // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108, 043904. DOI: 10.1063/1.3475651.
10. Гольдштейн М. И., Литвинов В. С., Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – Москва: Металлургия, 1986. – 310 с.
11. Kinoshita K., Nakazaki R., Matsumoto, E. Variation of the magnetic properties of the martensite phase of SUS304 steel due to tensile deformation // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2014. – Vol. 45 (1–4). – P. 45–52. DOI: 10.3233/JAE-141811.

12. Mumtaz K., Takahashi S., Echigoya J., Kamada Y., Zhang L. F., Kikuchi H., Ara K., Sato M. Magnetic measurements of martensitic transformation in austenitic stainless steel after room temperature rolling // *Journal of Materials Science*. – 2004. – Vol. 39(1). – P. 85–97. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000007731.38154.e1.
13. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304L by eddy currents // *Research in Nondestructive Evaluation*. – 2010. – Vol. 21(2). – P. 112–126. DOI: 10.1080/09349840903427854.
14. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy Current Assessment of the Cold Rolled Deformation Behavior of AISI 321 Stainless Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21(8). – P. 1772–1776. DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.
15. Silva V. M. A., Camerini C. G., Pardal J. M., Blás J. C. G. de, Pereira G. R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2018. – Vol. 7(3). – P. 395–401. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
16. Kim C. Nondestructive evaluation of strain-induced phase transformation and damage accumulation in austenitic stainless steel subjected to cyclic loading // *Metals*. – 2017. – Vol. 8(1), 14. DOI: 10.3390/met8010014.
17. Khan S. Z., Khan T. M., Joya Y. F., Khan M. A., Ahmed S., Shah A. Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2016 – Vol. 31(4). P. 360–370. DOI: 10.1080/10589759.2015.1121265.
18. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – Москва: Мир, 1972. – 308 с.
19. Barbier D., Gey N., Allain S., Bozzolo N., Humberta M. Analysis of the tensile behavior of a TWIP steel based on the texture and microstructure evolutions // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. Vol. 500 (1-2). – P. 196–206. DOI: 10.1016/j.msea.2008.09.031.
20. Мишакин В. В., Гончар А. В., Ключников В. А., Курашкин К. В., Фомин А. Е., Сергеева О. А. Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющей сталей акустическим и вихретоковым методами // *Измерительная техника*. – 2021. – № 2. – С. 62–67. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67.

References

1. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M., Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – Vol. 141, 105846, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105846.
2. Bayerlein M., Christ H.J., Mughrabi H. Plasticity-induced martensitic-transformation during cyclic deformation of AISI-304L stainless-steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 1989. – Vol. 114: L11-L16. DOI:10.1016/0921-5093(89)90871-X
3. Kobayashi S., Kikuchi N., Takahashi S., Kamada Y., Kikuchi H.. Magnetic properties of α' martensite in austenitic stainless steel studied by a minor-loop scaling law // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 108: 043904. DOI:10.3390/met8010002
4. Smaga M., Walther F., Eifler D. Deformation-induced martensitic transformation in metastable austenitic steels // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 483-484. – P. 394-397 DOI: 10.1016/j.msea.2006.09.140
5. Manganon P.L., Thomas G. The martensite phases in 304 stainless steel // *Metallurgical Transactions*. – 1970. –Vol. 1. – P. 1577-86.
6. Olson G.B., Cohen M. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation // *Metallurgical Transactions A*. – 1975. – Vol. 6. –P.791–795.
7. Maxwell P.G., Goldberg A., Shyne J.C. Stress-assisted and strain-induced martensites in Fe-Ni-C alloys // *Metallurgical Transactions*. – 1974. – Vol. 5. – P. 1305-1318.
8. Rosen A., Jago R., Kjer T. Tensile properties of metastable stainless steels // *Journal of Materials Science*. – 1972. - Vol. 7. – P. 870-876.

9. Kobayashi S., Kikuchi N., Takahashi S., Kamada Y., Kikuchi H. Magnetic properties of α' martensite in austenitic stainless steel studied by a minor-loop scaling law // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108, 043904. DOI: 10.1063/1.3475651.
10. Gol'dshtein M., Litvinov V., Bronfin B. Metallophysics of high-strength alloys. - Moscow: Metallurgia, 1986. (in Russian)
11. Kinoshita K., Nakazaki R., Matsumoto, E. Variation of the magnetic properties of the martensite phase of SUS304 steel due to tensile deformation // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2014. – Vol. 45 (1–4). – P. 45–52. DOI: 10.3233/JAE-141811.
12. Mumtaz K., Takahashi S., Echigoya J., Kamada Y., Zhang L. F., Kikuchi H., Ara K., Sato M. Magnetic measurements of martensitic transformation in austenitic stainless steel after room temperature rolling // Journal of Materials Science. – 2004. – Vol. 39(1). – P. 85–97. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000007731.38154.e1.
13. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. Monitoring of martensitic transformation in austenitic stainless steel 304L by eddy currents // Research in Nondestructive Evaluation. – 2010. – Vol. 21(2). – P. 112–126. DOI: 10.1080/09349840903427854.
14. Liu K., Zhao Z., Zhang Z. Eddy Current Assessment of the Cold Rolled Deformation Behavior of AISI 321 Stainless Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Vol. 21(8). – P. 1772–1776. DOI: 10.1007/s11665-011-0080-4.
15. Silva V. M. A., Camerini C. G., Pardal J. M., Blás J. C. G. de, Pereira G. R. Eddy current characterization of cold-worked AISI 321 stainless steel // Journal of Materials Research and Technology. – 2018. – Vol. 7(3). – P. 395–401. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.002.
16. Kim C. Nondestructive evaluation of strain-induced phase transformation and damage accumulation in austenitic stainless steel subjected to cyclic loading // Metals. – 2017. – Vol. 8(1), 14. DOI: 10.3390/met8010014.
17. Khan S. Z., Khan T. M., Joya Y. F., Khan M. A., Ahmed S., Shah A. Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2016 – Vol. 31(4). P. 360–370. DOI: 10.1080/10589759.2015.1121265.
18. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic Methods in Solid State Physics. – Academic Press New York, London, 1969. 478 p.
19. Barbier D., Gey N., Allain S., Bozzolo N., Humberta M. Analysis of the tensile behavior of a TWIP steel based on the texture and microstructure evolutions // Materials Science and Engineering: A. – 2009. - Vol. 500 (1-2). – P. 196–206. DOI: 10.1016/j.msea.2008.09.031.
20. Mishakin V., Gonchar A., Klyushnikov V., Kurashkin K., Fomin A., Sergeeva O. Monitoring the state of stainless steel under cyclic deformation by the acoustic and eddy current methods // Measurement techniques. – 2021. – Vol. 64, No. 2. – P. 145-150. DOI: 10.1007/s11018-021-01909-1

Дата поступления: 9 сентября 2021 г.