

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10

### Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки\*

*В. В. Муравьев*, 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

*Описывается многоцикловая усталостная нагрузка (до 140000 циклов) на прутки из стали 45. Для испытаний изготовлены 8 прутков, 7 из которых прошли разные виды термической обработки (нормализацию, закалку и отпуск). Усталостное нагружение прутков осуществлялось путем консольного изгиба с вращением. Момент изгиба для прутка был выбран в размере 54 Н/м, что позволило подобрать напряжение, равное  $0,6\sigma_{0,2}$  материала. Скорости ультразвуковых волн и габаритные размеры прутков измерялись через каждые 48000 циклов. Для измерения скоростей волн использовался зеркально-теневой электромагнитно-акустический метод многократных отражений с применением дефектоскопа ДЭМА, который имеет проходной и накладной преобразователи со специальными системами подмагничивания. Результаты измерений приведены на рисунках в виде зависимости влияния циклического нагружения на скорость сдвиговых и рэлеевских волн в прутках разной термообработки. Основные изменения скорости происходят в прутках, прошедших средний отпуск 400–500 °С. Скорость сдвиговой волны максимально падает при отпуске 450 °С, а скорость рэлеевской волны – при отпуске 500 °С. При остальных видах термической обработки заметных изменений скорости не наблюдается, требуется увеличение количества циклов нагрузки.*

**Ключевые слова:** скорость сдвиговых и рэлеевских волн, электромагнитно-акустический преобразователь, усталость, стальные прутки.

#### Введение

Многоцикловая усталостная нагрузка – причина возникновения пластических деформаций.

Разрушение материала не происходит без пластической деформации. Процесс, при котором меняется форма тела, но не происходит существенного изменения сплошности, называется пластической деформацией [1]. Неравномерная пластическая деформация способна создавать перенапряжения, разрушать межатомные связи, вызывающие рост и зарождение неплотностей различных размеров.

О влиянии пластической деформации на механические свойства и структуру материалов написано много работ. Изучению влияния амплитуды циклической нагрузки на магнитные свойства, механические свойства, электропроводность, внутреннее трение и модуль упругости посвящена работа [2].

Основываясь на статье [3], интенсивность усталостного разрушения зависит от количества содержания кислорода в воздухе. По мере

уменьшения содержания кислорода уменьшается интенсивность усталостного разрушения. Существенное влияние на усталость оказывает состояние поверхности образца, наличие поверхностных дефектов, концентраторов напряжений. Разрушение образца, прежде всего, начинается с поверхности в опасном сечении, затем движется к его центру.

При усталостном нагружении может меняться направление деформации (обратное движение дислокаций с противоположным знаком), увеличивается концентрация точечных дефектов, повышается температура металла, снижается модуль упругости и происходит межзеренное, или внутризеренное, разрушение, зависящее от амплитуды нагружения. Усталостное разрушение происходит при любой амплитуде нагружения, но с разной вероятностью проявления.

Для контроля усталостного разрушения применяют такие неразрушающие методы, как метод электросопротивления, метод микроинден-

© Муравьев В. В., Будрин А. Ю., Синцов М. А., 2020

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ Бел-а (проект № 20-58-0015) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий».

тирования [4], метод коэрцитивной силы [5] и акустоупругий метод.

Влияние структуры на скорость ультразвуковых волн не велико, поэтому улучшение точности измерений и методики контроля является актуальной задачей. Наиболее успешно используемым методом является акустоупругий.

Метод позволяет использовать разные типы волн, также с высокой точностью измерять время прихода, скорость и затухание. Возбуждение и регистрация акустических волн осуществляется бесконтактным электромагнитно-акустическим (ЭМА) преобразователем, с помощью которого можно отстроиться от потери качества сигнала на границе с объектом контроля и получить многократные отражения, позволяющие

повысить точность измерения скорости и затухания волн [6–9].

Цель работы – исследование влияния многоциклового нагружения прутков разной термообработки на скорость распространения сдвиговых и рэлеевских волн.

