

УДК 621.179

В.В. Муравьев^{1,2}, О.В. Муравьева^{1,2}, Е.Н. Кокорина²¹ Физико-технический институт УрО РАН² Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова**АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ
ПРУТКОВ ИЗ СТАЛИ 60С2А ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРУЖИН
С НАНОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРОЙ***

Аннотация. Исследованы закономерности изменения основных параметров продольных и поперечных волн в прутках из пружинно-рессорной стали 60С2А после термической обработки в различных режимах. Экспериментально получены модули упругости (модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона). Показана реальная чувствительность к дефектам в прутках-заготовках путем зеркально-теневого метода на многократных отражениях с использованием электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема ультразвука.

Ключевые слова: продольные и поперечные волны, скорость и затухание ультразвуковых волн, электромагнитно-акустическое преобразование, термическая обработка, анизотропия.

**ACOUSTIC STRUCTURAL TESTING AND NONDESTRUCTIVE TESTING OF
STEEL RODS (60C2A) IN THE PRODUCTION OF NANOSCALED STRUCTURE SPRINGS**

Abstract. The mechanisms of changing of key parameters of longitudinal and shear waves in springsteel rods (60C2A) after different thermal treatment modes are described. The methods presented in the article provide high precise evaluation of such key parameters as wave speed and wave damping, efficiency of electromagnetic acoustic transformation which are used in assessment of elastic characteristics, thermal treatment quality and structure of material in the process of realization of electromagnetic acoustic repeated reflection method. Real flaw sensitivity of shadowgraph method based on repeated reflections under electromagnetic acoustic impulse and receiving of ultrasound tested on steel rods is demonstrated.

Keywords: spring steel, nanoscaled structure, electromagnetic acoustic transformation, thermal treatment, nondestructive testing, shadowgraph method, repeated reflections.

При поддержке Роснано с 2010 г. на ООО «НПЦ «Пружина»» (г. Ижевск) организовано производство цилиндрических пружин сжатия высотой до 1600 мм при диаметре прутка от 8 до 70 мм из сталей 55С2А, 60С2А, 60С2ХА, 60С2ХФА. Навивка винтовых пружин осуществляется по технологической схеме высокотемпературной термомеханической обработки (температура нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) 1020 °С, деформация 20 %, отпуск при 460 °С), позволяющей получить высокий уровень эксплуатационных характеристик за счет формирования сверхмелкозернистой (наноразмерной) субструктуры внутренней (рис. 1, а) и наружной (рис. 1, б) поверхности прутка [1]. При производстве пружин прутковый прокат подвергается множеству технологических операций, существенно изменяющих структуру металла и создающих напряженно-деформированное состояние, при котором накапливаются дефекты и образуются трещины. В качестве примера приведен дефект прутка-заготовки в виде раскатанного загрязнения (рис. 1, в) и соответствующий ему дефект

пружины, унаследованный от заготовки (рис. 1, г). Видно, что в процессе термомеханического воздействия дефект видоизменяется, увеличивается в размерах.

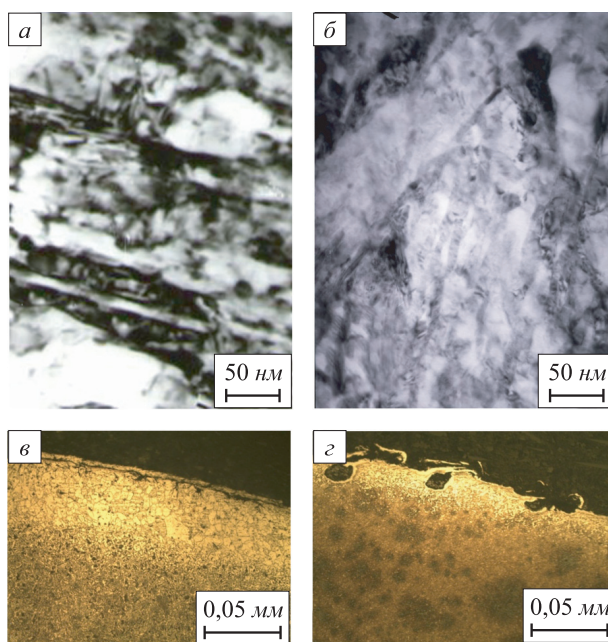


Рис. 1. Мелкодисперсная наноразмерная субструктура материала винтовых пружин – внутренней (а) и наружной (б) поверхности прутка [1], дефекта прутка-заготовки (в) и дефекта, унаследованного от прутка при производстве пружины (г)

* Работа выполнена при частичной поддержке Программы стратегического развития «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова» на 2012 – 2016 гг. (рег. номер ПСР/М2/Н2.5/МВВ); гранта им. Г.А. Тихонова для аспирантов и молодых ученых (рег. номер ГТ-4-12); Программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012 – 2014 гг. (рег. номер 12-У-2-1013).

