

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн*

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

В статье обсуждаются вопросы возможности оценки структурного состояния после разных видов и режимов термической обработки прутков из стали 45 по результатам измерения скорости рэлеевской волны с использованием метода многократной тени. Для обеспечения разработанной методики использован дефектоскоп ДЭМА и специальный накладной электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь с системой подмагничивания. Преобразователь обеспечивает возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по окружности прутка. Исследованы образцы прутков в состояниях поставки, отжига, нормализации, закалки и отпуска. Для качественного измерения скоростей рэлеевских волн измерены диаметры прутков с точностью 0,01 мм. Представлены результаты изменения скорости рэлеевской волны в прутках при всех режимах термической обработки. В состоянии поставки скорость рэлеевской волны в прутке составила 3017 м/с. Скорость рэлеевской волны в прутке после закалки упала до 2995 м/с. После нормализации скорость рэлеевской волны увеличилась до 3049 м/с. Постепенное увеличение температуры отпуска приводит к увеличению скорости волны. Полученные экспериментальные данные показывают, что отпуск при температуре 600 °С и нормализация при 850 °С увеличивают скорость распространения рэлеевской волны в прутке на 55 м/с относительно закалки без отпуска, что свидетельствует о схожих структурных состояниях в поверхностных слоях образцов.

Ключевые слова: скорость рэлеевской волны, сталь, термообработка, прутковый прокат.

Введение

Ранее по результатам [1], полученным при исследовании влияния термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках, выяснено, что:

1. Отжиг увеличивает скорость распространения поперечной волны в прутке.
2. Закалка максимально снижает скорость распространения поперечной волны.
3. Увеличение температуры отпуска возвращает показатели скорости к показателям состояния поставки.

Установлено, что скорость поперечной волны в прутках после отжига составила 3240 м/с, а после закалки 3170 м/с. Измерения в состоянии поставки и после нормализации показали одинаковую скорость поперечной волны 3230 м/с, что свидетельство-

вало об одинаковых структурных состояниях. Полученные экспериментальные данные показали, что отжиг увеличил скорость распространения поперечной волны в прутке на 70 м/с относительно закалки без отпуска. С увеличением температуры отпуска наблюдался рост скорости распространения поперечной волны относительно закаленного состояния, достигающий увеличения на 65 м/с до 3235 м/с при температуре 600 °С. Рост температуры отпуска и отжиг приводят к увеличению скорости поперечных и рэлеевских волн в стальных прутках 40X [2].

Использование в качестве информативных параметров скорости распространения рэлеевских волн позволяет получать информацию о поверхностном слое объекта контроля (ОК) [3].

Развитие электромагнитно-акустических методов оценки структурного состояния стальных образцов после различных видов и режимов термической обработки является актуальной научно-практической задачей. Предложенная методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн, реализованная на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей, позволяет повысить чувствительность к структурным изменениям в образцах, что способствует повышению качества такого контроля в промышленности.

Цель работы – исследование влияния режимов термической обработки прутков из стали 45 на скорость рэлеевской волны, полученной электромагнитно-акустическим способом ввода и приема ультразвуковых волн.

Методика измерений.

Результаты исследований

Исследованы образцы прутков в состояниях поставки, отжига, нормализации, закалки и отпуска. Длина прутков – 300 мм, диаметр в области исследования – 14 мм. Методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн реализована на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей со специальными системами подмагничивания, обеспечивающих возбуждение и прием волн в прямом и обратном направлениях по окружности сечения прутка (рис. 1) [4–10].

