

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-4-12-17

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СТАЛЬНЫХ ПРУТКАХ\*

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

*В статье обсуждаются вопросы возможности оценки изменения скорости ультразвуковой волны в прутках из стали 45 при разных видах термической обработки. Диаметр прутков 14 мм, длина рабочей части 20 см. Для структуроскопии использован электромагнитно-акустический способ ввода и приема поперечных волн осевой поляризации на основе проходного преобразователя. Измерения скорости волн проведены методом многократных отражений по сечению прутка. Термическую обработку кроме состояния поставки выполнили на 8 образцах прутков по следующим режимам: отжиг при 850 °С, нормализация при 850 °С, закалка от 850 °С в масле, отпуск при 200, 400, 450, 500, 600 °С. Представлены результаты изменения скорости поперечной волны в прутках при всех режимах термической обработки. Для повышения точности определения скорости поперечных волн измерены диаметры прутков с шагом 1 см по всей длине. Скорость поперечной волны в прутках после отжига составила 3240 м/с, а после закалки 3170 м/с. Состояние поставки и после нормализации показывает одинаковую скорость поперечной волны 3230 м/с. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что отжиг увеличивает скорость распространения поперечной волны в прутке на 70 м/с относительно закалки без отпуска. С увеличением температуры отпуска наблюдается рост скорости распространения поперечной волны относительно закаленного состояния, достигающий увеличения на 65 м/с до 3235 м/с при температуре 600 °С.*

**Ключевые слова:** скорость поперечной волны, сталь, термообработка, прутковый прокат.

**Введение**

Структуроскопия является одним из разделов неразрушающего контроля наряду с дефектоскопией, интроскопией и контролем размеров. Она позволяет находить нарушения в структурном состоянии, влияющие на ухудшение механических характеристик и долговечность. Ультразвуковая структуроскопия определяет изменения состояния металла на микро-, мезо- и макроструктурном уровне. Известные способы и методы ультразвуковой структуроскопии сталей можно условно разделить на несколько групп, отличающихся измеряемыми параметрами – скоростью и затухание волн, типом используемых волн – объемные волны и волны, распространяющиеся вдоль поверхности, применением для контроля качества термической обработки, структурного состояния, механических свойств.

Ранее [1–4] исследованы зависимости влияния термической обработки на скорости продольных и поверхностных ультразвуковых волн в сталях 38ХА и 20. Для обоих типов сталей отмечено уменьшение скоростей рэлеевских волн после закалки по сравнению с исходным состоянием. Однако с ростом температуры и времени последующего отпуска закаленных образцов наблюдается увеличение скорости на 1 % для стали 38ХА и на 0,6 % для стали 20. Падение скоростей ультразвуковых волн объясняется получением неравновесной структуры и искажением кристаллической решетки при образовании пересыщенных твердых растворов в результате закалки. Последующий отпуск приводит к уравниванию структуры, уменьшению искаженности кристаллической решетки и, соответственно, к росту скорости ультразвуковых волн.

В работах [5–7] исследована связь термической обработки и механических свойств образцов стали 40Х и 60С2А и скорости распространения ультразвуковых волн. Для структуроскопии использован электромагнитно-акустический способ ввода и приема поперечных волн осевой поляризации на основе проходного преобразователя. Измерения скорости волн проведены методом многократных отражений по сечению прутка. Полученные зависимости позволяют по скорости ультразвуковых волн надежно различать структурные состояния между перлито-ферритной составляющей, неполностью распавшимся мартенситом и игольчатым мартенситом. В работах [8–10] рассмотрены вопросы по влиянию накопленной поврежденности на долговечность элементов конструкций.

Использование электромагнитно-акустического способа ввода и приема поперечных волн позволило с необходимой точностью измерять разницу времени прохождения волн ортогональной поляризации для акустической тензометрии с целью оценки напряженно-деформированного состояния различных изделий [11–13].