Физико-механические свойства материалов после внешних энергетических воздействий и появление в них дефектов выгодно оценивать неразрушающими методами структуроскопии, наиболее эффективным из которых является ультразвуковой [2, 3]. В работах [4, 5] показано, что наиболее чувствительным методом структуроскопии и дефектоскопии материала прутков является зеркально-теневой метод на многократных отражениях, реализованный с помощью электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема акустических волн. Основными информативными параметрами при реализации такого метода являются скорость распространения и коэффициент затухания ультразвуковых волн.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния структурных изменений в пружинно-рессорной стали 60С2А на измеряемые характеристики акустических волн и оценка реальной чувствительности к дефектам в прутках-заготовках с использованием зеркально-теневого метода на многократных отражениях.

Для оценки возможностей акустического метода контроля качества термической обработки изготовлены образцы прутков diam. 24 мм и длиной от 150 до 200 мм из стали 60С2А. Режимы термической обработки, измеренные скорости объемных волн и модули упругости исследуемых образцов приведены в таблице.

Структуры исследуемых образцов показаны на рис. 2: образец 1 – металл соответствовал состоянию поставки; остальные образцы изготовлены из материала, полученного при отработке операций технологического цикла производства пружин на стадии термической обработки. Во всех случаях нагрев осуществляли до температуры 870 °С токами высокой

частоты или в электропечи (ЭП). Охлаждение образцов проводили в полимерной закалочной жидкости (ПЗЖ) Feroquench 2000 с последующими отпусками или без них. Для сравнения выполнена закалка в воде и нормализация с охлаждением на воздухе.

При исследовании использован электромагнитно-акустический способ возбуждения и приема ультразвуковых волн, существенным преимуществом которого является бесконтактность. За счет бесконтактности отсутствуют потери на границе преобразователь – объект контроля и наблюдается меньшее расхождение волны вследствие формирования цилиндрического фронта. Таким образом, можно получить серию многократных отражений, и следовательно, повысить точность измерения параметров скорости и затухания акустических волн и чувствительность зеркально-теневого метода дефектоскопии [4, 5]. Использование специальных систем подмагничивания обеспечивает излучение (прием) поперечных и продольных волн с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях по сечению прутка, а также поперечных волн с осевой поляризацией в данном радиальном направлении [6].

В качестве информативных параметров при исследованиях использовали скорость и затухание продольных и поперечных волн. Погрешность определения скорости не превышала 1,0 м/с (или 0,01 %). Полученные значения скоростей объемных волн при известной плотности материала прутка (ρ) позволили определить модули упругости среды: модуль Юнга E , модуль сдвига G , коэффициент Пуассона ν .

По результатам измерения времени распространения волн по диаметру прутка рассчитаны скорости объемных (продольных C_l и поперечных C_t) волн радиальных направлений по сечению, модули упругос-

Режимы термической обработки, измеренные скорости объемных волн и модули упругости исследуемых образцов

Образец	Режим термической обработки	C_l , м/с	C_t , м/с	G , ГПа	E , ГПа	ν
1	Нагрев до 870 °С, ЭП, 20 мин; закалка в масле; отпуск 450 °С, 1 ч	5919	3246	82,2	211,2	0,285
2	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 15 с; нормализация	5917	3238	81,8	210,4	0,286
3	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 20 с; закалка в ПЗЖ, 12 %, 25 °С; отпуск 410 °С, 75 мин	5900	3215	80,6	207,9	0,289
4	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 15 с; закалка в воде, 45 °С	5861	3170	78,4	202,8	0,293
5	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 20 с; закалка в ПЗЖ, 12 %, 25 °С	5786	3139	76,9	198,5	0,291
6	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 15 с; закалка ПЗЖ, 6 %, 55 °С	5874	3206	80,2	206,5	0,288
7	Нагрев до 870 °С, ЭП, 35 мин; закалка в ПЗЖ, 11 %, 25 °С	5902	3215	80,6	207,9	0,289
8	Нагрев до 870 °С, ТВЧ, 15 с; закалка в ПЗЖ, 12 %, 25 °С; отпуск 250 °С, 75 мин	–	3219	80,8	–	–

Примечание. ЭП – электропечь; ТВЧ – ток высокой частоты; ПЗЖ – полимерная закалочная жидкость.