**Исходные положения. Методика измерений**

Исследованию подверглись 8 прутков из стали 45 разной термообработки. Длина прутков – 300 мм, плечо нагрузки – 255 мм, диаметр прутка в области исследования – 14 мм. Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  для прутков данной стали составляет 340–830 МПа, в зависимости от вида термической обработки (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства стали 45 по ГОСТ 1577–93 и интернет-источнику [10]

Термообработка	Сечение, мм	Предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), МПа	Предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ), МПа
Нормализация 840–870 °С	До 16	340	$\sigma_{0,2}=310$ МПа→245
Закалка в воде 850 °С, отпуск 450 °С	15	830	$\sigma_{0,2}=680$ МПа→421
Закалка в воде 850 °С, отпуск 500 °С	15	730	$\sigma_{0,2}=270$ МПа→231
Закалка в воде 850 °С, отпуск 600 °С	15	590	$\sigma_{0,2}=480$ МПа→331

Существенное влияние на механизм накопления разрушений оказывает состояние поверхности образцов [11]. Перед испытаниями все образцы были тщательно отполированы, поверхности проверены тестером шероховатости Surface Roughness Tester: диапазон измерения

Rz 0,1–50 мкм, погрешность измерений  $\pm 7\%$ . Шероховатости поверхностей прутков Rz 4 мкм.

Усталостное нагружение прутков с консольным изгибом и вращением осуществлялось с помощью токарного станка. На рис. 1 изображена схема нагружения.

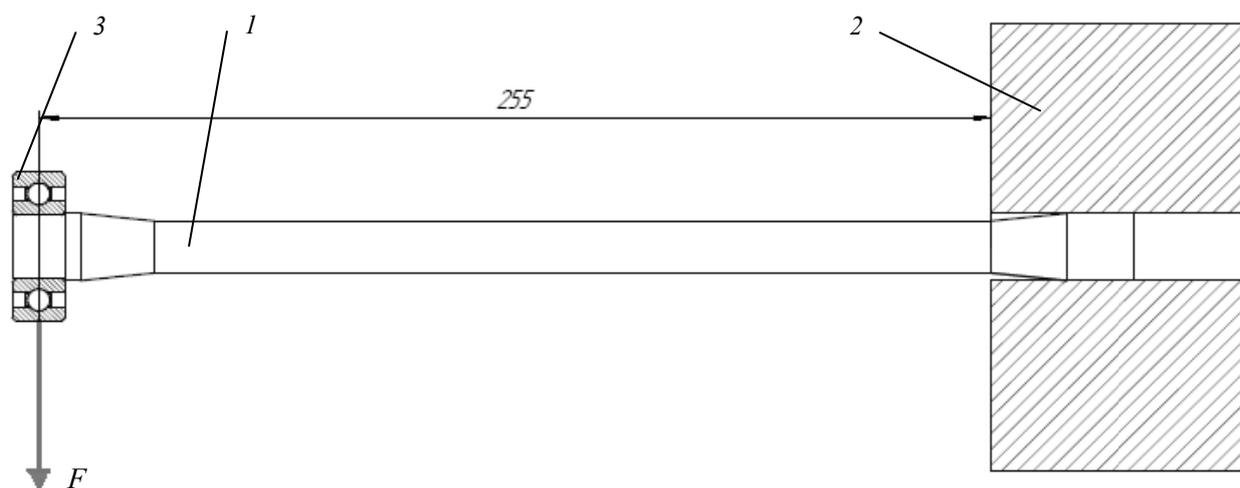


Рис. 1. Схема нагружения прутка

На один конец прутка устанавливается подшипник 3, другой конец прутка зажимается в патроне 2 токарного станка. Через подшипник передается поперечная сосредоточенная нагрузка  $F$ , изгибающая пруток. После того как собрана

схема нагружения, токарным станком подается вращение со скоростью 500 оборотов в минуту.

Чтобы не разрушить материал, изгибающий момент  $M$ , действующий на сечение, должен создавать напряжение  $\sigma$ , равное  $0,6\sigma_{0,2}$  от ми-

нимального значения предела текучести (340 МПа). Для этого на образец прикладывается сосредоточенная нагрузка  $F=200$  Н.