С особой остротой стоит вопрос об обследовании металлических конструкций, транспортного и энергетического металла, деталей подвижного состава и машиностроения с целью диагностики структурного состояния и нарушений структуры. Таким образом, выявление закономерностей взаимосвязи скорости ультразвука и структурного состояния сталей и сплавов имеет особую актуальность. Используемые в настоящее время методы и приборы дефектоскопии имеют существенные ограничения для решения такого рода задач, поскольку не позволяют выявлять

различия в структуре металла. Использование электромагнитно-акустического способа ввода и приема ультразвуковых волн позволяет повысить точность измерений акустических характеристик [14–16].

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

**Методика измерений. Результаты исследований**

Для исследований изготовлены 9 образцов прутков из среднеуглеродистой стали 45 (рис. 1), которые подверглись разным режимам термической обработки:

1. В состоянии поставки.
2. Отжиг при 850 °С с выдержкой 20 минут и остыванием в печи.
3. Нормализация при 850 °С с выдержкой 20 минут в печи и охлаждением на воздухе.
4. Закалка от 850 °С с выдержкой 20 минут в печи, охлаждение в воде.
- 5–9. Отпуск при 200, 400, 450, 500, 600 °С с выдержкой 60 минут в печи и последующим охлаждением на воздухе.

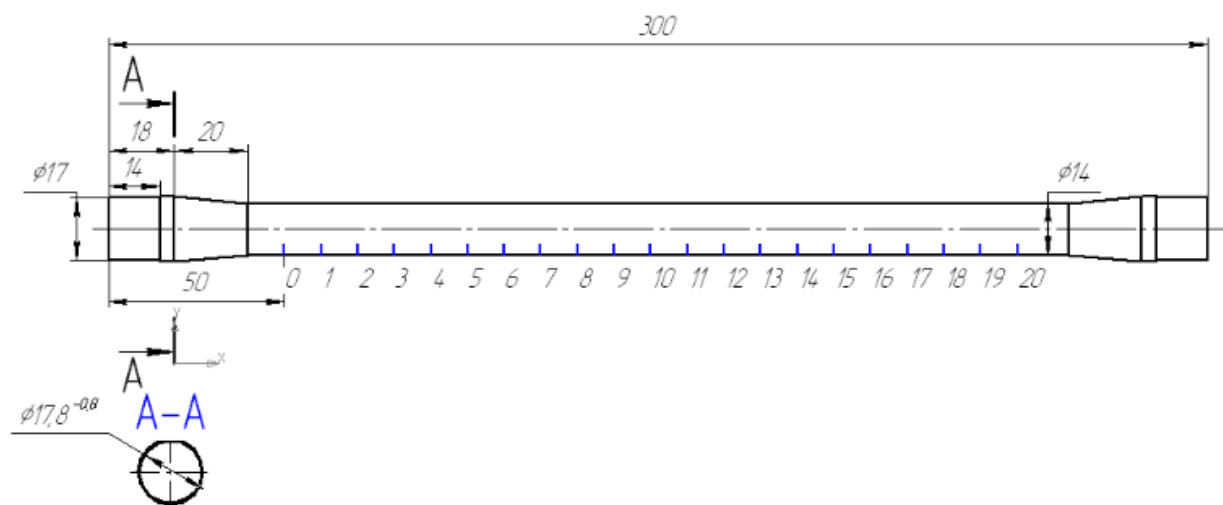


Рис. 1. Размеры и форма образцов для исследований

После термической обработки образцы прутков тщательно зачищены от окалины и неровностей. Диаметры прутков в области исследования измерялись микрометром с точностью до 0,01 мм (рис. 2). Из трех приведенных зависимостей видно, что диа-

метр по длине образцов изменяется на 0,1–0,2 мм, что связано с неточностью токарной обработки. Учет изменения диаметра необходим для расчетов скорости распространения ультразвуковых волн по поперечному сечению образцов.

