

УДК 620.179.16

DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44

## АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ, НАГРУЖЕННЫХ ИЗГИБОМ С ВРАЩЕНИЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАЛОСТЬ\*

**В. В. Муравьев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия, pmkk@istu.ru

**О. В. Муравьева**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

**А. Ю. Будрин**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**М. А. Синцов**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. В. Зорин**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*С целью исследования влияния накопленной поврежденности металла на скорость ультразвуковых сдвиговых и рэлеевских волн образцы стального пруткового проката подвергли циклическому нагружению по схеме консольного изгиба с вращением. Представлены результаты измерения скорости ультразвуковых волн (сдвиговых и рэлеевских) в стальных прутках при малоциклового усталости под воздействием циклических нагрузок. Исследованы образцы прутков марки стали 40Х в состоянии поставки и после отжига при температуре 700 °С в течение 30 мин. Длина прутков – 270 мм, диаметр – 10 и 19 мм. Циклические нагрузки консольным изгибом обеспечивались с помощью специально разработанной установки для испытаний на усталость, в которой пруток одной стороной зажимался в патроне машины, обеспечивающей вращение, на другой стороне через подшипник подвешивался груз. Оценивались скорости сдвиговых волн в направлениях поперечного сечения прутка и рэлеевских волн по огибающей цилиндрической поверхности прутка в зоне максимальных напряжений. Возбуждение и прием волн осуществляли электромагнитно-акустическим способом. Для оценки скорости сдвиговых (поперечных) и рэлеевских волн использовался метод многократных отражений, соответственно, по сечению и огибающей прутка.*

*Представлены результаты изменения скорости в прутках при увеличении консольной нагрузки и числа циклов. Найдено, что скорость сдвиговой волны в прутке максимально уменьшается в зоне максимальных напряжений. При нагрузках, составляющих 60 % от предела текучести, в образцах наблюдается резкое снижение скорости при 300000 циклах. Изменение структуры металла после отжига приводит к снижению числа циклов, после которого происходит резкое изменение скорости волн. Коэффициент Пуассона, рассчитанный по скоростям сдвиговых и рэлеевских волн, также изменяется с ростом числа циклов и позволяет учесть изменение диаметра прутка в процессе испытаний.*

*Проведенные эксперименты по исследованию влияния циклических нагрузок прутков дают хорошие информативные данные по усталости в зависимости от термической обработки и структурных изменений материала. Возможность реализации электромагнитно-акустического метода контроля на многократных отражениях позволяет существенно повысить чувствительность к микродефектам при анализе сигнала на дальних отражениях и обеспечить высокую точность определения скорости волн.*

**Ключевые слова:** сдвиговые волны, рэлеевские волны, электромагнитно-акустический преобразователь, усталость, стальные прутки.

### Введение

Детали машин и металлические конструкции при эксплуатации подвергаются переменным во времени механическим (циклическим) нагрузкам, которые могут стать причиной изменения структуры металла, накопления микродефектов, зарождения трещин и в конечном итоге – разрушения изделия. Практика показывает, что такие циклически изменяющиеся во времени по величине и по знаку нагрузки приводят к разрушению конст-

рукции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести. Подобная ситуация возможна при наличии концентратора напряжений. Такое разрушение характерно для машиностроительных конструкций, таких как оси, валы, штоки, пружины, шатуны, и называется усталостным [1–5].

Механизм усталостного разрушения во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (наличие различных включений – шлаков, примесей, волосовин; дефекты

поверхности материала – плены, царапины, коррозия и т. д.). В связи с указанной неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений, которая приводит:

- к микропластическим деформациям сдвига по плоскостям скольжения в некоторых зернах металла, сопровождающимся появлением экстрезий и интрузий на поверхности образца;

- развитию микротрещин на поверхности и внутри образца, их росту и слиянию;

- появлению на последнем этапе одной или нескольких макротрещин, которые достаточно интенсивно развиваются.

