

Научная статья

УДК 53.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67>

Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющей сталей акустическим и вихретоковым методами

Василий Васильевич Мишакин^{1✉}, Александр Викторович Гончар²,
Вячеслав Александрович Ключников³, Константин Владимирович Курашкин⁴,
Александр Евгеньевич Фомин⁵, Ольга Александровна Сергеева⁶

^{1,2,3,4} Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^{5,6} ООО «Волга-Спецгидроэнергомонтаж» – «Камспецэнерго», Набережные Челны, Россия, ^{5,6}fomin_ae@mail.ru

¹imndt31@mts-nn.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-4329-7938>

²imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9408-4206>

³imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7485-1583>

⁴imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7808-5281>

Аннотация. Исследовано влияние амплитуды деформации на интенсивность изменения упругих и магнитных свойств аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Показано, что применение комбинации вихретоковых и ультразвуковых измерений позволяет оценить состояние этой марки стали при усталостном разрушении, представлены результаты таких измерений. Предложенная техника измерения ультразвуковых параметров позволила регистрировать изменения структурного состояния материала при усталостном разрушении задолго до образования трещин. Для определения объёмной доли мартенсита, обладающего ферромагнитными свойствами, использован вихретоковый метод. Приведён алгоритм оценки количества циклов нагружения и наработки метастабильной аустенитной стали 12Х18Н10Т по данным ультразвуковых и вихретоковых измерений.

Ключевые слова: контроль, циклическое нагружение, измерение, ультразвук, усталостное разрушение, вихретоковый метод, фазовый состав, микроповреждения

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67>

The control of the condition of the stainless steel under cyclic loading by acoustic and eddy current method

Vasiliy V. Mishakin^{1✉}, Aleksandr V. Gonchar², Vyacheslav A. Klyushnikov³, Konstantin V. Kurashkin⁴,
Aleksandr E. Fomin⁵, Olga A. Sergeeva⁶

^{1,2,3,4} Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

^{5,6} Ltd Volga-Spetsgidroenergomontazh – Kamspetsenergo, Naberezhnye Chelny, Russia, ^{5,6}fomin_ae@mail.ru

¹imndt31@mts-nn.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-4329-7938>

²imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9408-4206>

³imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7485-1583>

⁴imndt31@mts-nn.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7808-5281>

Abstract. This paper presents the results of ultrasonic and eddy-current measurements of the characteristics of austenitic stainless steel AISI 321 under fatigue failure. The effect of the strain amplitude on the intensity of changes in elastic and magnetic properties is studied. The use of a combination of eddy current and ultrasonic measurements makes it possible to assess the state of steel AISI 321 under fatigue failure is shown. The technique for measuring ultrasonic parameters described in this paper allows us to register changes in the structural state of a material under fatigue failure long before the crack is formed. The eddy current method is used to determine the volume fraction of martensite with ferromagnetic properties. An algorithm is proposed for estimating the number of loading cycles and the operating time of metastable austenitic steel AISI 321 based on the data of ultrasonic and eddy current measurements.

Keywords: monitoring, cyclic loading, measurement, ultrasound, fatigue failure, eddy current method, phase composition, micro-damage

Введение. При циклическом нагружении конструкционных материалов разрушение материала происходит при напряжениях меньше предельных. Разрушение на микроуровне приводит к изменению упругих и акустических характеристик металлических сплавов. Эти изменения сначала проявляются слабо, поэтому для контроля состояния сталей на ранних стадиях разрушения требуются структурно чувствительные прецизионные измерения акустических характеристик. Кроме того, в ряде случаев циклическое нагружение нержавеющей сталей, содержащих метастабильный аустенит, приводит к образованию новых фаз, где физические свойства, например магнитные и упругие, контрастируют с матрицей материала.