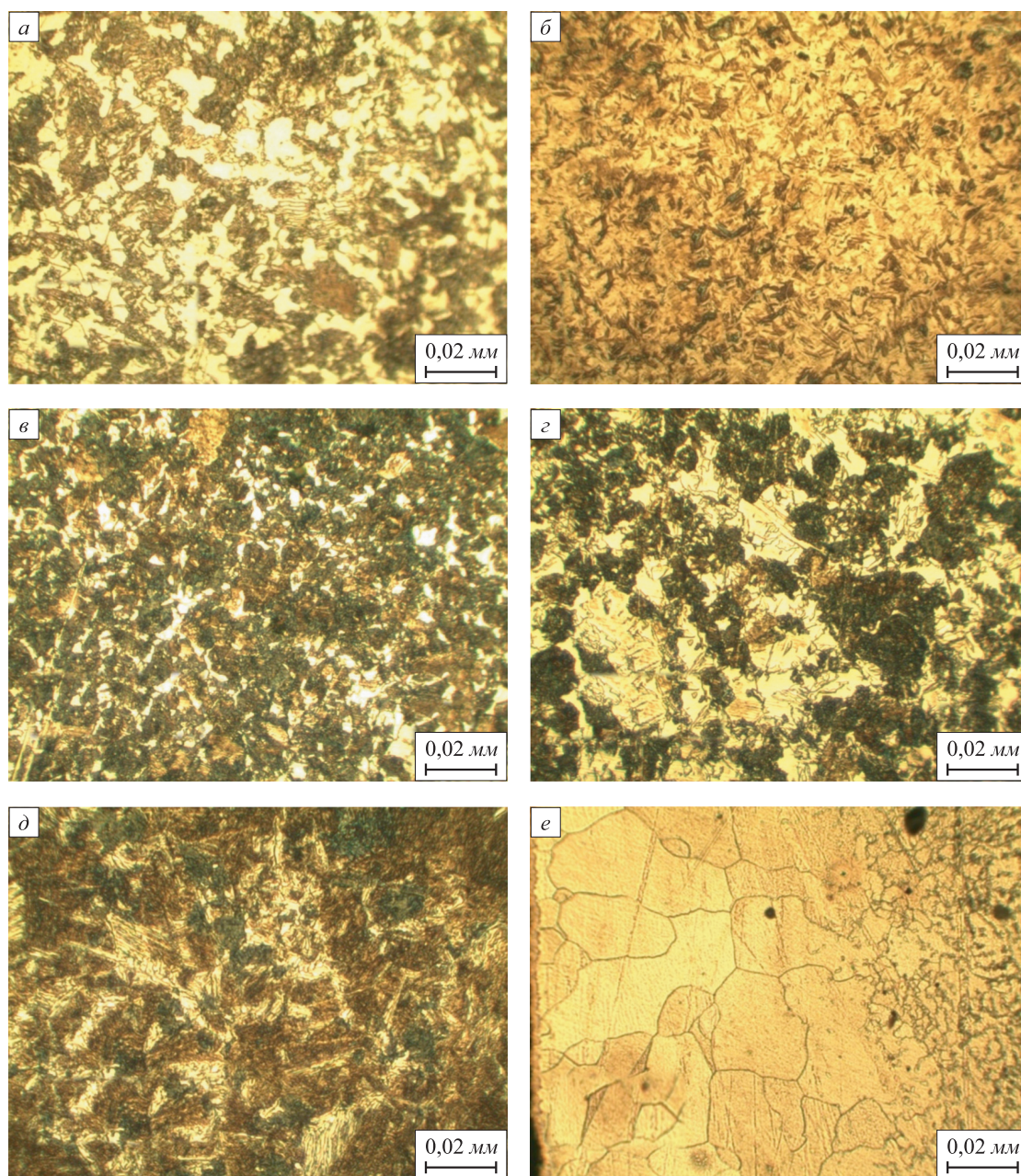


Рис. 2. Структура исследуемых образцов:
а – образец 2; б – образец 4; в и з – образец 6 (центр и край); д – образец 8 (центр); е – образец 7 (край)

ти в образцах, подвергнутых термической обработке в различных режимах. Данные представлены в таблице.