Особенно быстро протекает процесс деструктуризации в условиях малоциклового усталости [6], т. е. при нагрузках, превышающих предел выносливости. Важно определить начало деструктуризации металла, чтобы не допустить разрушения изделия. Среди методов неразрушающего контроля представляют интерес ультразвуковые методы. Одним из основных информативных параметров ультразвукового контроля при определении структурных изменений является скорость распространения ультразвуковых (УЗ) волн [7–11].

Методы акустической структуроскопии являются наиболее успешно применяемыми среди методов оперативной оценки структуры, анизотропии, упругих и прочностных свойств материалов и изделий. Последнее обусловлено тем, что используемые при контроле акустические волны имеют поля одной природы с оцениваемыми упругими характеристиками [12]. Ввиду того, что влияние структуры металла на скорость УЗ-волн, как правило, невелико, к методикам и средствам измерения скорости предъявляются высокие требования к точности измерений. Контактные акустические (ультразвуковые) методы, представленные на рынке средств неразрушающего контроля, требуют специальной подготовки поверхности объекта и реализуются, как правило, в иммерсионном варианте, а использование их для образцов малых диаметров довольно сложно.

Предлагаемый метод для исследований акустических характеристик и свойств материала прутков позволяет с высокой точностью измерять акустические параметры за счет использования различных типов волн. Информационно-измерительная система возбуждения, регистрации и измерения параметров акустических волн в высокочастотной области (0,5...10 МГц) с использованием

пользованием бесконтактных электромагнитоакустических (ЭМА) преобразователей позволяет учесть качество акустического контакта и за счет отсутствия потерь на границе «преобразователь – объект контроля» получить серию многократных отражений, следовательно, повысить точность измерения параметров скорости и затухания акустических волн. Кроме того, ЭМА-преобразователи позволяют возбуждать и надежно регистрировать УЗ-импульсы разных типов волн, ориентации и поляризации (продольных и сдвиговых радиальных направлений осевой и радиальной поляризации и поверхностных волн), что позволяет реализовать многопараметровые методики оценки упругих модулей; методики оценки структурных изменений и накопления микродефектности в процессе нагружения по установленным зависимостям с измеряемыми характеристикам акустических волн [13–15].

Цель работы – исследование влияния деструктуризации металла прутков на скорость ультразвуковых сдвиговых и рэлеевских волн в результате циклического нагружения по схеме консольного изгиба с вращением в условиях малоциклового усталости.

#### **Исходные положения. Методика измерений**

Для испытаний использовались 4 прутка из стали 40Х в состоянии поставки и после отжига при 700 °С в течение 30 мин. Длина прутков – 250–270 мм, диаметры – 10 и 19 мм, которые измерялись с помощью цифрового штангенциркуля с погрешностью измерений 0,01 мм. Плечо нагрузки – 120 мм. Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  для прутков из этой стали в состоянии поставки – 780 МПа, предел выносливости  $\sigma_{-1}$  – 380 МПа, шероховатость поверхности Rz 4 мкм, контроль которой в процессе испытаний велся профилометром Surface Roughness Tester Rz: диапазон 0,1...50 мкм с погрешностью  $\pm 7\%$ .

Циклические нагружения консольным изгибом с вращением прутков обеспечивались с помощью специально разработанной установки для испытаний на усталость, схема которой представлена на рис. 1, а.

Образец 1, закрепленный в патроне 2 машины для испытаний, вращался со скоростью 500 об/мин. На другом конце образца установлен подшипник 3, через который передается поперечная сила  $P$ , изгибающая образец. При вращении образца в его поверхностных и подповерхностных слоях согласно эпюре напряжений (рис. 1, б) будут возникать попеременно растягивающие и сжимающие напряжения

(симметричный цикл). Через определенное число циклов процесс испытаний останавливают и проводят измерения. При достижении необратимых изменений в структуре образца

в зависимости от числа циклов и силы  $P$  циклическое нагружение приведет к разрушению образца, после чего фиксируется число циклов (число оборотов).