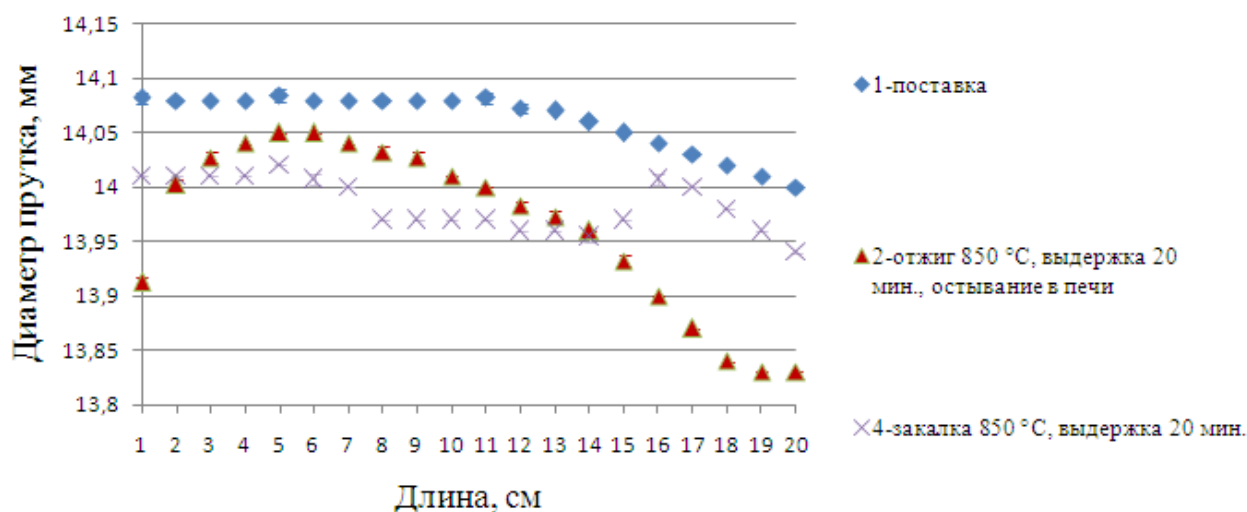


Рис. 2. Изменение диаметра рабочей части образцов по длине

При исследованиях образцов пруткового проката использованы проходные электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи, основное преимущество которых – бесконтактность, позволяющая получать серию многократных отражений по диаметру прутка, что позволяет с высокой точностью измерять время распространения ультразвука по поперечному сечению образцов [17–19]. В эксперименте представлены результаты измерений скорости поперечной волны с использованием времени прихода импульсов многократных отражений и корреляционной функции [20–22]. Обработку сигналов осуществили с помощью программного обеспечения [23].

С учетом измеренных диаметров и времени распространения волн по сечению образцов рассчитаны скорости распространения поперечных волн по формуле

$$C_i = \frac{d \cdot m}{t_{n+m} - t_n},$$

где  $(t_{n+m} - t_n)$  – время между  $(n+m)$  и  $m$  импульсами;  $n$  – количество переотражений на диаметре прутка (рис. 3);  $d$  – диаметр прутка.

Полученные результаты расчетов скорости волн для исследованных образцов представлены на рис. 4

Металлография образцов после закалки в воде от 850 °С (мартенсит) и после закалки и высокого отпуска при 600 °С (феррито-перлитная структура) показаны на рис. 5.

Построена гистограмма изменения скорости ультразвука от влияния разных режимов и видов термической обработки образцов прутков (рис. 6).