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (1)$$

$$M = F \times l, \quad (2)$$

где  $l$  – плечо нагрузки (0,255 м) (Рис. 1),  $W$  – осевой момент сопротивления, который рассчитывается по формуле

$$W = \frac{\pi \times D^3}{32}, \quad (3)$$

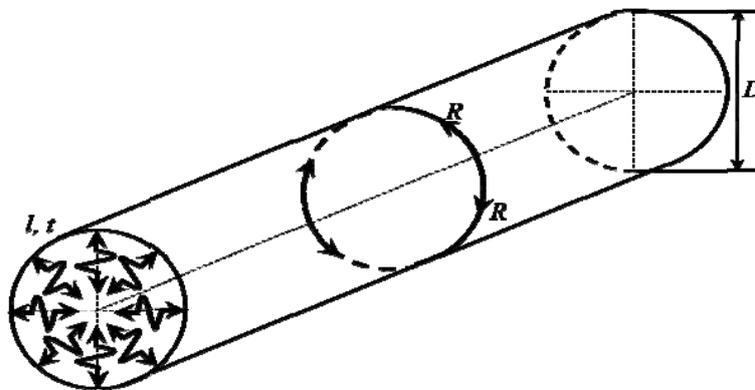


Рис. 2. Распространение сдвиговых и рэлеевских волн по сечению и окружности прутка

Блок-схема описывает принцип работы электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода многократных отражений (рис. 3): электрический сигнал с дефектоскопа ДЭМА передается на бесконтактный электромагнитно-акустический преобразователь ЭМАП. Проходной преобразователь излучает сдвиговую волну, а накладной рэлеевскую (рис. 2). Многократно переотраженная в объекте контроля ОК волна регистрируется тем же ЭМАП-преобразователем. С помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП принятый акустический сигнал преобразовывается в дискретный код и передается на персональный компьютер ПК, где в программе «Sensitive» фиксируется в виде эхограммы.

Скорость сдвиговой волны  $C_t$  и рэлеевской  $C_R$  представлена формулой, где время прихода  $n$ ,  $n+m$  импульса,  $t_n$ ,  $t_{n+m}$  импульса является информативным параметром при определении скоростей акустических волн:

$$C_t = \frac{D \times m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (4)$$

$$C_R = \frac{\pi \times D \times m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр прутка в области исследования (0,014 м).

Скорости сдвиговых и рэлеевских волн в прутках измерялись с помощью электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода многократных отражений. В методе применялся дефектоскоп ДЭМА, обладающий высокой чувствительностью к дефектам и дополнительными информативными параметрами для определения скорости волны, затухания. Дефектоскоп работает с проходным и накладным ЭМА-преобразователями сдвиговых и рэлеевских волн.

Распространение рэлеевских и сдвиговых волн по прутку изображено на рис. 2.

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

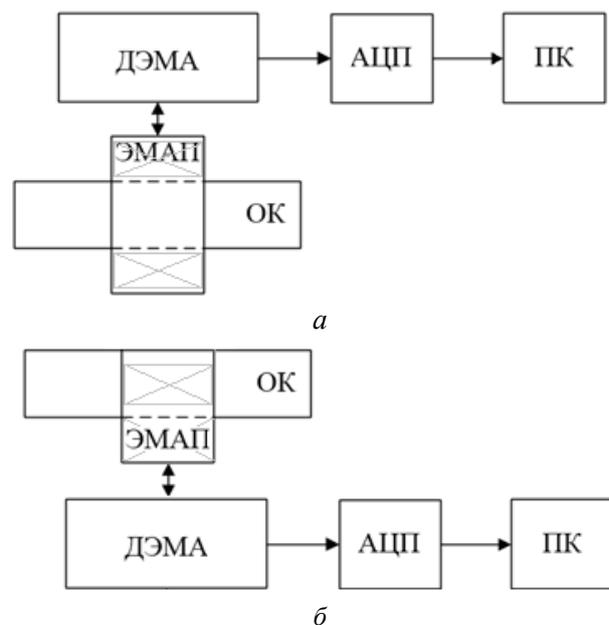


Рис. 3. Блок-схема дефектоскопа ДЭМА с проходным ЭМА-преобразователем для сдвиговых волн (а), с накладным ЭМА-преобразователем для рэлеевских волн (б)