В сталях аустенитного класса, содержащих метастабильный аустенит, силовое воздействие вызывает образование фазы α' -мартенсита деформации, которое приводит к существенным изменениям физических свойств материала даже при комнатной температуре [1, 2]. Образование из парамагнитной матрицы аустенита магнитной фазы ведёт к интенсивному изменению магнитных характеристик всего сплава, что позволяет с помощью магнитных и электромагнитных методов контроля определять содержание объёмной доли выделившегося α' -мартенсита.

В [3] получены характеристики петель магнитного гистерезиса для аустенитных нержавеющей сталей, подвергнутых циклическому деформированию. Определены магнитные параметры материала, наиболее чувствительные к появлению деформационного мартенсита при усталостном нагружении.

В [4] исследована взаимосвязь изменения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы с выделившейся объёмной долей мартенсита деформации при прокатке аустенитной нержавеющей стали марки AISI 304 (российский аналог – сталь марки 08X18H10).

При исследовании мартенситного превращения в аустенитных сталях, вызванного деформацией, наибольшее распространение получил вихретоковый метод. Принцип вихретокового метода основан на взаимодействии между источником внешнего электромагнитного поля и исследуемым материалом. Это взаимодействие вызывает вихревые токи в изучаемом объекте. При типичном вихретоковом контроле электрический ток с помощью возбуждающей катушки индуцируется в исследуемом образце с фиксированной частотой. В [5] показана чувствительность импеданса катушки вихретокового датчика к изменению объёмной доли содержания мартенсита деформации при усталостном нагружении аустенитной нержавеющей стали марки AISI 304. На основе проведённых исследований предложена калибровочная кривая, которая позволяет оценить долю выделившегося мартенсита деформации по изменению модуля импеданса. В [6] установлена линейная корреляция между измерениями вихревых токов и количеством аустенита при холодной прокатке аустенитных сталей марок AISI 304, AISI 316L и AISI 321.

Процесс накопления микроповреждений (микропор, микротрещин и др. дефектов) при циклическом деформирова-

нии обуславливает изменение упругих модулей, что, в свою очередь, влияет на упругие и акустические характеристики материала [7].

Модули упругости функционально связаны со скоростью распространения упругих волн в материалах. Связь модуля Юнга E и модуля сдвига μ со скоростью упругих волн выражается следующим образом [8]:

$$E = \rho V_t^2 (4V_t^2 - 3V_l^2) / (V_t^2 - V_l^2); \mu = \rho V_t^2,$$

где ρ – плотность материала; V_t , V_l – скорости распространения сдвиговой и продольной ультразвуковых волн соответственно; $V = 2h/\tau$; где h – толщина материала; τ – время распространения ультразвуковых волн.

Поскольку общее изменение упругих свойств при циклическом деформировании относительно мало, их точная оценка по данным о скорости волны затруднена из-за погрешности, вносимой при измерении толщины, особенно при измерениях в тонких пластинах. Тем не менее при современном уровне измерительной техники это изменение можно зафиксировать с достаточной точностью [9].

Современные устройства позволяют измерять времена распространения упругих волн с очень малыми относительными погрешностями (около 10^{-5}). На основе результатов этих измерений производят расчёт структурно-чувствительных характеристик материала с погрешностью порядка 10^{-4} . Например, в [10] показана чувствительность спектрально-акустических характеристик к накоплению повреждений в процессе нагружения аустенитной стали марки 12X18H10T. С помощью измерения времени распространения упругих волн определяют такие важные упругие характеристики металла, как коэффициент Пуассона и упругая анизотропия [11–14]. Результаты вихретоковых измерений, дополняющие акустические исследования, дают возможность получить более полную информацию о состоянии аустенитной стали, подвергаемой механическому нагружению.

В настоящей работе показаны возможности применения современной аппаратуры и методов определения структурно-чувствительных характеристик материала для прогнозирования циклической долговечности и относительного числа циклов при усталостном разрушении нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T при различных амплитудах деформации цикла.

Методика эксперимента. Процесс усталостного разрушения стали марки 12X18H10T исследовали ультразвуковым (УЗ) эхо-импульсным и вихретоковым методами.