Результаты акустической структуроскопии

С увеличением номера образца от 1 до 5 растет жесткость термической обработки, сопровождающаяся увеличением содержания мартенсита в структуре стали. В образце 1 наблюдается микроструктура мелкозернистого перлита, в образце 2 – микроструктура пластинчатого перлита, в образце 3 – микроструктура троостомартенсита балл 3 – 4, в образце 4 – микроструктура мартенсита, в образце 5 – микроструктура мартенсита балл 6 – 7.

Из данных таблицы следует, что скорости распространения продольных и поперечных волн снижаются с увеличением неравновесности структурного состояния и, соответственно, внутренних структурных напряжений, полученных с помощью разных режимов термической обработки (с увеличением номера образца от 1 до 5), что соответствует представлениям работы [7], согласно которым с ростом степени искажений кристаллической решетки и неоднородности в распределении структурных элементов уменьшается скорость распространения ультразвуковых волн.

Наиболее высокие скорости объемных волн, значения модуля Юнга и сдвига и минимальный коэффициент Пуассона наблюдаются в образце 1. Минимальные

значения скоростей волн, модулей Юнга и сдвига среди всех исследованных образцов наблюдаются в образце 5, коэффициент Пуассона в этом образце близок к максимальному. Следует отметить, что к изменениям структуры металла наиболее чувствительным из рассмотренных параметров является скорость поперечной волны (максимальные изменения скорости $\Delta C_t = 3,3\%$, $\Delta C_l = 2,3\%$), при этом изменение модулей упругости составляет $\Delta G = \Delta E = 6\%$.

Отмечено, что по разным направлениям в сечении прутка скорости волн существенно отличаются. Изменения скорости могут свидетельствовать о структурной анизотропии вследствие неравномерности охлаждения при погружении в закалочную среду, что характерно для неодновременной закалки по длине прутка. Отличия могут быть также обусловлены эллипсностью прутка по диаметру (ΔD), обусловленному технологией прокатки, о чем свидетельствует одинаковый характер распределения скорости волн по углу по всем сечениям. Среди образцов 1 – 5 анизотропия скорости по разным направлениям сечения прутка незначительна, например, в образцах 1 и 5 она не превышает 6 м/с. Это соответствует отклонению диаметра, не превышающему 50 мкм, что менее предельных отклонений при точности прокатки Б по ГОСТ 14959.

В образцах 6 – 8 с реализованными неравновесными структурами, созданными при отработке режимов с недогревом под закалку и уменьшением скорости охлаждения при закалке ниже критической, структуры неоднородны как по сечению и длине образца, так и по элементам структурных состояний. Микроструктура образца 6 – неравновесная: в сердцевине – мартенсит, сорбит и продукты немартенситного распада (рис. 2, в); по краю – зерна феррита, перлита, ферритная сетка по границам зерен, глубина зоны недогрева 7,4 мм (рис. 2, з). Микроструктура образца 7 – мартенсит, троостит, пластинчатый перлит, мелкозернистый феррит (преобладает), обезуглероженный слой равномерный по всей окружности прутка глубиной 0,7 мм, крупнозернистый феррит (рис. 2, е). Микроструктура образца 8 – троостит, пластинчатый перлит и мелкозернистый феррит (рис. 2, д), обезуглероженный слой равномерный по всей окружности прутка глубиной 0,4 мм, крупнозернистый феррит.

Скорости упругих волн, модули Юнга и сдвига образцов 6 – 8 находятся в пределах значений образцов 3 и 4. Наблюдается существенное различие скоростей поперечных волн в разных сечениях по длине образца (0,70, 0,15 и 0,35 % для образцов 6, 7 и 8 соответственно), что является признаком различия структурных состояний по длине образца вследствие неодновременности охлаждения при вертикальном погружении прутка в закалочную среду.

Характерной особенностью неравновесных структур образцов 6 – 8 является существенная анизотропия скорости в зависимости от направления распространения по диаметру прутка, где отклонение скорости достигает 32 м/с в образце 6 и 42 м/с в образце 8.