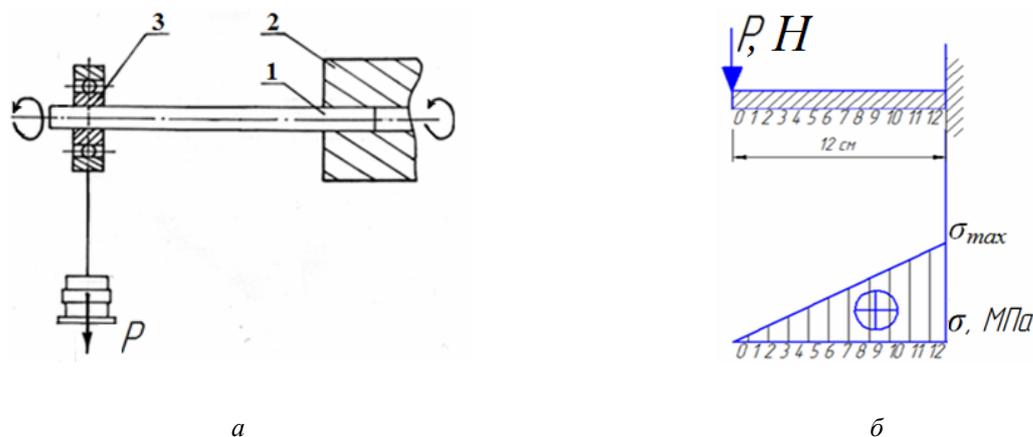


Рис. 1. Схема испытания образцов на усталость (а), эпюра напряжений (б)  
 Fig. 1. The scheme of testing samples for fatigue (a), stress profile (б)

Неразрушающий контроль прутков велся с помощью ЭМА зеркально-теневого метода многократных отражений сдвиговых и рэлеевских волн, распространяющихся во всех радиальных направлениях поперечного сечения прутка (рис. 2). Метод осуществлен при помощи электромагнитно-акустического дефектоскопа (ДЭМА), обладающего высокой чувствительностью к внутренним и поверхностным дефектам (десятые доли от длины акустической волны), дополнительными информативными параметрами для определения скорости, затухания, эффективности ЭМА-преобразования. Дефектоскоп оснащен проходным ЭМА-преобразователем сдвиговых волн и накладным для измерения рэлеевских волн, обеспечивающими излучение волн по сечению прутка и получение серии многократных отражений [16, 17]. Скорость ультразвуковых сдвиговых волн можно определить с погрешностью до 2 м/с, а рэлеевских – до 5 м/с. В ходе циклических испытаний осуществлялась проверка состояния поверхности прутков с помощью микроскопа Levenhuk 5ST при 40-кратном увеличении. Для анализа скоростей сдвиговых и рэлеевских волн в прутках использовано программное обеспечение ПРИНЦ [18].

с помощью которого сигнал преобразуется из акустического в электрический в виде импульсов и передается на персональный компьютер (ПК) через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) [19].

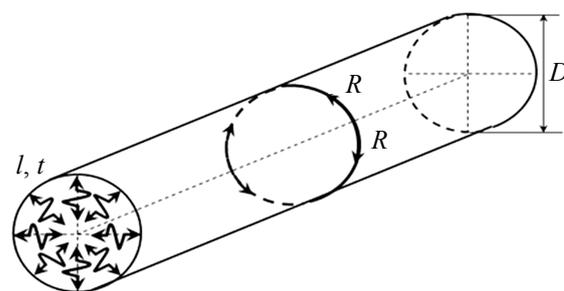


Рис. 2. Распространение сдвиговых и рэлеевских волн по сечению и окружности прутка  
 Fig. 2. Propagation of shear and Rayleigh waves over the section and circumference of a rod