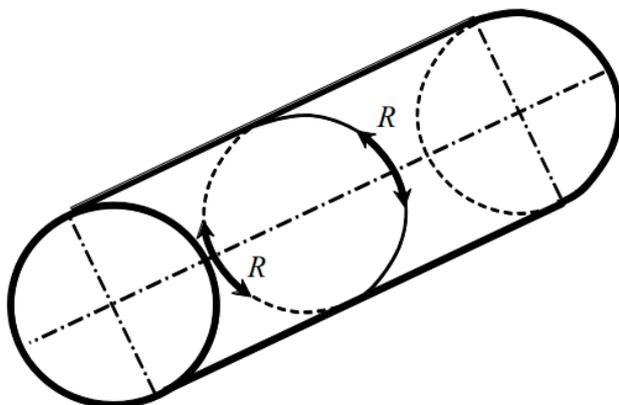


Рис. 1. Ход лучей рэлеевских волн по окружности сечения прутка

В данной методике использовался дефектоскоп «ДЭМА», который обладает высокой чувствительностью определения параметров для измерения скорости рэлеевской волны. Применяемый дефектоскоп «ДЭМА» работает следующим образом (рис. 2): электрический сигнал с устройства поступает на накладной ЭМАП, который излучают акустическую волну определенного типа (рис. 1). Многократно отраженные УЗ-волны принимаются тем же ЭМАП. Далее сигнал с помощью устройства преобразуется из акустических колебаний в электрические импульсы и передается на персональный компьютер (ПК) через АЦП. Обработка сигналов осуществляется с помощью программного обеспечения Sensitive [11–15].

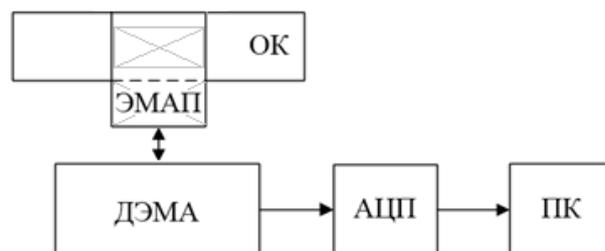


Рис. 2. Блок-схема дефектоскопа ДЭМА с накладным ЭМА-преобразователем для рэлеевских волн

Скорости распространения рэлеевских волн рассчитываются с учетом времени распространения волн по сечению образцов и измеренных диаметров [16, 17]:

$$C_r = \frac{\pi \cdot d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (1)$$

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

Исследованию подверглись 9 образцов прутков из среднеуглеродистой стали 45 (рис. 3), которые прошли разные режимы термической обработки [18, 19].

Следует отметить, что при распространении по цилиндрической поверхности рэлеевская волна ослабевает за счет радиального переизлучения на выпуклой поверхности и рассеивается из-за шероховатости поверхности [20, 21].

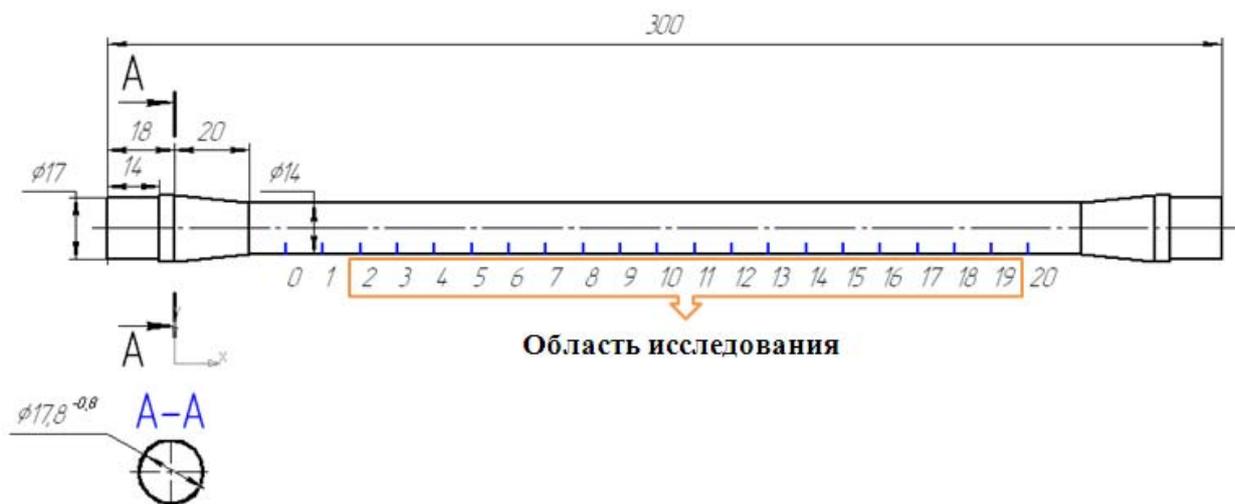


Рис. 3. Размеры и форма образцов для исследований

После термической обработки образцы, имеющие неровности и покрытые окалиной, подверглись механической обработке (зачи-

стке и полировке), далее измерены диаметры образцов с точностью 0,01 мм (рис. 4).