**Результаты исследований**

Для точных измерений скоростей волн диаметры прутков измерялись по 5 раз в одной точке штангенциркулем с погрешностью 0,01 мм.

Измерение скорости волн осуществлялось в зоне максимальных напряжений – в области

консольного зажима прутка. На рис. 4 показаны графики зависимости скорости сдвиговой волны в прутках из стали 45 разной термообработки от количества циклов нагружения.

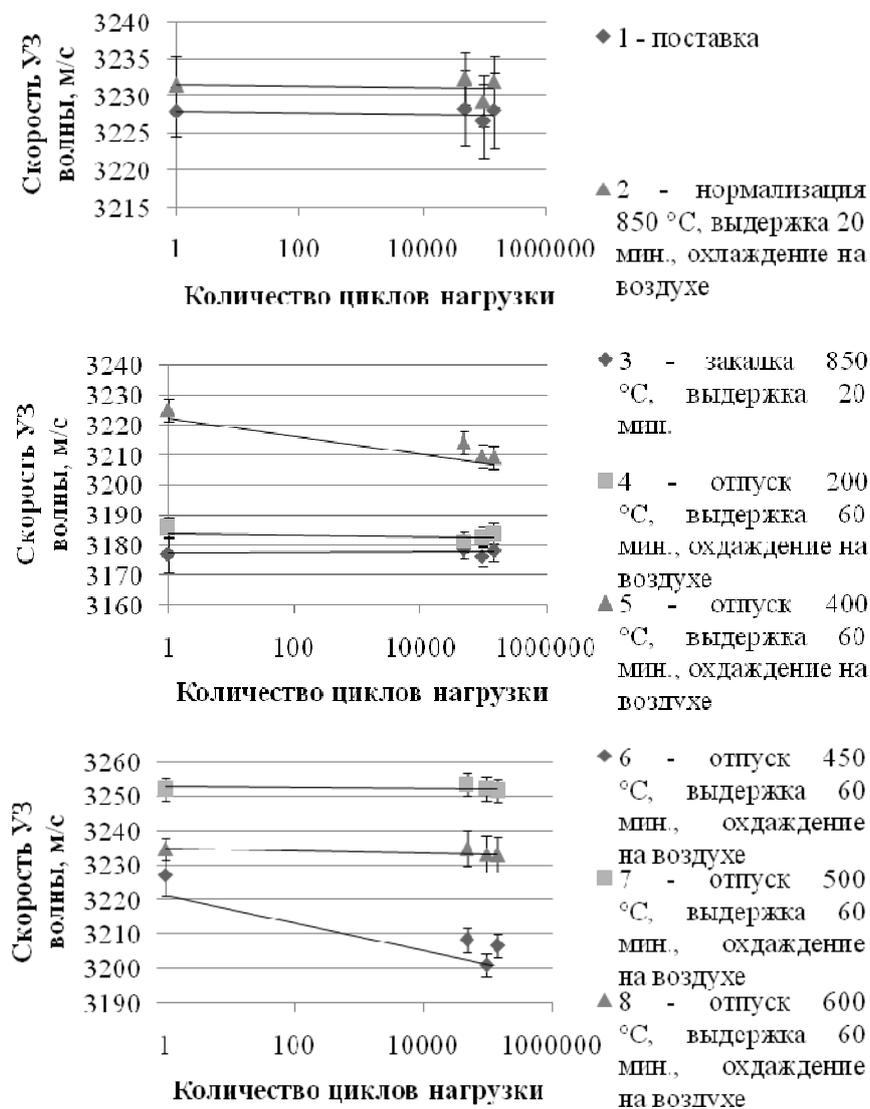


Рис. 4. Изменение скорости сдвиговой волны под влиянием циклических нагрузок прутков в зонах максимальных напряжений

Графики зависимости скорости волны от количества циклов нагрузки показывают, что заметное изменение скорости происходит в термически обработанных прутках среднего отпуска – отпуск 400–450 °С. При отпуске 450 °С

скорость волны падает на 20 м/с, при отпуске 400 °С скорость волны падает на 14 м/с.

