

УДК 621.179

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ СТАЛИ 08X18N10T ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

*Хлыбов А.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Материаловедение, технологии материалов
и термическая обработка металлов» (hlybov_52@mail.ru)*

*Углов А.Л., д.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий сектором научно-исследовательского
центра контроля и диагностики (auglov@list.ru)*

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
(603022, Россия, Н.Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. Анализ условий эксплуатации ряда конструкций атомной энергетики в условиях малоциклового усталости показал, что для них является недопустимым образование макротрещины. Условие обеспечения безопасной эксплуатации требует получения достоверной информации о состоянии материала на стадии накопления рассеянных микрповреждений. Выявлено, что изменение структуры, физико-механических характеристик образцов из стали 08X18N10T приводит к изменению параметров упругих волн. Предложенный диагностический параметр, определяемый через время распространения упругих волн, позволяет оценить состояние материала контролируемой конструкции. Предлагаемый критерий может быть использован для измерений на реальных объектах, эксплуатируемых в условиях малоциклового усталости.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, диагностика, упругие волны, структура, модули упругости, ресурс, твердость, аустенит, мартенсит.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-185-190

В процессе эксплуатации некоторые элементы конструкций работают в условиях малоциклового усталости. На стадии до зарождения и развития макротрещины выделяют период, связанный с изменением структуры, зарождением и накоплением рассеянных микрповреждений [1, 2]. Процесс накопления повреждений начинается практически сразу после приложения переменной нагрузки, протекает скрытно, практически без видимых внешних признаков. Скрытые процессы деградации материала приводят к изменению физико-механических характеристик: модулей упругости, прочностных и других характеристик. Завершается период накопления повреждений образованием макротрещины. При этом по условиям безопасной эксплуатации для некоторых конструкций макротрещина не допускается [3]. Более того, ставится задача оценки степени деградации материала в процессе его эксплуатации [4].

Процесс разрушения зависит от множества факторов, теоретически учесть вклад каждого из которых практически невозможно [5 – 7]. Этим объясняется достаточно сильный разброс как расчетных, так и экспериментальных данных. В задачах оценки степени деградации контролируемого материала используются методы неразрушающего контроля, в частности акустические [8 – 12].

Возможность использования упругих волн в задачах диагностики по результатам экспериментальных исследований влияния малоциклового усталостного нагружения образцов из стали 08X18N10T на их физико-

механические и акустические характеристики является целью данной работы.

Проведение испытаний, включая изготовление образцов, проводили в соответствии с ГОСТ 25.502 – 79. Испытывались цилиндрические образцы из стали 08X18N10T, диаметр рабочей части 12 мм, длина 40 мм (рис. 1). На рабочих поверхностях образцов для установки пьезоэлектрических преобразователей были выполнены две плоскопараллельные лыски с размерами 40×3 мм.

Химический состав исследуемой стали, % (по массе): 0,08 С; 18 Cr; 9,5 Ni; 0,5 Ti.

Условия проведения испытаний:

- циклическое (симметричный цикл), жесткое изотермическое нагружение (растяжение-сжатие) с постоянной амплитудой полной деформации $\varepsilon_p = 0,1\%, 0,2\%, 0,3\%$;

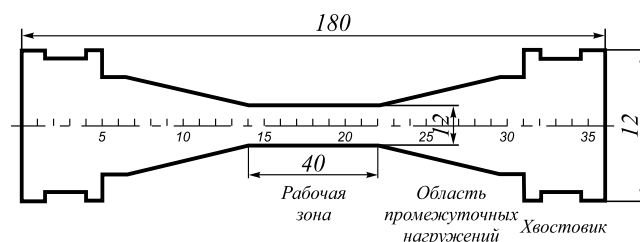


Рис. 1. Образец для малоцикловых испытаний, сталь 08X18N10T

Fig. 1. The model for low-cycle tests, 08Cr18Ni10Ti steel

- скорость деформирования рабочей части образца $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$;
- температура при испытаниях $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Испытания проводились до появления видимой трещины.

Микроструктуру изучали по снимкам, полученным с использованием цифровой камеры Canon на оптическом микроскопе МИМ-8.