На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментальной акустической установки. УЗ-дефектоскоп 1 подаёт электрические импульсы на пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) 2, который излучает в исследуемый образец 3 УЗ-сигналы. Сигналы достигают противоположной стороны образца, отражаются и возвращаются обратно в ПЭП, где преобразуются в электрические сигналы. Электрические сигналы подаются на цифровой осциллограф 4, откуда массив амплитудно-временной диаграммы в цифровом виде поступает на персональный компьютер 5.

Для проведения усталостных испытаний использовали образцы круглого сечения (диаметр рабочей зоны 8 мм). На каждом образце были изготовлены плоские параллельные площадки размером 4×18 мм с обеих сторон рабочей зоны для проведения УЗ-измерений. Образцы подвергали усталостному нагружению в области малоциклового усталости в условиях пульсирующего (отнулевого) цикла нагружения (растяжение – сжатие) при частоте нагружения 2 Гц. Задавали постоянную амплитуду деформации 0,6; 0,7; 0,8; 1,0 %.

Одноосное циклическое нагружение направлено вдоль оси X. Нагружение каждого образца проводили поэтапно. Плоскопараллельные площадки размечали на зоны, в которых проводили УЗ- и вихревые измерения до испытаний и после каждого этапа нагружения. Для измерения времени распространения продольных и сдвиговых упругих волн использовали эхо-импульсный метод. Применяли широкополосные малогабаритные совмещенные пьезоэлектрические преобразователи V156-RM (поперечная волна)

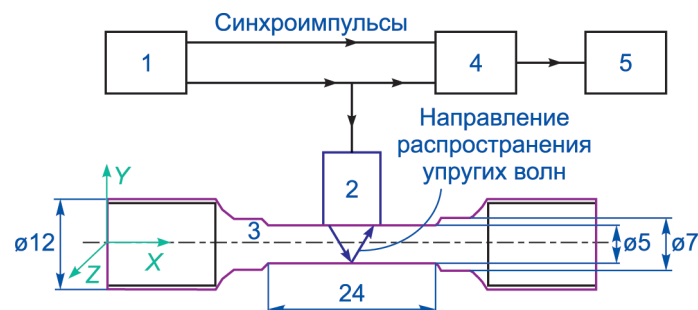


Рис. 1. Схема проведения ультразвуковых измерений:
1 – УЗ-дефектоскоп; 2 – ПЭП; 3 – исследуемый образец; 4 – цифровой осциллограф; 5 – персональный компьютер

Fig. 1. Ultrasonic measurement's scheme:
1 – ultrasonic flaw detector; 2 – piezoelectric transducer; 3 – test sample;
4 – digital oscilloscope; 5 – personal computer

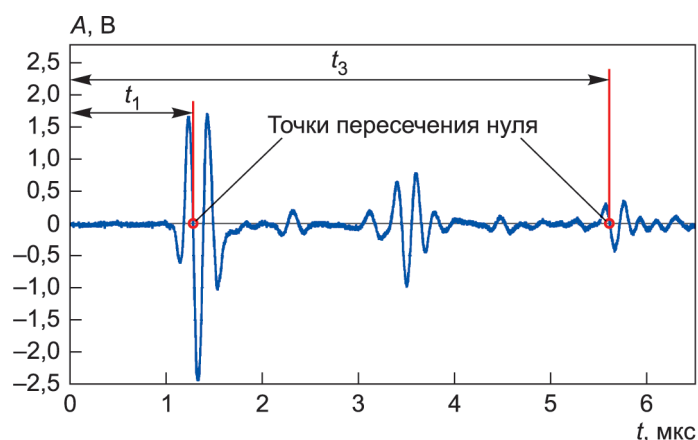


Рис. 2. Точки перехода нуля на амплитудно-временной A(t) диаграмме эхо-импульсов УЗ-волны

Fig. 2. Zero crossing points on the amplitude-time diagram A(t) of the echo pulses of the ultrasonic wave

и V110-RM (продольная волна) производства Panametrics (США). Центральная частота ПЭП составляла около 5 МГц, диаметр рабочей зоны – 6 мм. Для обеспечения передачи УЗ-волн из преобразователя в образец служили эпоксидная смола без отвердителя и специальный гель «Медиагель» при возбуждении сдвиговых и продольных волн соответственно. Продольные и поперечные волны распространялись вдоль оси Z. Поляризация поперечных волн была направлена вдоль осей X или Y.