На рис. 5 показаны графики зависимости скорости рэлеевской волны в прутках из стали 45 разной термообработки от количества циклов нагружения.

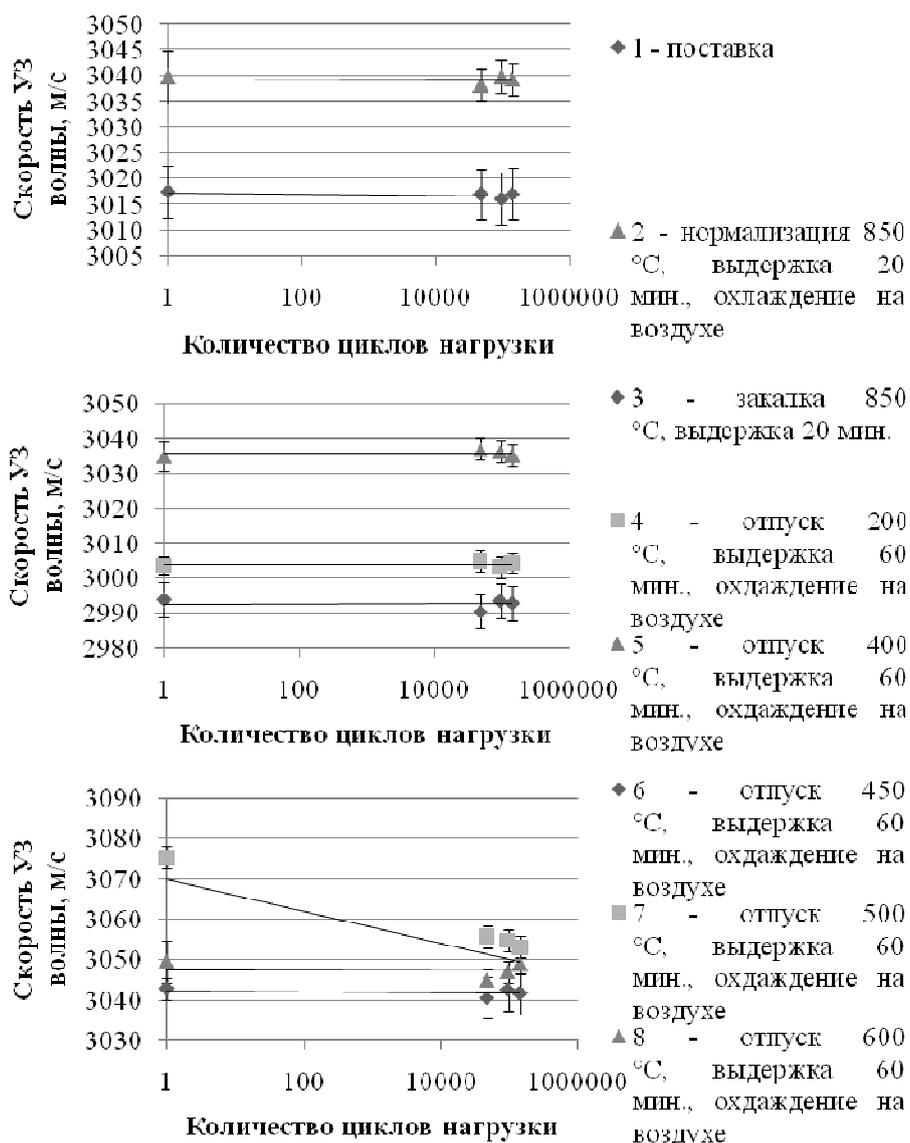


Рис. 5. Изменение скорости рэлеевской волны под влиянием циклических нагрузок прутков в зонах максимальных напряжений

Графики показывают, что при циклических испытаниях скорость рэлеевской волны падает в образце, прошедшем отпуск при температуре 500 °С. Разница 20 м/с относительно начального состояния.