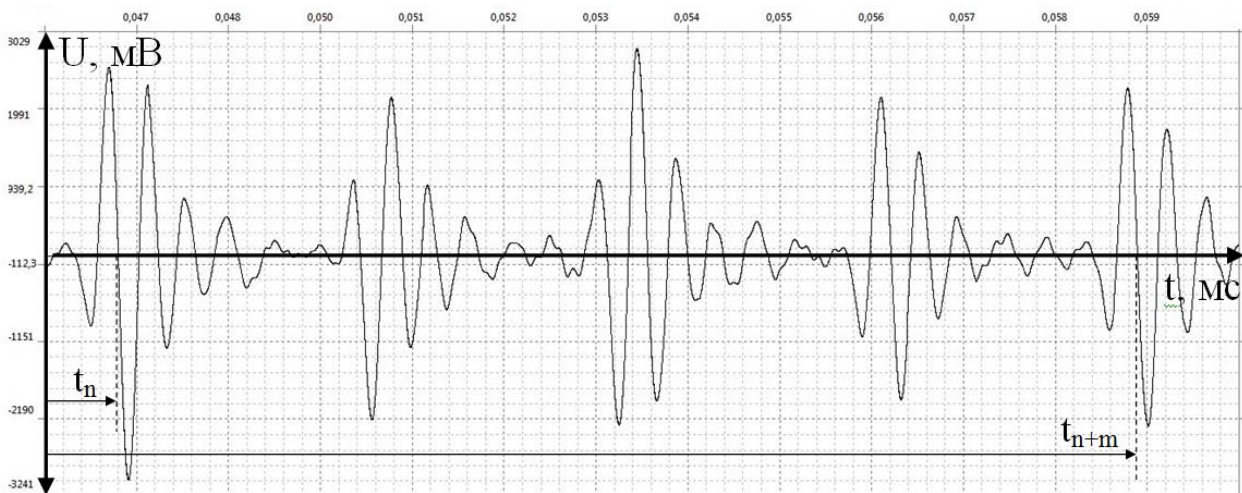


Рис. 3. Осциллограммы многократных отражений

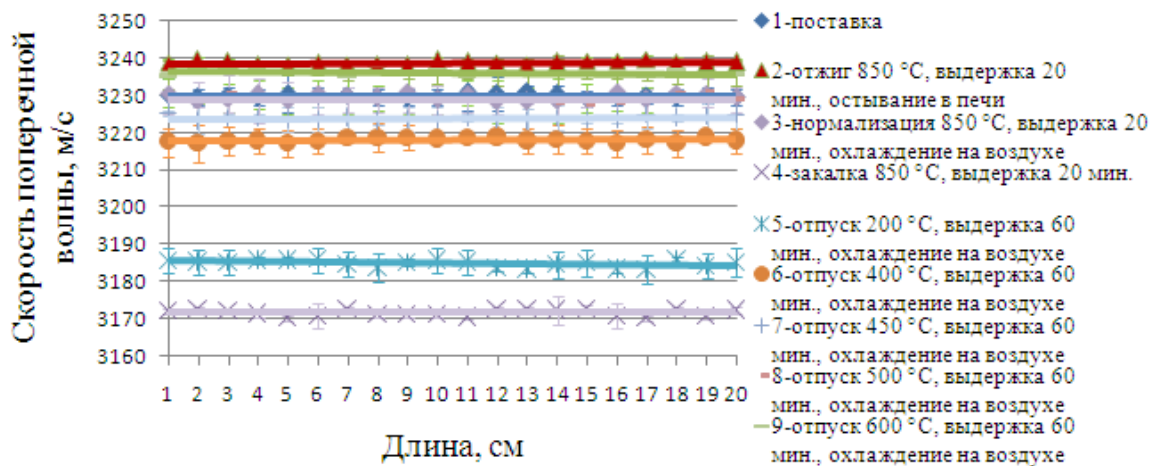


Рис. 4. Распределение скорости поперечной волны по длине образца



Рис. 5. Металлография образцов: а – образец № 4 после закалки (увеличение 500×); б – образец № 9 после закалки и отпуска 600 °С (увеличение 200×)