В настоящей работе для генерации электрических импульсов, возбуждающих пьезоэлектрический преобразователь, использовали серийно выпускаемый УЗ-дефектоскоп А1212 МАСТЕР (ООО «АКС», Россия). Рабочие частоты А1212 МАСТЕР составляли от 0,5 до 15,0 МГц. Для получения временной развертки сигналов от пьезоэлектрического преобразователя применяли цифровой осциллограф ЛА-н1USB (ООО «Руднев-Шилиев», Россия) и программное обеспечение сбора данных ADCLab (ООО «Руднев-Шилиев», Россия). Частота дискретизации цифрового осциллографа составляла 1 ГГц, разрешение развертки по времени составляло 1 нс. Полученную временную развертку сохраняли в файл данных для анализа и обработки в программе MathCAD. Для повышения точности измерений данные интерполировали сплайнами.

Типичная амплитудно-временная диаграмма регистрируемых акустических сигналов представлена на рис. 2. После обработки данных вышеуказанными методами погрешность измерения времени составляла не более 1–2 нс. Время распространения упругих волн $t = 0,5(t_3 - t_1)$ измеряли между первым t_1 и третьим t_3 отражёнными импульсами по точкам пересечения нуля между максимумом и минимумом в импульсе.

Скорости упругих волн связаны с модулями упругости и плотностью материала ρ выражениями

$$V_{31}^2 = c_{55}/\rho; V_{32}^2 = c_{44}/\rho; V_{33}^2 = c_{33}/\rho,$$

где V_{33} – скорость продольной упругой волны; V_{31} , V_{32} – скорости поперечных упругих волн, поляризованных вдоль и поперёк направления прокатки; c_{33} , c_{44} , c_{55} – модули упругости в матричном представлении.

Упругие модули соотносятся как

$$c_{33}/c_{44} = V_{33}^2/V_{32}^2 = \tau_{32}^2/\tau_{33}^2;$$

$$c_{33}/c_{55} = V_{33}^2/V_{31}^2 = \tau_{31}^2/\tau_{33}^2.$$

Для изотропного материала $c_{44} = c_{55}$. У многих материалов отмечается анизотропия упругих свойств: $c_{44} \neq c_{55}$. В общем случае в твёрдом теле распространяются три объёмных волны – одна продольная и две поперечных, поляризованных вдоль и поперёк осей упругой анизотропии [15].

Для описания изменения упругих и акустических свойств материала в настоящей работе использовали соотношение квадрата скорости продольной волны L и квадрата скорости поперечной волны V_t в приближении для изотропного материала:

$$P = V_L^2/V_t^2 \approx 1/2 [V_{33}^2/V_{31}^2 + V_{33}^2/V_{32}^2] = 1/2 [c_{33}/c_{55} + c_{33}/c_{44}].$$