#### Выводы

Многоцикловая усталостная нагрузка до 140000 циклов прутков из стали 45 показала, что заметные изменения происходят в прутках, прошедших средний отпуск 400–500 °С.

Скорость сдвиговой волны падает на 20 м/с в прутке, прошедшем отпуск 450 °С. При отпуске 400 °С скорость волны падает на 14 м/с.

Скорость рэлеевской волны падает на 20 м/с в прутке, прошедшем отпуск 500 °С.

При других видах термообработки, изменений скорости волн не наблюдается. Рекомендуется увеличить количество циклов нагружения.

По результатам испытаний видно, что чем выше предел текучести материала, тем сильнее она подвержена усталостному разрушению.

#### Библиографические ссылки

1. Кокорин В. В., Ромащенко С. В., Михнёв М. М. Пластическая деформация и физические процессы, протекающие в металле при деформации // Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 16–17.
2. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1963. 272 с.
3. Мацевитый В. М., Вакуленко К. В., Казак И. Б. О различиях механизмов разрушения металлов в условиях малоцикловой и многоцикловой усталости // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17, № 1. С. 60–67.

4. Маликов А. А., Маркова Е. В., Чечуга О. В. Применение метода микроиндентирования для определения механических характеристик поверхностного слоя // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2017. № 2 (57). С. 24–28.

5. Оценка текущего усталостного состояния металлической башни ветроэлектрической установки по измерениям магнитной характеристики металла - коэрцитивной силы / Н. Ф. Хорло, А. А. Лукина, С. В. Савлук, Р. Н. Соломаха, Г. Я. Безлюдько // В мире неразрушающего контроля. 2017. Т. 20, № 3. С. 46–52.

6. Толипов Х. Б. Экспериментальная установка для бесконтактного измерения скорости и амплитуды смещений волны Рэлея с малого участка поверхности // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 175–177.

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

8. Бабкин С. Э. Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя // Инженерная физика. 2017. № 1. С. 50–54.

9. Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом / С. Э. Бабкин, М. Ю. Лебедева, Ю. И. Савченко, О. Н. Вострокнутова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4 (45). С. 47–51.

10. Центральный металлический портал РФ. URL: [http://metallcheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/45](http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/45) (дата обращения: 23.10.2020).

11. Практические аспекты оценки повреждаемость в условиях многоциклового усталости / А. В. Корнилова, И. М. Идармачев, Чжо Заяр, Тет Паинг. М.: Перо, 2020. 115 с.

12. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Кокорина Е. Н. Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 66–70.

13. 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.

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

15. 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.

16. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Пряхин А. В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Ка-

лашникова. 2018. Т. 21, № 2. С. 159–166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

## References

1. Kokorin V.V., Romashchenko S.V., Mikhnev M.M. [Plastic deformation and physical processes occurring in metal during deformation]. Reshetnevskie readings, 2013, vol. 1, pp. 16-17 (in Russ.).

2. Ivanova V.S. [Fatigue destruction of metals]. Moscow, State. scientific and technical publishing house lit. on ferrous and non-ferrous metallurgy, 1963, 272 p.

3. Matsevity V.M. [On the differences in the mechanisms of destruction of metals under conditions of low-cycle and high-cycle fatigue]. Problems of mechanical engineering, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 60-67 (in Russ.).

4. Malikov A.A., Markova E.V., Chechuga O.V. [Application of the microindentation method for determining the mechanical characteristics of the surface layer]. Progressive technologies and systems of mechanical engineering, 2017, no. 2(57), pp. 24-28 (in Russ.).