Для измерения акустических характеристик материала использовалась многофункциональная спектрально-акустическая система «Астрон» [10, 13]. В системе реализован импульсный метод измерения параметров упругих волн. Измерялось время прохождения (задержка) продольных (t_3), сдвиговых (t_1, t_2) волн и поверхностных волн Рэлея (t_3). Точность измерения временных параметров $2 \cdot 10^{-9}$ с. Сдвиговыми волнами измерялась задержка в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

- вектор поляризации сдвиговых волн направлен вдоль оси образца, измеряемая задержка t_1 ;
- вектор поляризации направлен перпендикулярно оси образца, измеряемая задержка t_2 .

Скорость C_i упругой волны в исследуемом образце определяли по уравнению

$$C_i = \frac{2h}{t_i}, \quad (1)$$

где h – толщина образца, м.

Измерения производились в режиме излучения и приема (прием и излучение упругих волн осуществляется одним датчиком), поэтому в уравнении (1) путь принимался равным $2h$.

Согласно принятым обозначениям:

C_1 , м/с – скорость распространения сдвиговых волн с вектором поляризации вдоль оси образца;

C_2 , м/с – скорость распространения сдвиговых волн с вектором поляризации перпендикулярно оси образца;

C_3 , м/с – скорость распространения продольных волн.

Погрешность измерения скоростей составляла 0,08 % (при толщине образцов 10 мм). Погрешности определения используемых информативных параметров приведены в таблице.

В процессе испытаний регистрировались: число циклов N , деформация ϵ_p , площадь петли гистерезиса $\Delta W_{\text{ц}}$, толщина образцов h . Нагружение блочное – длительность блока 20 % от расчетного числа циклов до разрушения. При проведении измерений нагрузка сбрасывалась до нуля, образец вынимали из испытательной машины.

Для анализа результатов акустических исследований использовался акустический диагностический параметр:

$$D = D1 + D2; \quad D1 = \frac{C_3}{C_1} - 1; \quad D2 = \frac{C_3}{C_2} - 1.$$

Выражения для $D1$ и $D2$ запишем через задержки упругих волн:

$$D1_i = \frac{t_1}{t_3} - 1; \quad D2_i = \frac{t_2}{t_3} - 1. \quad (2)$$

Индекс t соответствует времени измерения контролируемых параметров.

Также определялся параметр акустической анизотропии A :

$$A = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1 - C_2} = \frac{2(t_1 - t_2)}{t_1 + t_2}. \quad (3)$$

При решении прикладных задач диагностики измерение толщины с требуемой точностью для большинства реальных объектов не представляется возможным. Поэтому определенные таким образом диагностические акустические характеристики $D, D1, D2, A$, не зависящие от трудноизмеримой толщины материала, могут быть использованы для измерения на реальном объекте.

На рис. 2 представлена микроструктура образцов из стали 08X18H10T. Металл в состоянии поставки – аустенит (рис. 2, б). В процессе нагружения зарождается трещина. На рис. 2, а показана усталостная трещина в образце после испытаний ($\Delta\epsilon = 0,3$; $N^* = 900$ циклов), на рис. 2, в – поверхностный слой с многочисленными не распространяющимися микротрещинами [14, 15]. На рис. 2, г представлена микроструктура образцов после разрушения в плоскости, перпендикулярной плоскости разрушения, на рис. 2, д – на расстоянии 5 мм от поверхности образца.

Свойства поверхностного слоя отличаются от свойств металла в толщине. Так микротвердость, измеренная по ГОСТ 9450-76 нагрузкой 50 гс, дает следующие результаты: микротвердость в поверхностном слое 440 МПа, на глубине более 1 мм 330 МПа. Микротвердость в исходном состоянии 280 – 300 МПа.

В процессе усталостной наработки изменяются механические характеристики. Изменение механических характеристик связано с образованием мартенсита деформаций, накоплением повреждений. Например, в рабочей

Погрешности измерений информативных параметров

Measurement errors of informative parameters

Параметр	h , мм	t_3 , нс	C_3 , м/с	$t_{1,2}$, нс	$C_{1,2}$, м/с	A	D	t_R , нс
Погрешность	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$	± 2	± 4	± 2	± 2	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 9 \cdot 10^{-4}$	± 2