Применяемый дефектоскоп ДЭМА работает следующим образом (рис. 3). Электрический импульс с устройства подается на проходной или накладной совмещенный ЭМА-преобразователь, излучающий акустическую волну определенного типа, после чего многократно перетраженная волна в объекте контроля (ОК) регистрируется тем же ЭМА-преобразователем,

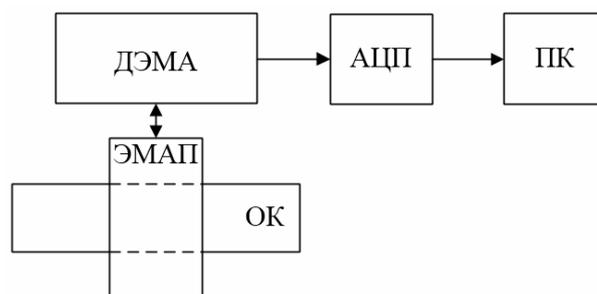


Рис. 3. Блок-схема дефектоскопа ДЭМА с проходным ЭМА-преобразователем для сдвиговых волн  
 Fig. 3. Block diagram of a DEMA defect detector with an EMA pass-through converter for shear waves

Информативным параметром при определении скоростей акустических волн является время прихода  $n$ ,  $n + m$ -го импульса  $t_{n,n+m}$ , поскольку скорость сдвиговой волны  $C_i$  и рэлеевской  $C_r$  находятся по формулам [20]:

$$C_i = \frac{dm}{t_{n,n+m} - t_n}; \quad (1)$$

$$C_r = \frac{\pi dm}{t_{n,n+m} - t_n}, \quad (2)$$

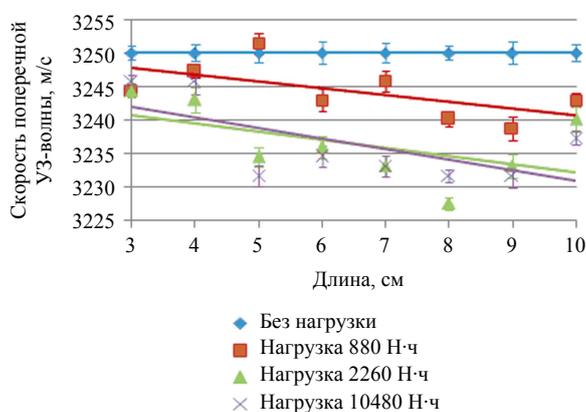
где  $t_{n,n+m} - t_n$  – время между  $(n + m)$ - и  $m$ -импульсами;  $n$  – количество переотражений на диаметре прутка;  $d$  – диаметр прутка.

### Результаты исследований

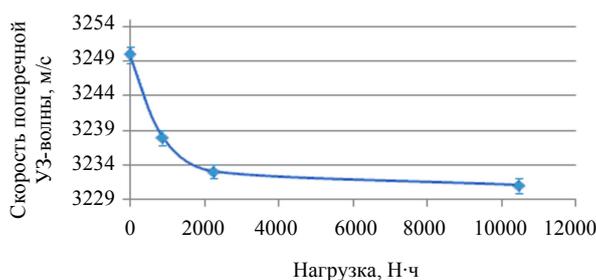
В эксперименте представлены результаты измерений скорости ультразвуковых волн с ана-

лизом времени прихода импульсов многократных отражений и с использованием корреляционной функции. Применены 2 типа нагружений: 1) с увеличением числа циклов и одновременным ростом нагрузки  $P$  ( $\text{Н} \cdot \text{ч}$ ); 2) с увеличением числа циклов  $N$  при постоянной нагрузке  $P$ .

На рис. 4 показано распределение скорости сдвиговой волны в прутке из стали 40Х диаметром 19 мм при разных уровнях консольной нагрузки и разном числе циклов нагрузки. По распределению скорости сдвиговой волны в прутке видно, что наиболее значительное ее изменение происходит в зоне максимальных напряжений – в области консольного зажима прутка в области 9...10 см графика. Уменьшение скорости сдвиговой волны более значительно с ростом нагрузки и числа циклов, а в диапазоне нагрузок 0...12000 ( $\text{Н} \cdot \text{ч}$ ) составило 20 м/с.