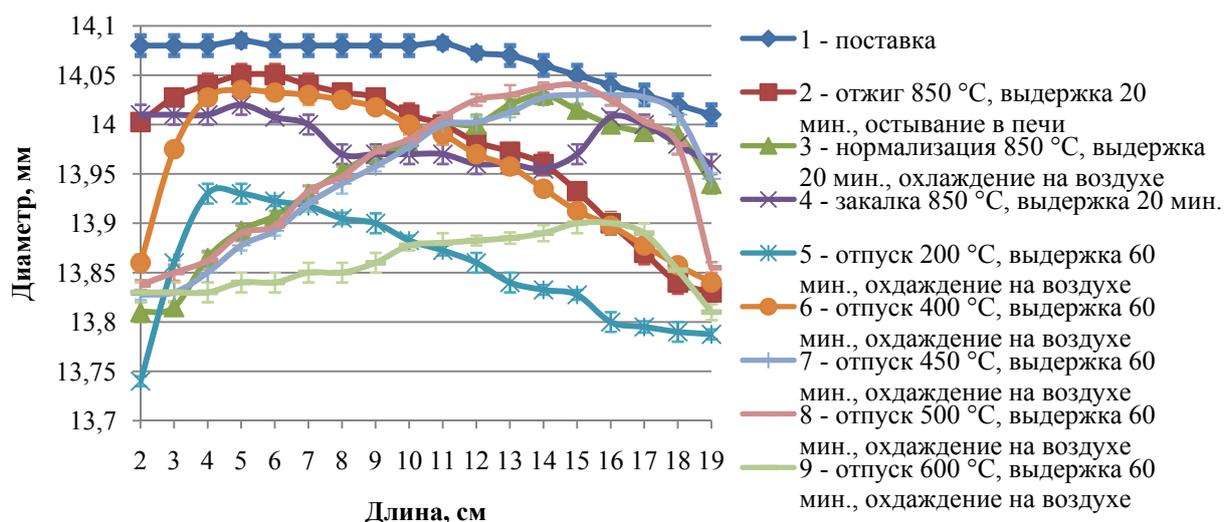


Рис. 4. Изменение диаметра рабочей части образцов по длине

По полученным графикам видно, что наблюдается неравномерность диаметра прутков по длине. Изменение диаметра связано с неточностью токарной обработки. Точ-

ность измерений сказывается на расчетах скоростей волн.

Результаты измерения скоростей распространения рэлеевских волн в образцах представлены на гистограмме (рис. 5).