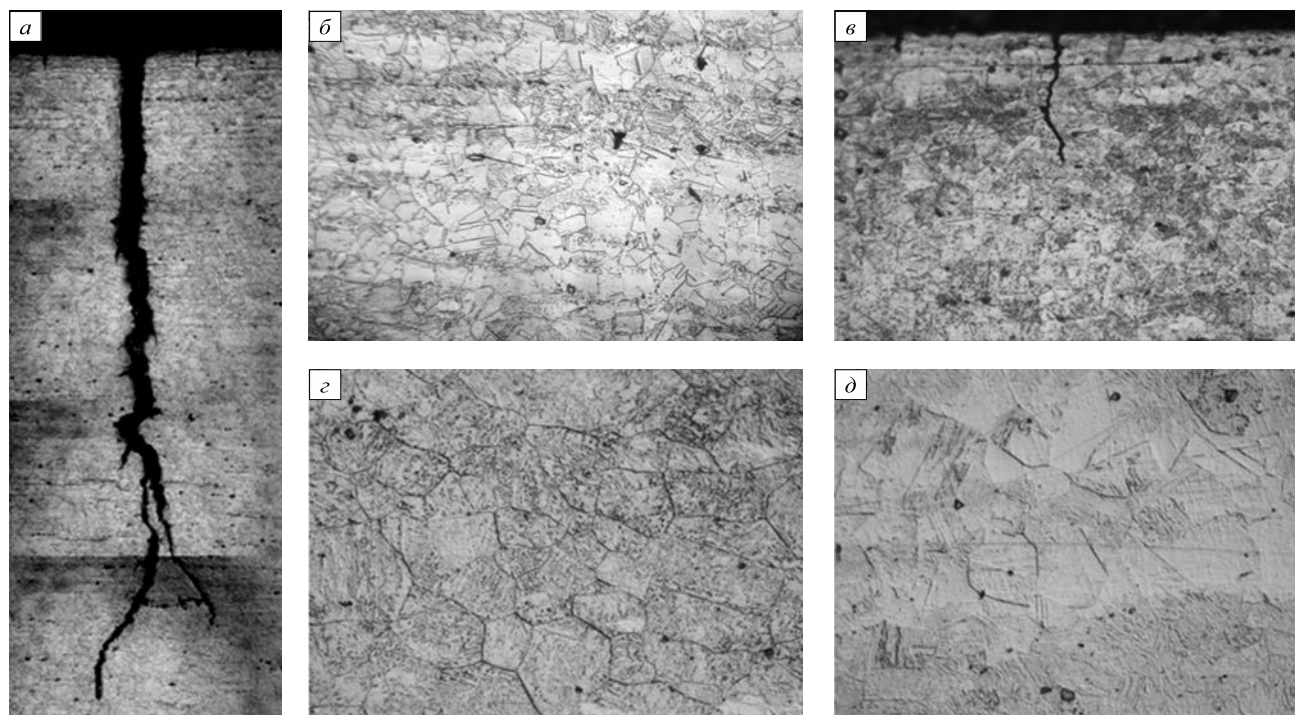


Рис. 2. Микроструктура образцов из стали 08Х18Н10Т, $\Delta\varepsilon = 0,3$:
 а – усталостная трещина, $\times 100$; б – исходное состояние, $\times 200$; в – поверхностные трещины, $\times 200$; г – поверхность, $\times 500$;
 д – расстояние 5 мм от поверхности, $\times 500$

Fig. 2. Microstructure of the samples of 08Cr18Ni10Ti steel, $\Delta\varepsilon = 0,3$:
 а – fatigue crack, $\times 100$; б – initial state, $\times 200$; в – surface cracks, $\times 200$; г – surface, $\times 500$;
 д – the distance of 5 mm from the surface, $\times 500$

зоне после разрушения начальное значение твердости 175 МПа увеличивается до 300 МПа. В условиях жесткого цикла нагружения толщина образцов в процессе испытаний увеличивается при неизменной длине рабочей области. Изменение измеряемых параметров в зависимости от числа циклов нагружения показано на рис. 3 ($\Delta\varepsilon = 0,3$), для других параметров цикла ($\varepsilon = 0,2$; 0,1 %) оно качественно совпадает с приведенными результатами и в большинстве случаев в данной работе не приводится.

На рис. 3, а показано изменение объема в процессе испытаний при различных значениях ε . Результаты гидростатического взвешивания показали, что плотность уменьшается. Плотность стали в неповрежденном состоянии 7920 кг/м³, в зоне разрушения плотность снижается до 7730 кг/м³, что соответствует ее уменьшению до 4 %.