а



б

Рис. 4. Влияние числа циклов и нагрузок на скорость распространения сдвиговой волны: а – по длине прутка; б – в зоне максимальных напряжений

Fig. 4. The effect of the number of cycles and loads on the shear wave propagation velocity: а – along the length of the rod; б – in the zone of maximum stress

Оценку влияния числа циклических нагрузок (без изменения величины консольной силы) на скорость распространения сдвиговой волны в прутках диаметром 10 мм из стали марки 40Х провели при двух нагрузках (300 и 460 Н) в зо-

не максимальных напряжений на уровне 0,4 и  $0,6\sigma_{0,2}$ , соответственно, 366 и 562 МПа. Образцы испытывались методом малоциклового усталости. Скорость рэлеевских, сдвиговых волн измерялась периодически по мере возраст-

тания числа наработанных циклов. При каждом уровне нагрузки испытывали по два прутка: в состоянии поставки и после отжига при температуре 700 °С с выдержкой 30 мин. (рис. 5).

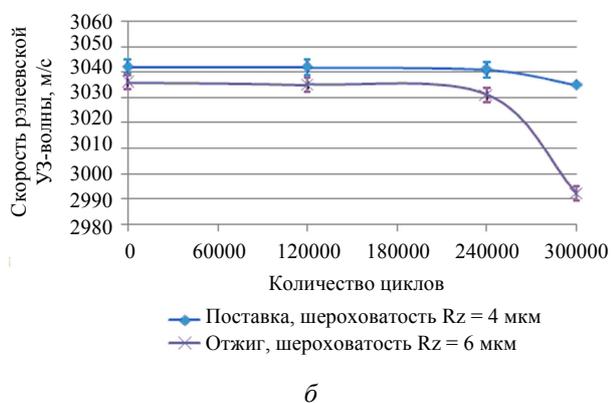
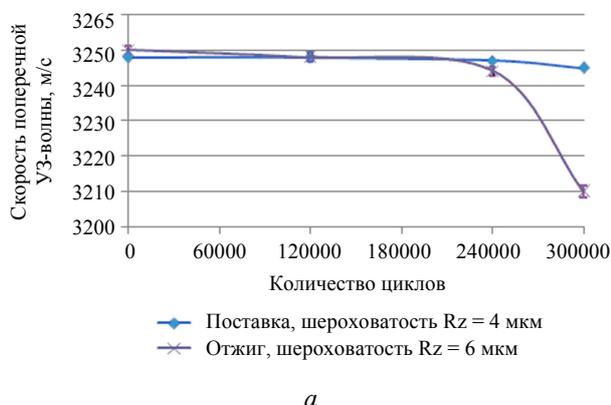


Рис. 5. Изменение скоростей упругих волн в прутках в зоне максимальных напряжений: а – сдвиговой; б – рэлеевской

Fig. 5. The change in the velocity of elastic waves in bars in the zone of maximum stress: a - shear; б - Rayleigh

По результатам циклических испытаний наблюдается падение скоростей волн после 240000 циклов наработки. Для отожженных прутков скорость сдвиговой волны падает на 40 м/с (рис 5, а), а рэлеевской – на 45 м/с (рис. 5, б), что свидетельствует о значительных структурных изменениях в металле прутков. По распределению скорости сдвиговой волны в прутке видно, что наиболее значительное ее изменение происходит в зоне максимальных напряжений – в области консольного зажима прутка. Уменьшение скорости сдвиговой волны в диапазоне нагрузок до 13000 Н·ч составило 20 м/с. Очевидно, подобный характер зависимости очень привлекателен для диагностирования состояния материала в изделиях, эксплуатируемых в условиях циклического нагружения.