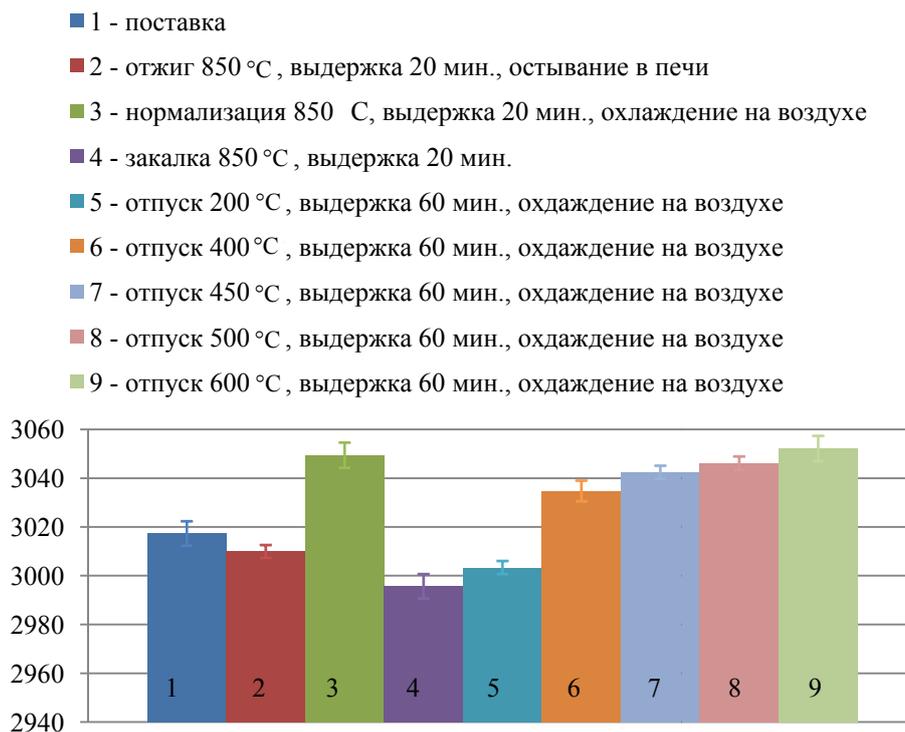


Рис. 5. Скорость рэлеевской волны в зависимости от видов термической обработки

Полученные данные подтверждают результаты исследования влияния термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках [22]:

1) нормализация приводит к увеличению скорости рэлеевской волны;

2) при закалке максимально снижается скорость волны;

3) с увеличением температуры отпуска происходит рост скорости волны.

Особенностью цилиндрических объектов является достоверность, зависящая от качества обработки поверхностей контролируемых объектов [23]. У образца с отжигом можно наблюдать снижение скорости рэлеевской волны. Причиной является присутствие остаточной окалины на поверхности (рис. 6).



Рис. 6. Пруток с остаточной окалиной (а), прутки без остаточной окалины (б)

После закалки скорость рэлеевской волны в прутках составила 2995 м/с, а при высокотемпературном отпуске составила 3050 м/с. Через полученные экспериментальные данные видно, что нормализация

и высокотемпературный отпуск 600 °С имеют схожую поверхностную структуру.

Скорость волны при высокотемпературном отпуске 600 °С увеличилась на 55 м/с и достигла 3050 м/с.

Выводы

Методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн, реализованная на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей, позволила с высокой точностью определить скорости рэлеевских волн и повысить чувствительность к структурным изменениям.

Полученные экспериментальные данные показывают, что увеличение температуры отпуска увеличивает скорость распространения рэлеевской волны в прутке на 55 м/с относительно закалки без отпуска.

Библиографические ссылки

1. Будрин А. Ю. Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 4. С. 12–17.
2. 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.
3. Бабкин С. Э. Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя // Инженерная физика. 2017. № 1. С. 50–54.
4. Артемов В. Е., Паврос С. К. О максимально реализуемой чувствительности контроля методом «многократной тени» // Дефектоскопия. 1982. № 9. С. 28–33.
5. Бабкин С. Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 51–55. DOI: 10.1134/S1061830915050022.
6. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
7. Муравьева О. В., Соков М. Ю. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневое электромагнитно-акустическое метода контроля прутков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 68, № 4. С. 46–50.
8. 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.
9. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных металлоизделий / Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, С. В. Хащина, А. В. Десятниченко, Е. Л. Ноздрачева // Контроль. Диагностика. 2013. № 4. С. 31–35.
10. Толипов Х. Б. Экспериментальная установка для бесконтактного измерения скорости и амплитуды смещений волны Рэля с малого участка поверхности // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. 175 с.
11. 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.
12. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА-дефектоскопов / Г. М. Сучков, В. В. Федоров, А. В. Десятниченко, С. В. Хащина, М. С. Маслова // Дефектоскопия. 2012. № 9. С. 42–47.
13. Дефектоскоп «ДЭМА»: интернет-магазин [Электронный ресурс]. URL: <https://f-ndt.ru/produksiya/ultrazvukovyedefektoskopy/defektoskop-dema-p-detail.html> (дата обращения: 22.04.2020).
14. Дефектоскоп электромагнитно-акустический прутков ДЭМА // Международный промышленный форум неразрушающий контроль, испытания – диагностика: [сайт]. 2018. URL: <https://expo.ronktd.ru/salon/img/dema-p.pdf> (дата обращения: 22.05.2018).
15. 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.
16. Бабкин С. Э. Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя // Инженерная физика. 2017. № 1. С. 50–54.
17. 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.
18. Будрин А. Ю. Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 4. С. 12–17.