В образце 8 с неравновесной структурой, характеризующейся наряду с мартенситом наличием продуктов немартенситного распада (троостита, сорбита отпуска) и обезуглероженного слоя с крупнозернистым ферритом по цилиндрической поверхности, наблюдается наибольшее затухание волн с возможностью их трансформации, проявляющееся в виде кривой с периодическими изменениями огибающей амплитуд сигналов.

Результаты акустической дефектоскопии

Разработанный метод использован для дефектоскопии партии прутков для производства пружин в количестве 16 штук диам. от 10 до 30 мм различных производителей (ОАО «Ижсталь», ЗАО «Златоустовский МЗ», ЗАО «Омутнинский МЗ», ОАО «Северсталь-Метиз») с различным качеством обработки поверхности. Участки прутков, забракованные указанным методом, и локализованные с точностью ± 1 мм, были подвергнуты металлографическому анализу с разрезкой вдоль и поперек образцов для оценки реальной чувствительности метода. Обнаруженные дефекты классифицировали в соответствии с ГОСТ 1778 и 21014.

Фото микрошлифов для некоторых типов обнаруженных дефектов представлены на рис. 3: единичное неметаллическое включение округлой формы 0,15×0,15 мм (рис. 3, а); неметаллические включения, вытянутые по направлению волокна (рис. 3, б); мелкие неметаллические включения, расположенные в виде строчек (рис. 3, в); дефект, расположенный под острым углом к поверхности глубиной 0,1 мм (рис. 3, з); включение, вытянутое по направлению волокна длиной 1,5 мм (рис. 3, д); дефекты поверхности, имеющие форму мешка, заполненные окалиной, с глубиной залегания 0,07 мм, зона прилегающая к дефектам обезуглерожена на глубину 0,12 мм (рис. 3, е); дефекты в форме мешка, поверхность заготовок в местах расположения дефектов обезуглерожена на глубину до 0,12 мм (рис. 3, ж). Все обнаруженные дефекты согласно классификации являются недопустимыми при производстве пружин.

Следует особо подчеркнуть, что глубина и раскрытие трещин, размеры включений составляют десятые доли от длины акустической волны при использовании разработанного зеркально-теневого метода на многократных отражениях в сравнении с традиционным эхо-методом ультразвукового контроля, позволяющим выявить дефекты, соизмеримые с длиной волны. Высокая чувствительность метода объясняется меньшими потерями энергии при распространении акустической волны вследствие расхождения волны только в одном направлении по образующей прутка, в то время как использование пьезопреобразователей в эхо-методе приводит к расхождению по закону сферической волны.

Выводы. Измерения скорости и затухания объемных волн являются тонким инструментом при исследова-