По результатам циклических испытаний наблюдается падение скоростей ультразвуковых волн после 240000 циклов наработки. Заметно влияние отжига: скорость сдвиговой УЗ-волны падает на 35 м/с, а рэлеевской – на 43 м/с (см. рис. 5).

Коэффициент Пуассона является величиной отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению, характеризует упругие свойства материала, его способность к поперечным деформациям. Изменение коэффициента Пуассона в процессе циклических испытаний можно рассчитать по результатам измерений сдвиговой и рэлеевской волн по следующей формуле [21]:

$$\nu = \frac{0,87C_t - C_r}{C_r - 1,12C_t} \quad (3)$$

По построенным зависимостям (рис. 6) видно, что прутки в состоянии отжига более склонны к поперечным деформациям, при этом после 240000 циклов коэффициент Пуассона существенно уменьшается – от 0,375 до 0,365, что свидетельствует о деструктуризации металла.

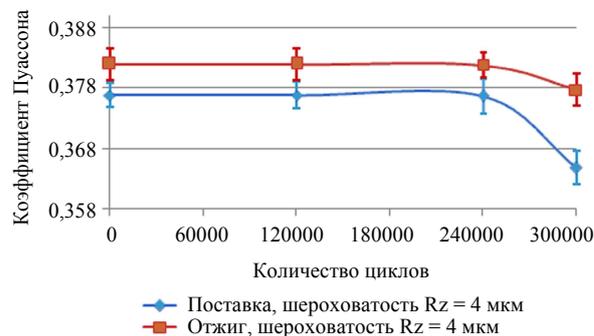


Рис. 6. Изменение коэффициента Пуассона под влиянием циклических нагрузок прутков в зонах максимальных напряжений

Fig. 6. The change in Poisson's ratio under the influence of cyclic bar loads in zones of maximum stress

Следует отметить, что экспериментально измеренные значения скорости рэлеевской волны по огибающей прутка и рассчитанные коэффициенты Пуассона имеют завышенные значения в сравнении с табличными, что обусловлено известной зависимостью скорости рэлеевской волны от радиуса кривизны поверхности, по которой она распространяется [22]. При этом относительное изменение указанных величин будет иметь одинаковый характер для образцов любых диаметров.

## Выводы

1. Возможность реализации электромагнитно-акустического метода контроля на многократных отражениях позволяет существенно повысить чувствительность к структурным изменениям при диагностировании момента зарождения усталостных трещин в цилиндрических деталях машин на основе анализа сигнала на дальних отражениях и обеспечить высокую точность определения скорости волн.

2. Экспериментально показано влияние числа и уровня циклических нагрузок при консольном изгибе вращающихся прутков на скорость распространения сдвиговой и рэлеевской волн. Наиболее существенное уменьшение скорости волн наблюдается в зоне максимальных напряжений вблизи консольного зажима прутка. При росте нагрузок и числа циклов после 240000 циклов наработки уменьшается скорость распространения сдвиговой и рэлеевской волн, наиболее значительное снижение наблюдается для отожженных прутков, соответственно, на 40 и 45 м/с.

3. Коэффициент Пуассона для прутка, подверженного отжигу, в процессе циклических испытаний уменьшается после 240000 циклов от 0,375 до 0,365, что свидетельствует о деградации металла.

## Библиографические ссылки

1. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V. [Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 537-541. DOI: 10.1134/S1063784217040089.

2. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 665-668. DOI: 10.1134/S1063784215050163.

3. Диагностика, повреждаемость и ремонт барабанов котлов высокого давления / Н. В. Абабков, Н. И. Кашубский, В. В. Муравьев [и др.] ; под ред. А. Н. Смирнова. М. : Машиностроение, 2011. 256 с.

4. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 44–51.

5. Экспериментальное обоснование метода прогнозирования малоциклового долговечности элементов конструкций / В. И. Добровольский, С. В. Добровольский [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 1. С. 36–38.