5. Horlo N.F., Lukina A.A., Savluk S.V., Solomakha R.N., Bezlyudko G.Ya. [Estimation of the current fatigue state of a metal tower of a wind power plant based on measurements of the magnetic characteristics of the metal - coercive force]. In the world of non-destructive testing, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 46-52 (in Russ.).

6. Tolipov Kh.B. [Experimental setup for contactless measurement of the velocity and amplitude of Rayleigh wave displacements from a small surface area]. Pribooryitekhnikaeksperimenta, 2015, no. 1, pp. 175-177.

7. Viktorov I.A. [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 287 p. (in Russ.).

8. Babkin S.E. [Measurement of the speed of sound using a meander electromagnetic-acoustic transducer]. Engineering Physics, 2017, no. 1, pp. 50-54 (in Russ.).

9. Babkin S.E., Lebedeva M.Yu., Savchenko Yu.I., Vostroknutova O.N. [Measurement of the speed of surface waves of ferromagnetic materials by the electromagnetic-acoustic method]. Electrotechnical systems and complexes, 2019, no. 4 (45), pp. 47-51 (in Russ.).

10. Central metal portal of the Russian Federation (in Russ). Available at: [http://metallcheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/45](http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/45) (accessed: 23.10.2020).

11. Kornilova A.V., Idarmachev I.M., ZhoZayar, TetPaing. [Practical aspects of assessing damageability under conditions of high-cycle fatigue. Moscow, Publishing house "Pero" Publ, 2020, 115 p. (in Russ.).

12. Muravyov V.V., Muravyov O.V., Kokorina E.N. Acoustic structuroscopy and defectoscopy of 60S2A steel bars in the production of springs with a nanoscale structure // Proceedings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy, 2013, no. 4, pp. 66-70 (in Russ.).

13. Muravyov V.V., Murav'eva O.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A., Zorin A.V. Acoustic structuroscopy of steel specimens loaded with bending with rotation during

fatigue tests //VestnikIzhGTUimeni M. T. Kalashnikova, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 37-44 (in Russ.).

14. Muravieva 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, no 5, pp. 3-9 (in Russ.).

15. Muravyova O.V, Sokov M. Yu. [Influence of the depth of the defect on the parameters of the multiple-shadow electromagnetic-acoustic method of rod control].

VestnikIzhGTUimeni M. T. Kalashnikova, 2016, vol. 68, no 4, pp. 46-50 (in Russ.).

16. Strizhak V.A, Khasanov R.R, Pryakhin A.V. [Peculiarities of excitation of an electromagnetic-acoustic transducer under the waveguide method of control]. VestnikIzhGTUimeni M. T. Kalashnikova, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 159-166 (in Russ.). DOI: 10.22213 / 2413-1172-2018-2-159-166.

\*\*\*

### **Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment**

*V. V. Muravyov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU; PhTI UdmFIC UB RAS, Izhevsk, Russia

*A. Yu. Budrin*, PhD student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*M. A. Sintsov*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*This paper describes the high-cycle fatigue load (up to 140,000 cycles) on steel 45 bars. For testing, 8 bars were made, 7 of which underwent different heat treatment types (normalization, quenching, and tempering). Fatigue loading of the bars was carried out by cantilever bending with rotation. The bar's bending moment was chosen as 54 N/m, which made it possible to select the voltage equal to  $0.6\sigma_{0.2}$  of the material. The velocities of ultrasonic waves and overall dimensions of the rods were measured every 48,000 cycles. A specular-shadow electromagnetic-acoustic method of multiple reflections was used with the DEMA flaw detector to measure the wave velocities, which has a through-feed and overhead transducers with special magnetization systems. The measurement results are shown in the figures as a dependence of the effect of cyclic loading on the speed of shear and Rayleigh waves in bars of different heat treatment. The main changes in speed occur in bars that have passed an average tempering of 400-500 °C. The shear wave velocity decreases to maximum when tempering at 450 °C, and the velocity of the Rayleigh wave – when tempering at 500 °C. For other types of heat treatment, no noticeable changes in speed are observed; an increase in the number of load cycles is required.*

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

Получено: 06.11.2020