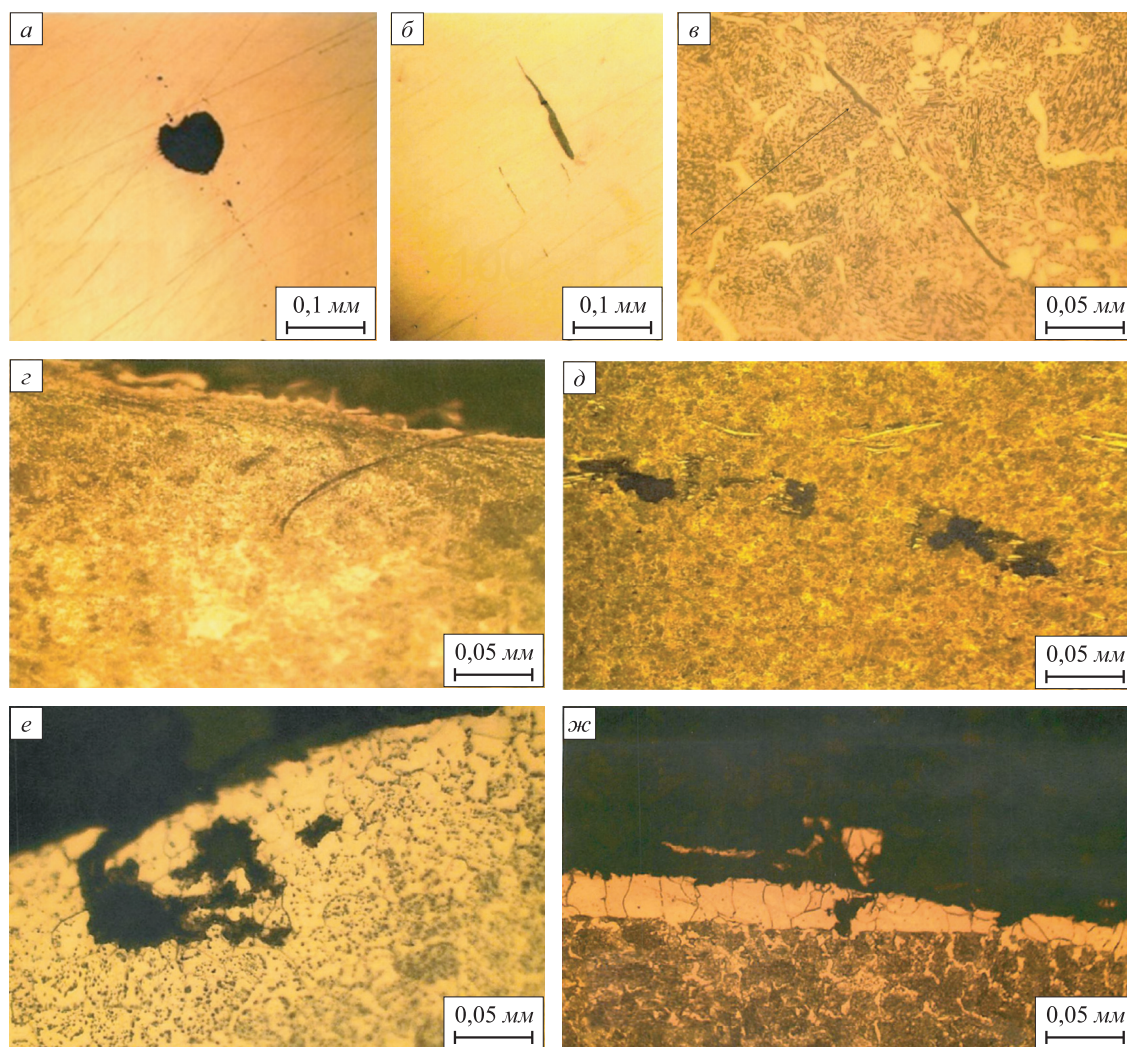


Рис. 3. Микродефекты, обнаруженные на продольных и поперечных микрошлифах забракованных прутков:

а – силикат недеформирующийся; *б* – сульфиды; *в* – оксиды строчечные; *г* – дефект типа «закат»; *д* – силикаты хрупкие; *е* – раскатанные загрязнения; *жс* – раскатанный пузырь

ниях структурных (наноразмерных) состояний термоупрочняемых сталей, а также при выборе технологий и режимов термической обработки. Исследования реальной чувствительности зеркально-теневого метода на многократных отражениях показали возможность выявления недопустимых при производстве пружин дефектов прутков-заготовок широкого диапазона диаметров и длин при различном качестве обработки поверхности, из сталей различных марок с надежной локализацией внутренних и поверхностных дефектов размерами от 0,1 мм. Существенно, что разработанный метод за счет использования дополнительных информативных параметров (скорости и затухания акустических волн, эффективности электромагнитно-акустического преобразования) позволяет обеспечить возможность выявления отклонений диаметра с погрешностью 0,01 %, оценки структуры, модулей упругости и анизотропии металла не только прутков, но и коротких цилиндрических объектов (например, роликов подшипников) [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шаврин О.И. – В кн.: Сб. тр. международной науч.-техн. конф. «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ '10)». – СПб.: изд. СПбГПУ, 2010. С. 311 – 317.
2. Муравьев В.В., Коробейникова О.В., Платунов А.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 10. С. 44 – 48.
3. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Платунов А.В. и др. // Дефектоскопия. 2012. № 8. С. 3 – 15.
4. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Кокорина Е.Н. // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 20 – 32.
5. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Кокорина Е.Н. // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 1. С. 62 – 70.
6. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Кокорина Е.Н. и др. // Датчики и системы. 2013. № 2. С. 2 – 9.
7. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Стрижак В.А. и др. // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 16 – 28.

© 2013 г. В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Е.Н. Кокорина

Поступила 29 ноября 2012 г.