6. Там же.

7. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Abakov N.V., Ozhiganov E.A., Koneva N.A., Popova N.A. [Acoustic evaluation of the stress-strained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37-43. DOI: 10.1134/S1061830918010072.

8. Uglov A.L., Khlybov A.A. [On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 210-216. DOI: 10.1134/S1061830915040087.

9. Chertenkov M.V., Ruzin L.M. [Prerequisites to complex use of standard and acoustic logging for the forecast of a Poisson's ratio]. *Oil Industry*, 2017, no. 1, pp. 16-18.

10. Davydov V.V., Myazin N.S., Logunov S.E., Fadeenko V.B. [A contactless method for testing inner walls of pipeline]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 213-221. DOI: 10.1134/S1061830918030051.

11. Hyung M.K., Doo-Hyun C. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 175-183. DOI: 10.1134/S1061830916030049.

12. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.] // Дефектоскопия. 2014. Т. 50, № 8. С. 3–12.

13. Babkin S.E. [The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303-307. DOI: 10.1134/S1061830915050022.

14. Муравьева О. В., Соков М. Ю. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократнотеневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 68, № 4. С. 46–50.

15. Муравьева О. В., Зорин В. А. Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн // Дефектоскопия. 2017. № 5. С. 3–9.

16. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 565–571. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565571.

17. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Пряхин А. В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 159–166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

18. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов

[и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1 (17). С. 243–250.

19. Муравьева О. В., Зорин В. А. Указ. соч.

20. Муравьева О. В., Соков М. Ю. Указ. соч.

21. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.

22. Там же.

### References

1. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V. [Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 537-541. DOI: 10.1134/S1063784217040089.

2. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. [Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 665-668. DOI: 10.1134/S1063784215050163.

3. Ababkov N.V., Kashubsky N.I., Muraviev V.V. *Diagnostika, povrezhdaemost' i remont barabanov kotlov vysokogo davleniya* [Diagnostics, damageability and repair of high pressure boiler drums]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011, 256 p. (in Russ.).

4. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Muravev V.V. [Criteria for the evaluation of the technical state of the long-lived metal of HPP equipment based on acoustic structuroscopy]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 44-51 (in Russ.).

5. Dobrovol'skii V.I., Dobrovol'skii S.V. [Experimental justification of the method for predicting low-cycle durability of structural elements]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2014, no. 1, pp. 36-38 (in Russ.).

6. Dobrovol'skii V.I., Dobrovol'skii S.V. [Experimental justification of the method for predicting low-cycle durability of structural elements]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2014, no. 1, pp. 36-38 (in Russ.).

7. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Abakov N.V., Ozhiganov E.A., Koneva N.A., Popova N.A. [Acoustic evaluation of the stress-strained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37-43. DOI: 10.1134/S1061830918010072.

8. Uglov A.L., Khlybov A.A. [On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 210-216. DOI: 10.1134/S1061830915040087.

9. Chertenkov M.V., Ruzin L.M. [Prerequisites to complex use of standard and acoustic logging for the forecast of a Poisson's ratio]. *Oil Industry*, 2017, no. 1, pp. 16-18.

10. Davydov V.V., Myazin N.S., Logunov S.E., Fadeenko V.B. [A contactless method for testing inner

walls of pipeline]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 213-221. DOI: 10.1134/S1061830918030051.

11. Hyung M.K., Doo-Hyun C. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 175-183. DOI: 10.1134/S1061830916030049.

12. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Strizhak V.A. [An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 8, pp. 3-12 (in Russ.).

13. Babkin S.E. [The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303-307. DOI: 10.1134/S1061830915050022.

14. Murav'eva O.V., Sokov M.Yu. [The influence of the depth of the defect on the parameters of the multiple-shadow electromagnetic-acoustic method of control rods]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2016, no. 4, pp. 46-50 (in Russ.).