Наблюдается упрочнение материала (рис. 3, б) (амплитуда напряжения увеличивается от 200 до 770 МПа для $\Delta\varepsilon = 0,3$). Изменение приведенных акустических характеристик в соответствии с уравнениями (2), (3) представлено на рис. 3, в.

Используя известные соотношения теории упругости, определим модули упругости E , G через скорости упругих волн:

$$E = \frac{\rho C_{1,2}^2 (3C_3^2 - 4C_{1,2}^2)}{C_3^2 - C_{1,2}^2}; \quad G = \rho C_{1,2}^2; \quad \nu = \frac{C_3^2 - 2C_{1,2}^2}{2C_3^2 - 3C_{1,2}^2}, \quad (4)$$

где G , E , ν – модуль сдвига, модуль Юнга, коэффициент Пуассона соответственно.

Полученные значения модуля Юнга представлены на рис. 3, г. На рис. 3, в, г ряд 1 соответствует измерениям вдоль оси образца, ряд 2 – перпендикулярно оси образца. Модули упругости относятся к характеристикам, чувствительным к состоянию материала образцов. Величина модуля упругости определяется межатомным взаимодействием. Дефекты кристаллической решетки, ослабляющие межатомную связь, приводят к уменьшению модулей. На стадии накопления рассеянных микроповреждений их размеры малы, а сами микроповреждения равномерно распределены по объему материала. Результаты измерений модулей упругости акустическим методом и значения модулей, полученных обработкой данных на кривой растяжения, совпадают.

В начальном состоянии материал является изотропным, скорость сдвиговых волн, измеренная вдоль и перпендикулярно оси образца, одна и та же. В процессе усталостного нагружения изменение скоростей сдвиговых волн вдоль и поперек оси образца различно. Это свидетельствует о том, что накопление повреждений в материале приводит к анизотропии.

Анизотропия может быть связана с тем, что поврежденность структуры, включая микротрещины, образовавшиеся на стадии растяжения, при сжатии могут постепенно смыкаться. При температурах $< 0,5 T_{пл}$, чаще