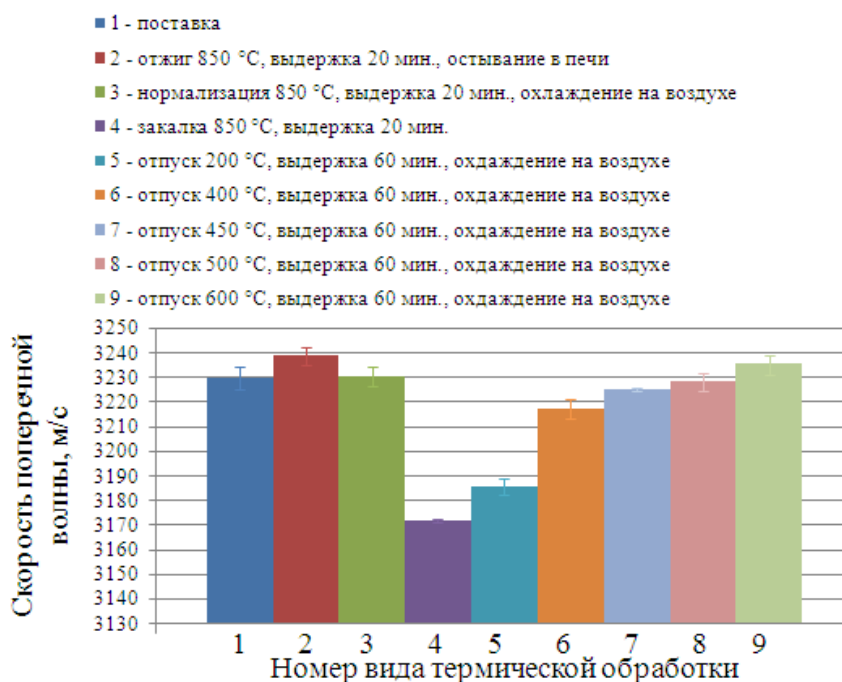


Рис. 6. Скорость поперечной волны в зависимости от видов термической обработки

По данной гистограмме видно, что термообработка влияет на акустические свойства прутков. Полученные экспериментальные данные показывают, что отжиг увеличивает скорость распространения поперечной волны в прутке, закалка максимально снижает скорость распространения поперечной волны. С увеличением температуры отпуска, показатели скорости возвращаются к показателям в состоянии поставки. Скорость поперечной волны в прутках после отжига составила 3240 м/с, а после закалки 3170 м/с. Состояние поставки и после нормализации показывают одинаковую скорость поперечной волны 3230 м/с, что может свидетельствовать об одинаковых структурных состояниях. Полученные экспериментальные данные показывают, что отжиг увеличивает скорость распространения поперечной волны в прутке на 70 м/с относительно закалки без отпуска. С увеличением температуры отпуска наблюдается рост скорости распространения поперечной волны относительно закаленного состояния, достигающий увеличения на 65 м/с до 3235 м/с при температуре 600 °С. Полученные результаты могут быть исполь-

зованы для контроля качества термической обработки круглого проката из стали 45.

**Выводы**

Возможность реализации электромагнитно-акустического способа ввода и приема поперечных волн осевой поляризации на основе проходного преобразователя позволило существенно повысить чувствительность к структурным изменениям при анализе сигналов и обеспечить высокую точность определения скорости поперечных волн. Измерения скорости поперечных волн проведены методом многократных отражений по сечению прутка.

Термическую обработку, кроме состояния поставки, выполнили на 8 образцах прутков по следующим режимам: отжиг при 850 °С, нормализация при 850 °С, закалка от 850 °С в масле, отпуск при 200, 400, 450, 500, 600 °С.

Скорость поперечной волны в прутках после отжига составила 3240 м/с, а после закалки 3170 м/с. В состоянии поставки и после нормализации образцов отмечена одинаковая скорость поперечной волны – 3230 м/с. Полученные экспериментальные дан-

ные показывают, что отжиг увеличивает скорость распространения поперечной волны в прутке на 70 м/с относительно закалки без отпуска. С увеличением температуры отпуска наблюдается рост скорости распространения поперечной волны относительно закаленного состояния, достигающий увеличения на 65 м/с до 3235 м/с при температуре 600 °С.

#### Библиографические ссылки

1. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Фольмер С. В. Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности // *Контроль. Диагностика*. 2009. № 1. С. 22–32.

2. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Абабков Н. В. Разрушение и диагностика материалов. М. : Сер. Техническое диагностирование. Инновационное машиностроение; Кемерово : Сибирская издательская группа, 2016. 479 с.

3. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, S. V. Barabanova, V. L. Kozhemyakin, S. I. Kabanov // *Дефектоскопия*. 1997. № 10. С. 79–84.

4. Быстродействующая диагностическая акустико-эмиссионная система / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, S. I. Kabanov, V. L. Kozhemyakin, A. E. El'tsov, E. Yu. Lebedev // *Дефектоскопия*. 1998. № 7. С. 8–14.

5. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Кокорина, М. А. Лойферман // *В мире неразрушающего контроля*. 2013. № 1 (59). С. 52–60.

6. 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.

7. Муравьев В. В., Муравьева О. В., Петров К. В. Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн // *Дефектоскопия*. 2017. № 8. С. 20–28.

8. 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.

9. Hyung M.K. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform // *Дефектоскопия*. 2016. № 3. С. 57–66. (DOI: 10.1134/S1061830916030049)

10. 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.

11. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. № 12. С. 34–37.

12. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // *Дефектоскопия*. 2015. № 5. С. 3–16.

13. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производ-

ства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 13–23.

14. Там же.

15. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // *Дефектоскопия*. 2015. № 5. С. 3–16.

16. Бабкин С. Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // *Дефектоскопия*. 2015. № 5. С. 51–55 (DOI: 10.1134/S1061830915050022).

17. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // *Дефектоскопия*. 2016. № 2. С. 33–41.

18. Методические особенности использования sh-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 3–11.

19. Муравьев В. В., Злобин Д. В., Платунов А. В. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. Т. 60. № 6. С. 572–577.

20. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // *Автоматрия*. 2016. Т. 52. № 4. С. 62–70.

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

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

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

#### References

1. Smirnov A.N., Muravev V.V., Folmer S.V. [Structural-phase state and resource of a long-working metal of technical devices of hazardous production facilities, prospects for the further development of performance assessment methods]. *Kontrol. Diagnostika*, 2009, no. 1, pp. 22-32 (in Russ).

2. Smirnov A.N., Muravev V.V., Ababkov N.V. *Razrushenie i diagnostika materialov* [Destruction and diagnostics of materials]. Moscow, Ser. Technical diagnosis. Innovative engineering, Kemerovo, Siberian Publishing Group, 2016, 479 p (in Russ.).

3. Seriousnov A.N., Muravev V.V., Stepanova L.N., Barabanova S.B., Kozhemyakin V.L., Kabanov S.I. [Localization of acoustic emission signals in metal structures]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1997, no. 10, pp. 79-84 (in Russ.).

4. Seriousnov A.N. Muravev V.V., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., El'tsov A.E., Lebedev E.Yu. [High-speed diagnostic acoustic emission system]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1998, no. 7, pp. 8-14 (in Russ.).

5. Muraveva O.V., Muravev V.V., Strizhak V.A., Kokorina E.N., Loiferman M.A. [The actual sensitivity of the input acoustic control of bar stocks in the production of springs]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2013, no. 1 (59), pp. 52-60 (in Russ.).