15. Murav'eva O.V., Zorin V.A. [The method of multiple shadows in the control of cylindrical objects using Rayleigh waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 3-9 (in Russ.).

16. V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin, R.R. Khasanov. [Hardware-software complex for control of bars by the mirror-shadow method on multiple reflections]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 565-571 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571.

17. Strizhak V.A., Khasanov R.R., Pryakhin A.V. [Features of excitation of electromagnetic-acoustic transducer at the waveguide control method]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 159-166 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

18. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A. [Information-measuring system for the excitation, reception, recording and processing of signals of electromagnetic-acoustic transducers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2011, no. 1, pp. 243-250 (in Russ.).

19. Murav'eva O.V., Zorin V.A. [The method of multiple shadows in the control of cylindrical objects using Rayleigh waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 5, pp. 3-9 (in Russ.).

20. Murav'eva O.V., Sokov M.Yu. [The influence of the depth of the defect on the parameters of the multiple-shadow electromagnetic-acoustic method of control rods]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2016, no. 4, pp. 46-50 (in Russ.).

21. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 287 p. (in Russ.).

22. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 287 p. (in Russ.).

**Acoustic Structural Analysis of Steel Samples Loaded with Rotational Bending During Fatigue Tests**

V.V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; PhTI UdmFIC UB RAS, Izhevsk, Russia, pmkk@istu.ru

O.V. Murav'eva, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; PhTI UdmFIC UB RAS, Izhevsk, Russia

A.Yu. Budrin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

M.A. Sincov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Zorin, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*In order to study the effect of accumulated metal damage on the speed of ultrasonic shear and Rayleigh waves, steel bar stock samples were subjected to cyclic loading according to the cantilever bending with rotation scheme. The results of measuring the velocity of ultrasonic waves (shear and Rayleigh) in steel rods with low-cycle fatigue under the influence of cyclic loads are presented. Samples of bars of steel grade 40X in the state of delivery and after annealing at 700 ° C for 30 minutes were investigated. The length of the bars is 270 mm, their diameters are 10 and 19 mm. Cyclic loads with cantilever bending were provided with a specially designed installation for fatigue testing, in which the bar was clamped with one side in the cartridge of the machine providing rotation, and the load was hung on the other side through the bearing. Shear wave velocities in the directions of the cross section of a bar and Rayleigh waves along the envelope of the cylindrical surface of the bar in the zone of maximum stresses were estimated. The excitation and reception of waves were carried out by an electromagnetic - acoustic method. To estimate the velocity of shear (transverse) and Rayleigh waves, we used the method of multiple reflections, respectively, over the cross section and the envelope of the rod.*

*The results of the speed variation in bars with increasing cantilever load and the number of cycles are presented. It was found that the shear wave velocity in a bar is maximally reduced in the zone of maximum stresses. With loads of 60 % of the yield strength in the samples, a sharp decrease in speed is observed at 300,000 cycles. The change in the structure of the metal after annealing leads to a decrease in the number of cycles, after which a sharp change in the velocity of the waves occurs. The Poisson's ratio, calculated from the velocities of shear and Rayleigh waves, also changes with an increase in the number of cycles and makes it possible to take into account the change in the bar diameter during the tests.*

*The performed experiments on studying the effect of cyclic bar loads give good informative data on fatigue depending on heat treatment and structural changes in the material. The possibility of implementing an electromagnetic-acoustic control method on multiple reflections allows us to significantly increase the sensitivity to microdefects when analyzing a signal on long-range reflections and to ensure high accuracy in determining the speed of waves.*

**Keywords:** shear waves, Rayleigh waves, electromagnetic-acoustic transducer, fatigue, steel bars.

Получено 06.02.2019

**Образец цитирования**

Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 37–44. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44.

**For Citation**

Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Budrin A.Yu., Sincov M.A., Zorin A.V. [Acoustic structural analysis of steel samples loaded with rotational bending during fatigue tests]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol 22, no. 1, pp. 37-44 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-37-44.