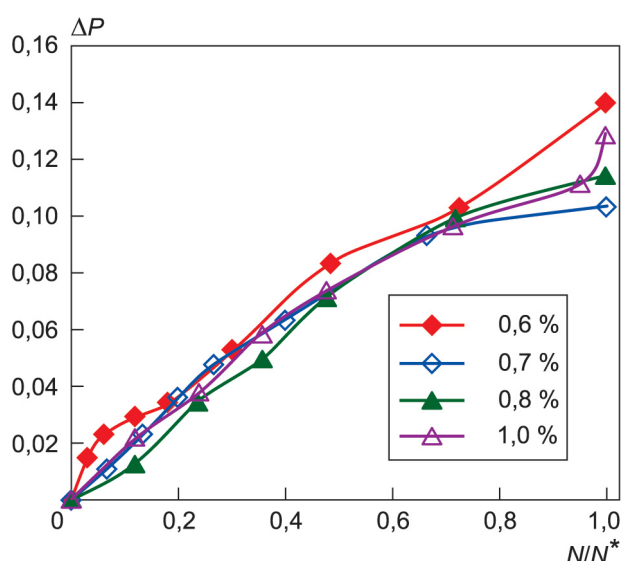


Рис. 3. Изменение параметра P в процессе циклического нагружения: N/N^* – наработка, где N – текущее количество циклов, N^* – число циклов при разрушении

Fig. 3. Change of parameter P during cyclic loading: N/N^* – operating time, where N – current number of cycles, N^* – number of cycles during destruction

Исследование изменения магнитных характеристик, связанных с образованием α' -мартенсита, проводили с помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М» производства ООО «НПЦ «Крокус» (Россия). Прибор разработан для определения содержания магнитной фазы в аустенитных сталях и откалиброван изготовителем по образцам с известным содержанием феррита. Содержание магнитной фазы измеряли при взаимодействии магнитного поля, создаваемого катушкой датчика, с объемной долей магнитной фазы. При магнитной фазе во второй катушке возникало напряжение, которое преобразовывалось в процентное содержание этой фазы. Относительная погрешность измерения не превышала 5 %.

Результаты экспериментальных исследований. В результате УЗ-исследований определили соотношения модулей c_{33}/c_{44} , c_{33}/c_{55} до испытаний и после каждого этапа нагружения. С использованием полученных данных рассчитали изменение параметра P в процессе циклического нагружения при разных амплитудах нагружения (рис. 3).

Выяснили, что связь наработки N/N^* (где N – текущее количество циклов, N^* – число циклов при разрушении) с изменением параметра P аппроксимировалась с высоким коэффициентом корреляции следующим выражением:

$$N/N^* = k_0 + k_1 \Delta P + k_2 \Delta P^2, \quad (1)$$

где $k_0 = -0,015$; $k_1 = 20,9$; $k_2 = 269$.

На рис. 4 приведена связь наработки с расчётными значениями $N/N^*_{\text{расч}}$, вычисленными из (1).

Полученные зависимости позволили оценить наработку N/N^* по данным акустических измерений. Коэффициент корреляции составил более 0,98.

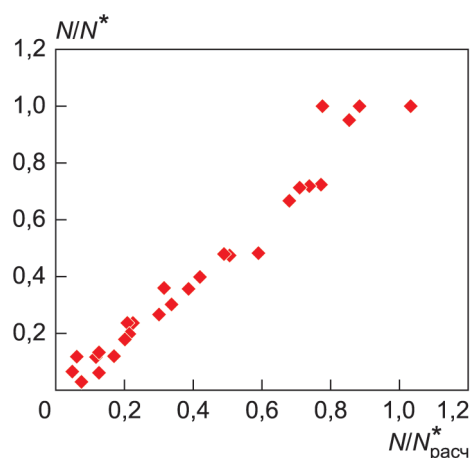


Рис. 4. Связь наработки N/N^* с расчётными значениями $N/N^*_{\text{расч}}$

Fig. 4. The relation between operating time N/N^* and calculated values $N/N^*_{\text{расч}}$