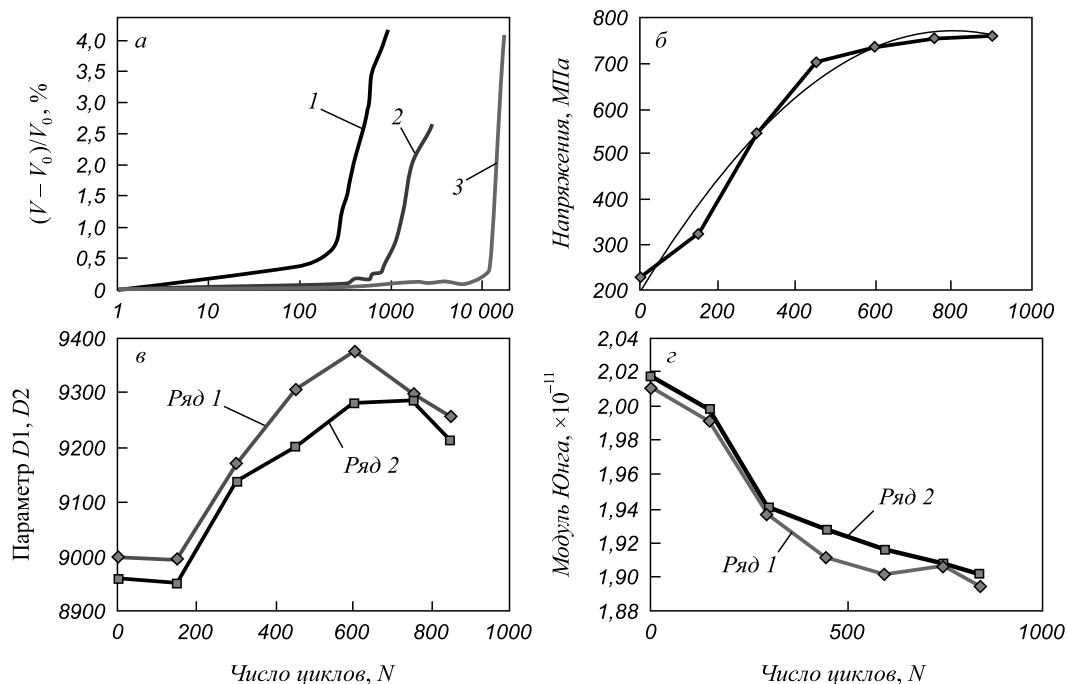


Рис. 3. Зависимость характеристик стали 08X18Ni10T от числа циклов:
 а – изменение объема образца при $\epsilon = 0,3\%$ (1), $\epsilon = 0,2\%$ (2), $\epsilon = 0,1\%$ (3); б – изменение напряжений ($\Delta\epsilon = 0,3$);
 в – акустические параметры D1, D2 ($\Delta\epsilon = 0,3$); з – модуль Юнга ($\Delta\epsilon = 0,3$)

Fig. 3. Dependence of the characteristics of 08Cr18Ni10Ti steel from the number of cycles:
 а – the change in sample volume at $\epsilon = 0,3\%$ (1), $\epsilon = 0,2\%$ (2), $\epsilon = 0,1\%$ (3); б – change in voltage ($\Delta\epsilon = 0,3$);
 в – acoustic parameters D1, D2 ($\Delta\epsilon = 0,3$); з – Young's modulus ($\Delta\epsilon = 0,3$)

всего трещины не залечиваются, а лишь частично смыкаются, приобретая эллипсовидную форму, вытянутую перпендикулярно действующей нагрузке. Суммарная площадь повреждений в разных направлениях будет различна, что собственно и подтверждается результатами акустических измерений. Таким образом, по результатам акустических измерений можно оценить поврежденность материала в различных направлениях.

На рис. 4 представлена зависимость накопления поврежденности (акустические параметры приведены к значению 1, соответствующему 100 %-ной выработке ресурса) от приведенного числа циклов N/N^* . Крити-

ческой наработке N^* соответствует появление трещины порядка 1 мм.

Из рис. 4 видно, что поврежденность, измеренная по параметрам поверхностных волн (ПАВ), изменяется быстрее по сравнению с поврежденностью, измеренной для толщины металла (D). Из этого следует, что поверхностная волна может быть использована в качестве опережающего индикатора накопленных повреждений в контролируемой конструкции.

После достижения предельного состояния (появление усталостной трещины) испытания прекращали. Образцы после обнаружения трещины фрезеровались

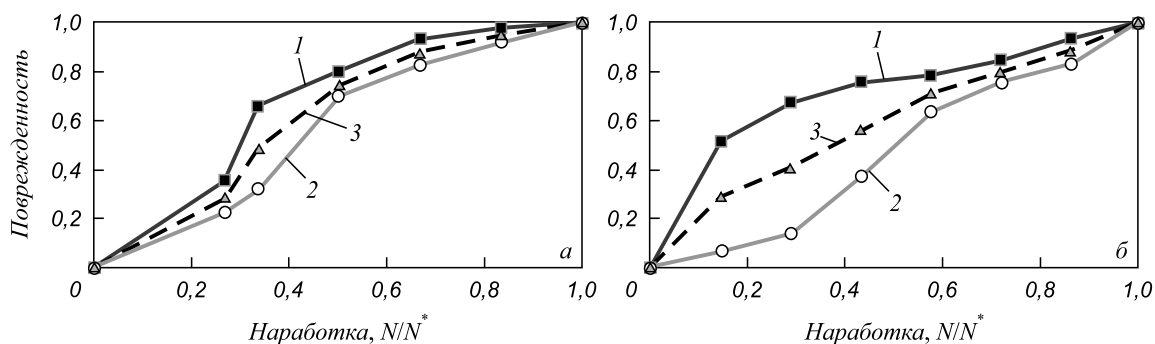


Рис. 4. Зависимость поврежденности образца от наработки, сталь 08X18Ni10T:
 1 – ПАВ; 2 – D; 3 – средняя; а – $\Delta\epsilon = 0,3$, $N^* = 900$; б – $\Delta\epsilon = 0,2$, $N^* = 2800$

Fig. 4. Dependence of the distortion of the sample from experience, 08Cr10Ni10Ti steel:
 1 – surfactants; 2 – D; 3 – medium; а – $\Delta\epsilon = 0,3$, $N^* = 900$; б – $\Delta\epsilon = 0,2$, $N^* = 2800$

до толщины, равной толщине проточки. Полученная поверхность разбивалась на зоны, расположенные с интервалом 5 мм. На рис. 1 показано расположение точек измерения. Рабочая часть образца располагалась между зонами № 15 и № 25, ее длина равна 40 мм. Распределение твердости и параметра $D1$, $D2$ по длине образца приведено на рис. 5.