19. Грант РФФИ Бел-а № 20-58-0015. URL: <https://kias.rfbr.ru/index.php#> (дата обращения: 25.04.2020).

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

21. Петров К. В., Соков М. Ю., Муравьева О. В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. № 2. С. 135–146.

22. Будрин А. Ю. Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 4. С. 12–17.

23. Муравьева О. В., Булдакова И. В. Использование корреляционной функции при определении скорости ультразвуковой волны в цилиндрических объектах // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. тр. III Всерос. науч.техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2014. С. 217–222.

References

1. Budrin A.Yu. [Influence of heat treatment on the speed of propagation of transverse waves in steel bars]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17. No. 4. Pp. 12-17 (in Russ.).

2. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Budrin A. Yu., Sintsov M.A., Zorin A.V. [Acoustic structuroscopy of steel samples loaded with bending with rotation during fatigue tests]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2019. Vol. 22. No. 1. Pp. 37-44 (in Russ.).

3. Babkin S.E. [Measuring the speed of sound using a meander electromagnetic-acoustic Converter]. *Engineering physics*. 2017. No. 1. Pp. 50-54 (in Russ.).

4. Artemov V.E., Pavros S.K. [On the maximum realized sensitivity of the control method "multiple shadow"]. *Flaw Detection*. 1982. No. 9. Pp. 28-33 (in Russ.).

5. Babkin S.E. [Determination of the Poisson's ratio of ferromagnetic materials by the EMA method]. *Flaw Detection*. 2015. No. 5. Pp. 51-55 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1061830915050022.

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

7. Muravyova O. V., Sokov M. Yu. [Influence of the depth of the defect occurrence on the parameters of the multiple-shadow electromagnetic-acoustic method of rod control / O. V. Muravyova, M. Yu. Sokov]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2016. Vol. 68. No. 4, Pp. 46-50 (in Russ.).

8. Strizhak V. A., Khasanov R. R., Pryakhin A.V. [Features of excitation of an electromagnetic-acoustic Converter with a 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.

9. Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Khashchina S.V., Desyatnichenko A.V., Nozdracheva E.L. [Increasing the capabilities of contactless surface flaw detection of rolled ferromagnetic metal products. – Control]. *Diagnostics*, 2013, no. 4, pp. 31-35 (in Russ.).

10. Tolipov H. B. [Experimental setup for non-contact measurement of the speed and amplitude of Rayleigh wave displacements from a small area of the surface]. *Devices and techniques of experiment*, 2015, no. 1. 175 p. (in Russ.).

11. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Khasanov R.R. [et al.]. [Hardware and software complex for controlling bars by mirror-shadow method on multiple reflections]. *News of higher educational institutions. Instrument making*. 2017. Vol. 60. No. 6. Pp. 565-571 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565571.

12. Suchkov G.M., Fedorov V.V., Desyatnichenko A.V., Khashchina S.V., Maslova M.S. [Generator of probing pulses for EMA-flaw detectors]. *Flaw Detection*. 2012. No. 9. Pp. 42-47 (in Russ.).

13. *Defektoskop «DEMA» : internet-magazin* [Defectoscope "DEMA" online store] [Electronic resource]. Available at: <https://f-ndt.ru/produkt-siya/ultrazvukovye-defektoskopy/defektoskop-dema-p-detail.html> (accessed: 22.04.2020) (in Russ.).