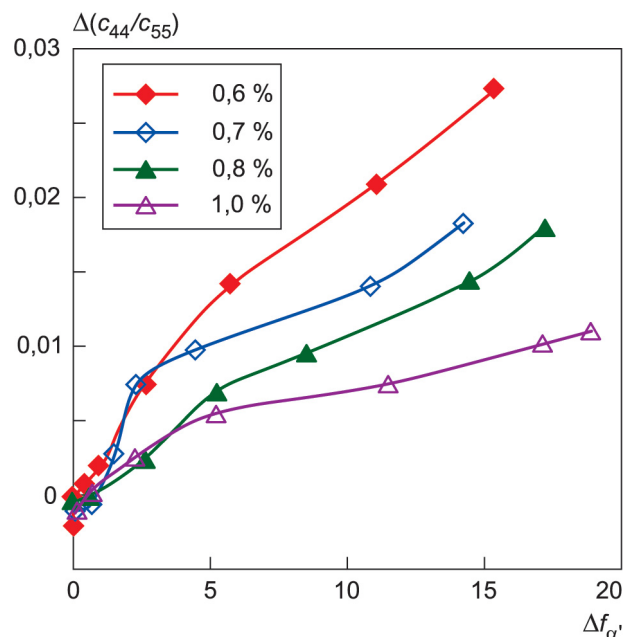


Рис. 5. Зависимости изменения c_{44}/c_{55} от изменения объемной доли α' -мартенсита $f_{\alpha'}$

Fig. 5. Dependences of the change in c_{44}/c_{55} on the change in the volume fraction of α' -martensite $f_{\alpha'}$

На рис. 5 показана связь изменения соотношения c_{44}/c_{55} с изменением объемной доли α' -мартенсита $f_{\alpha'}$ для образцов, подверженных циклическому нагружению с различной амплитудой полной деформации цикла. Кривые имеют монотонный вид и хорошо разделяются.

Исследования показали, что количество циклов нагружения связано с изменением соотношения c_{44}/c_{55} и объемной доли магнитной фазы $f_{\alpha'}$ следующим выражением:

$$N = k_{0N} + k_{1N} \Delta c_{44}/c_{55} + k_{2N} \Delta f_{\alpha'} + k_{3N} \Delta c_{44}/c_{55} \Delta f_{\alpha'}, \quad (2)$$

где $k_{0N} = 50$; $k_{1N} = 501997$; $k_{2N} = -528$; $k_{3N} = 20875$.

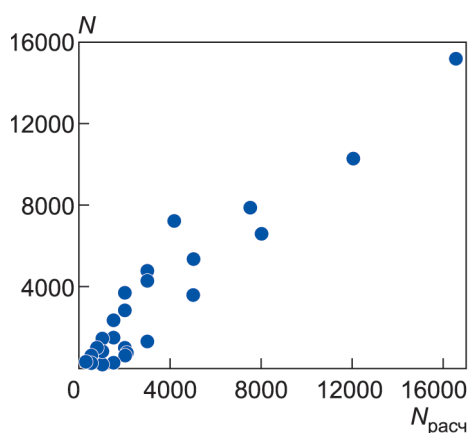


рис. 6. Связь количества циклов N с расчётными значениями $N_{расч}$

Fig. 6. The relation between number cycles N and calculated values N_{est}

Зависимость количества циклов N и расчётного $N_{расч}$, полученного с помощью выражения (2), приведена на рис. 6. Коэффициент корреляции составил более 0,95.

Заключение. Структурно чувствительные измерения характеристик сталей, связанные с изменениями фазового состава и накоплением микрповреждений, осуществимы с помощью прецизионного измерения времени распространения продольных и поперечных упругих волн.

Применяемая схема ультразвуковых измерений и обработки полученных данных позволяет фиксировать изменение упругих характеристик материала аустенитной стали марки 12X18H10T в процессе усталостного разрушения. Для получения дополнительной информации о состоянии материала использовался вихретоковый метод.

Приведён алгоритм оценки количества циклов нагружения и наработки материала по данным ультразвуковых и вихретоковых измерений. Исследования показали, что расчётные характеристики усталостного нагружения совпали с экспериментальными данными. Выявлены связи усталостных характеристик метастабильной аустенитной стали с упругими характеристиками металла и объёмной долей магнитной фазы, определённой с помощью вихретокового измерителя. Эти связи дали возможность оценить состояние циклически деформированного материала.