На примере этих образцов видно, что поврежденность в области захвата равна нулю. В этой области при испытаниях отсутствуют нагрузки. Регистрируемые параметры совпадают с результатами начальных измерений. В рабочей зоне наблюдается максимальная поврежденность. Такой образец может служить в качестве эталона для настройки измерительной аппаратуры.

Выводы. При малоцикловой усталости в образцах из стали 08X18H10T протекают необратимые процессы, приводящие к изменению структуры, физико-механических и акустических характеристик материала.

Имеется однозначное соотношение между величиной накопленных повреждений и изменением скорости упругих волн, которое может быть использовано в задачах диагностики технических объектов.

Существуют акустические параметры D , $D1$, $D2$, A , определяемые через задержки упругих волн, которые, с одной стороны, чувствительны к уровню усталостных повреждений, с другой – не зависят от толщины образцов в зоне измерений и, следовательно, могут быть использованы для реальных объектов.

Диагностический параметр, определяемый через задержки поверхностной волны, меняется быстрее, чем параметры, использующие продольные и сдвиговые волны. Совместное использование различных типов упругих волн в задачах диагностики усталостного разрушения повышает надежность и достоверность результатов контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
2. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
3. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.
4. Горицкий В. М. Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.
5. Казанцев А.Г. Малоцикловая усталость при сложном термомеханическом нагружении. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 248 с.
6. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 389 с.
7. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Пронин А.И., Чернышов Е.А. Прогнозирование прочности и долговечности материалов дета-

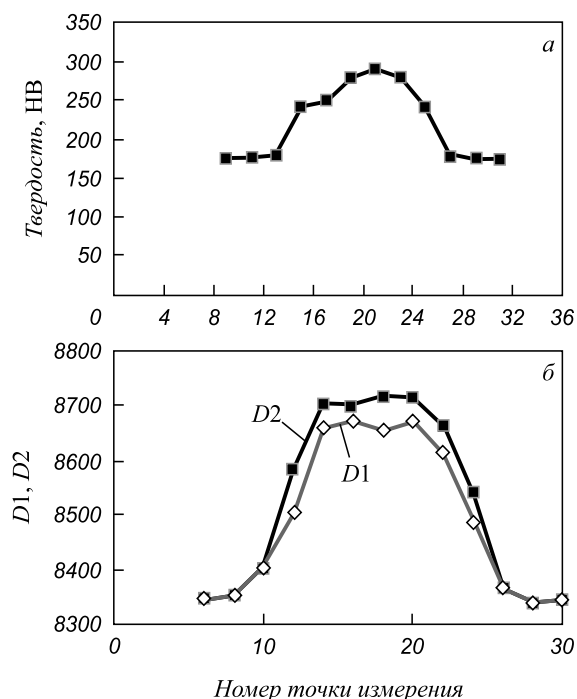


Рис. 5. Изменение измеряемых параметров по длине образца $\Delta\varepsilon = 0,3$:

a – распределение твердости; b – распределение параметра $D1$, $D2$

Fig. 5. Changes in the measured parameters along the length of the sample $\Delta\varepsilon = 0.3$:

a – hardness distribution; b – the distribution of the parameter $D1$, $D2$

- лей машин и конструкций с учетом частоты циклического нагружения // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 9. С. 32 – 37.
8. Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / Отв. ред. Ф.М. Митенков. – М.: Наука, 2009. – 280 с.
9. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 183 с.
10. Хлыбов А.А., Васильев В.Г., Углов А.Л. Определение физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 12. С. 46 – 49.
11. Скуднов В.А., Чегуров М.К., Хлыбов А.А. Поведение структуры и повреждаемость толстолистовой стали 12X18H10T в конструкции колонн при производстве пентакарбонила железа // Контроль. Диагностика. 2007. № 12. С. 49 – 54.
12. Куценко А.Н., Шереметиков А.С., Анисимов В.А. Контроль напряжений с помощью поверхностных акустических волн Рэлея // Дефектоскопия. 1990. № 7. С. 95 – 96.
13. Хлыбов А.А. Оценка напряженного состояния гильотинных ножей, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 4. С. 54 – 57.
14. Паршин А.М. Структура и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в судостроении. – Л.: Судостроение, 1972. – 288 с.
15. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1967. – 798 с.