6. Muravev V.V., Muraveva O.V., Kokorina E.N. [Acoustic structuroscopy and defectoscopy of rods from steel 60C2A in the production of springs with nanoscale structure]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya*, 2013, no. 4, pp. 66-70 (in Russ.).
7. Muravev V.V., Muraveva O.V., Petrov K.V. [The relationship of the mechanical properties of bar stock from 40X steel with the speed of volumetric and Rayleigh waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, no. 8, pp. 20-28 (in Russ.).
8. Dobrovolsky V.I., Dobrovolsky S.V. et al. [Experimental substantiation of a method for predicting low cycle durability of structural elements]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2014, no. 1, pp. 36-38 (in Russ.).
9. Hyung, M.K. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. Дефектоскопия. – 2016. – № 3. – С. 57–66. (DOI: 10.1134/S1061830916030049)
10. Muravev V.V., Muraveva O.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A., Zorin A.V. [Acoustic structuroscopy of steel specimens loaded by bending with rotation during fatigue tests]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 37-44 (in Russ.).
11. Muravev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. [Assessment of residual stresses in rails using the electromagnetic-acoustic wave input-receive method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 12, pp. 34-37 (in Russ.).
12. Muravev V.V., Volkova L.V., Lapchenko M.A. [Ultrasonic control of residual stresses in the bandages of locomotive wheels during production]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 5, pp. 3-16(in Russ.).
13. Muravev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [Studies of the structural and stress-strain state of the rails of the current production by the method of acoustoelasticity]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13-23(in Russ.).
14. Ibid.
15. Muravev V.V., Volkova L.V., Lapchenko M.A. [Ultrasonic control of residual stresses in the bandages of locomotive wheels during production]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 5, pp. 3-16(in Russ.).
16. Babkin S.E. [Determination of Poisson's ratio of ferromagnetic materials by the EMA method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, no. 5, pp. 51–55 (in Russ.). DOI: 10.1134 / S1061830915050022.
17. Muraveva O.V., Lenkov S.V., Muravev V.V., Myshkin Yu.V., Murashov S.A. [Factors affecting the efficiency of excitation of torsion waves during waveguide inspection of pipes]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 2, pp. 33-41(in Russ.).
18. Muraveva O.V., Muravev V.V. [Methodological features of the use of sh-waves and Lamb waves in assessing the anisotropy of the properties of sheet metal]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, No. 7, pp. 3-11(in Russ.).
19. Muravev V.V., Zlobin D.V., Platonov A.V. [A device for studying the acoustoelastic characteristics of thin wires]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 572-577(in Russ.).
20. Muraveva O.V., Muravev V.V., Gabbasova M.A., Buldakova I.V., Sokov M.Yu. [Analysis of reflected signals during the control of cylindrical samples by the multiple mirror-shadow method]. *Avtometriya*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 62-70 (in Russ.).
21. Muraveva O.V., Zorin V.A. [The multiple shadow method for monitoring cylindrical objects using Rayleigh waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, no. 5, pp. 3-9 (in Russ.).
22. Muraveva O.V., Sokov M.Yu. [Influence of the depth of the defect on the parameters of the multiple-shadow electromagnetic-acoustic method of bar inspection]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, vol. 68, no. 4, pp. 46-50 (in Russ.).
23. Strizhak V.A., Hasanov R.R., Pryahin A.V. [Features of the excitation of an electromagnetic-acoustic transducer with a waveguide 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.

\*\*\*

### The Influence of Heat Treatment on the Propagation Velocity of Shear Waves in Steel Bars

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

The paper discusses the possibility of assessing changes in the speed of an ultrasonic wave in bars of steel 45 for different types of heat treatment. The diameter of the rods is 14 mm, the length of the working part is 20 cm. An electromagnetic-acoustic method of input and reception of transverse waves of axial polarization based on a transducer is used for structuroscopy. The wave velocity was measured by the method of multiple reflections over the cross section of the bar. In addition to the delivery status, heat treatment was performed on 8 bar samples in the following modes: annealing at 850 °C, normalization at 850 °C, quenching from 850 °C in oil, tempering at 200 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 600 °C. The results of a change in the shear wave velocity in bars under all heat treatment conditions are presented. To increase the accuracy of determining the shear wave velocity, the diameters of the rods were measured with a step of 1 cm along the entire length. The velocity of the transverse wave in the rods after annealing was 3240 m/s, and after quenching, 3170 m/s. The states of delivery and after normalization show the same shear wave velocity of 3230 m/s. The obtained experimental data show that annealing increases the shear wave propagation velocity in the bar by 70 m / s relative to quenching without tempering. With an increase in tempering temperature, an increase in the shear wave propagation velocity relative to the quenched state is observed, reaching an increase of 65 m/s to 3235 m/s at a temperature of 600 °C.

**Keywords:** shear wave speed, steel, heat treatment, bar stock.

Получено: 29.10.19