14. *Defektoskop elektromagnitno-akusticheskii prutkov DEMA// Mezhdunarodnyi promyshlennyi forum nerazrushayushchii kontrol', ispytaniya – diagnostika: [sait]*. [Dema electromagnetic-acoustic flaw Detector // international industrial forum non-destructive testing and diagnostics: [website]]. 2018. Available at: <https://expo.ronktd.ru/salon/img/dema-p.pdf> (accessed: 22.05.2018) (in Russ.).

15. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A. [et al.]. [Information and measurement system of excitation, reception, registration and processing of signals of electromagnetic-acoustic converters]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2011. No. 1. Pp. 243-250 (in Russ.).

16. Babkin S.E. [Measuring the speed of sound using a meander electromagnetic-acoustic Converter]. *Engineering physics*. 2017. No. 1. Pp. 50-54 (in Russ.).
17. Babkin S.E., Lebedeva M.Yu., Savchenko Yu. I., Vostroknutova O. N. [Measuring the speed of surface waves of ferromagnetic materials by electromagnetic-acoustic method]. *Electrotechnical systems and complexes*. 2019. No. 4. Pp. 47-51 (in Russ.).
18. Budrin A.Yu. [Influence of heat treatment on the speed of propagation of transverse waves in steel bars]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17, No. 4. P. 12-17.
19. RFBR grant Bel-a # 20-58-0015. Available at: <https://kias.rfbr.ru/index.php#> (accessed: 25.04.2020) (in Russ.).
20. Murav'eva O.V., Zorin V.A. [Method of multiple shadows in the control of cylindrical objects using Rayleigh waves]. *Defectoscopy*. 2017. No. 5. Pp. 3-9 (in Russ.).
21. Petrov K.V., Sokov M.Yu., Murav'eva O.V. [Influence of design features of a pass-through electromagnetic-acoustic Converter on the results of control of cylindrical objects]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2018. No. 2. Pp. 135-146 (in Russ.).
22. Budrin A.Yu. [Influence of heat treatment on the speed of propagation of transverse waves in steel bars]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17. No. 4. Pp. 12-17 (in Russ.).
23. Muraveva O.V., Buldakova I.V. *Ispol'zovanie korrelyatsionnoi funktsii pri opredelenii skorosti ul'trazvukovoi volny v tsilindricheskikh ob'ektakh* [Using the correlation function for determining the speed of an ultrasonic wave in cylindrical objects]. *Izmereniya, kontrol' i diagnostika – 2014 : sb. tr. III Vseros. nauch.tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. Measurements, control and diagnostics-2014: sat. Tr. III vseros. scientific and technical Conf. of students, postgraduates and young scientists]. Izhevsk, Izd-vo IzhSTU. 2014. Pp. 217-222 (in Russ.).

Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves

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

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

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

The paper discusses the possibility of assessing the structural state after different types and modes of heat treatment of bars of steel 45 according to the results of measuring the speed of a Rayleigh wave using the multiple shadow method. To ensure the developed methodology, a DEMA flaw detector and a special overhead electromagnetic-acoustic (EMA) transducer with a magnetization system were used. The converter provides the excitation and reception of Rayleigh waves propagating around the circumference of the bar. Samples of bars in the conditions of supply, annealing, normalization, hardening, and tempering were investigated. For the qualitative measurement of the speeds of Rayleigh waves, the diameters of the rods were measured with an accuracy of 0.01 mm. The results of a change in the velocity of a Rayleigh wave in bars at all heat treatment modes are presented. In the delivery state, the speed of the Rayleigh wave in the bar was 3017 m/s. The speed of the Rayleigh wave in the bar after quenching dropped to 2995 m/s. After normalization, the velocity of the Rayleigh wave increased to 3049 m/s. A gradual increase in tempering temperature leads to an increase in wave velocity. The obtained experimental data show that tempering at a temperature of 600°C and normalization at 850°C increase the propagation velocity of a Rayleigh wave in a bar by 55 m/s relative to quenching without tempering, which indicates similar structural states in the surface layers of the samples.

Keywords: Rayleigh wave velocity, steel, heat treatment, bar stock.

Получено: 08.06.2020