Поступила 4 февраля 2015 г.

THE RESEARCH OF ACCUMULATION OF FATIGUE DAMAGE IN SAMPLES OF 08Cr18Ni10Ti STEEL AT LOW-CYCLE FATIGUE

A.A. Khlybov, A.L. Uglov

Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Alexeev,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The analysis of the service conditions of nuclear power constructions in case of low-cycle fatigue showed, that appearance of macrocrack is inadmissible. The conditions of safe operation require collecting of reliable information about material's state at the stage of damage accumulation of dispersed microcracks. It was found that a change of the structure, physical and mechanical properties of specimen of steel 08Cr18Ni10Ti leads to changes of elastic waves parameters. The authors suggested diagnostic parameter definable by the time of propagation of elastic waves, that makes possible to estimate material state of supervised construction. The proposed criterion can be used for measuring on real objects that are exploited in low-cycle fatigue.

Keywords: low cycle fatigue, diagnosis, elastic wave, structure, modules of elasticity, resource, hardness, austenite, martensite.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-3-185-190

REFERENCES

1. Terent'ev V.F. *Ustalost' metallicheskih materialov* [Fatigue of metallic materials]. Moscow: Nauka, 2003, 254 p. (In Russ.).
2. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [Physical nature of fracture of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.).
3. Mitenkov F.M., Kaidalov V.B., Korotkikh Yu.G., Panov V.A., Pichkov S.N. *Metody obosnovaniya resursa yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Justification methods of the resource of nuclear power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 448 p. (In Russ.).
4. Goritskii V. M. *Diagnostika metallov* [Diagnostics of metals]. Moscow: Metallurgizdat, 2004. 402 p. (In Russ.).
5. Kazantsev A.G. *Malotsiklovaya ustalost' pri slozhnom termomekhanicheskom nagruzhении* [Low cycle fatigue under complex thermomechanical strain]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 248 p. (In Russ.).
6. Karzov G.P., Margolin B.Z., Shvetsova V.A. *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Fiziko-mechanical modeling of fracture]. St. Petersburg: Politehnika, 1993, 389 p. (In Russ.).
7. Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Pronin A.I., Chernyshov E.A. Machine details and construction materials' strength and creep life prediction with account for loading cycles frequency. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 9, pp. 32–37. (In Russ.).
8. Uglov A.L., Erofeev V.I., Smirnov A.N. *Akusticheskii kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatatsii* [Acoustic testing of equipment during manufacturing and operation]. Mitenkov F.M. ed. Moscow: Nauka. 2009, 280 p. (In Russ.).
9. Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Skorost' zvuka i struktura stalei i splavov* [Speed of sound and structure of steels and alloys]. Novosibirsk: Nauka, 1996, 183 p. (In Russ.).
10. Khlybov A.A., Vasil'ev V.G., Uglov A.L. Determination of physical and mechanical properties of the samples subjected to radiation. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2007, vol. 73, no. 12, pp. 46–49. (In Russ.).
11. Skudnov V.A., Chegurov M.K., Khlybov A.A. The behavior of the structure and defectiveness of 12Cr18Ni10Ti steel plate in the design of columns in the production of iron pentacarbonyl. *Kontrol'. Diagnostika*. 2007, no. 12, pp. 49–54. (In Russ.).
12. Kutsenko A.N., Sheremetikov A.S., Anisimov V.A. Control of stresses by surface acoustic Rayleigh waves. *Defektoskopiya*. 1990, no. 7, pp. 95–96. (In Russ.).
13. Khlybov A.A. Evaluation of the stress state of heat treated guillotine knives. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2009, vol. 75, no. 4, pp. 54–57. (In Russ.).
14. Parshin A.M. *Struktura i plastichnost' nerzhavayushchikh i zharnoprochnykh stalei i splavov, primenyaemykh v sudostroenii* [The structure and plasticity of stainless and heat resistant steels and alloys used in shipbuilding]. Leningrad: Sudostroenie, 1972. 288 p. (In Russ.).
15. Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow: Metallurgiya, 1967. 798 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.A. Khlybov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals" (hlybov_52@mail.ru)

A.L. Uglov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher (auglov@list.ru)

Received February 04, 2015