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

Список литературы

1. Paul S. K., Sivaprasad S., Dhar S., Tarafder S., *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2010.06.016>
2. Ye D., Xu Y., Xiao L., Cha H., *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no. 16–17, pp. 4092–4102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.027>
3. Niffenegger M., Leber H. J. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 377, no. 2, pp. 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.03.007>
4. Mumtaz K., Takanashi S., Echigoya J., Kamada Y., Zhang L. F., Kikuchi H., Ara K., Sato M., *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 85–97. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000017761.64839.fc>

5. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N., *Research in Nondestructive Evaluation*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 112–126. <https://doi.org/10.1080/09349840903427854>

6. Khan S. H., Ali F., Khan N. A., Iqbal M. A., *Computational Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 4, pp. 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.034>

7. Салганик Р. Л. Механика тел с большим числом трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1973. № 4. С. 149–158.

8. Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие. Минск: Высшая школа, 1987. 271 с.

9. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.

10. Углов А. Л., Хлыбов А. А., Пичков С. Н., Шишулин Д. Н. Акустический метод оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 3–10.

11. Мишакин В. В., Ключников В. А., Гончар А. В. Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 32–36.

12. Гончар А. В., Мишакин В. В., Ключников В. А., Курашкин К. В. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 4. С. 518–521. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.04.44310.1828>

13. Мишакин В. В., Митенков Ф. М., Ключников В. А. Разработка акустического метода оценки степени деградации стали 08X18H10T на ранних стадиях усталостного разрушения // Проблемы прочности. 2014. № 5. С. 103–108.

14. Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, 4. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0541-x>

15. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чук Б. Ультразвуковые методы в физике твёрдого тела: Пер с англ. М.: Мир, 1972. 307 с.

References

1. Paul S. K., Sivaprasad S., Dhar S., Tarafder S. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2010.06.016>
2. Ye D., Xu Y., Xiao L., Cha H. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no. 16–17, pp. 4092–4102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.027>
3. Niffenegger M., Leber H. J. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 377, no. 2, pp. 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.03.007>
4. Mumtaz K., Takanashi S., Echigoya J., Kamada Y., Zhang L. F., Kikuchi H., Ara K., Sato M., *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 1, pp. 85–97. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000017761.64839.fc>
5. Shaira M., Guy P., Courbon J., Godin N. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 112–126. <https://doi.org/10.1080/09349840903427854>
6. Khan S. H., Ali F., Khan N. A., Iqbal M. A. *Computational Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 4, pp. 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.01.034>
7. Salganik R. L., *Izv. Akad. Nauk SSSR. Mekh. Tverd. Tela*, 1973, no. 4, pp. 149–158 (in Russian).

8. Aleshin N. P., Lupachev V. G., *Ultrazvukovaya defektoskopiya: Spravochnoe posobie*, Minsk, Vyshaishaya Shkola Publ., 1987, 271 p. (in Russian).
9. Murav'yev V. V., Zuyev L. B., Komarov K. L., *Skorost' zvuka i struktura staley i splavov*, Novosibirsk, Nauka Publ., 1996, 184 p. (in Russian).
10. Uglov A. L., Khlybov A. A., Pichkov S. N., Shishulin D. N., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, pp. 53–59. <https://doi.org/10.1134/S106183091602008X>
11. Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V., *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 665–668. <https://doi.org/10.1134/S1063784215050163>
12. Gonchar A. V., Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Kurashkin K. V., *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 537–541. <https://doi.org/10.1134/S1063784217040089>
13. Mishakin V. V., Mitenkov F. M., Klyushnikov V. A., *Strength of Materials*, 2014, vol. 46, no. 5, pp. 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9599-6>
14. Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, 4. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0541-x>
15. Rohn Truell, Charles Elbaum, Bruce B. Chick, *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*, New York, London, Academic Press, 1969, 478 p.

Статья поступила в редакцию 21.09.2020; принята к публикации 21.10.2020.