

Структроскопия витков пружин после высокотемпературной механической обработки на основе измерения скорости рэлеевских волн

В.В. Муравьев^{1,2}, Л.В. Гущина¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Татьяны Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 01.10.2021

Принята к печати 17.05.2022

Для изготовления рессорных пружин подвижного состава (вагонов, локомотивов, автомобилей) применяют прутки из пружинных сталей. При высокотемпературной механической обработке при навивке пружин и их закалке возникает различие в скоростях охлаждения внутренней и наружной сторон витков пружины, что приводит к различию в структурном состоянии и сказывается на долговечности пружин. Цель работы – исследование влияния структурных изменений в наружной и внутренней поверхности витков пружин рессорной стали после операций навивки и высокотемпературной механической обработки на измеряемые характеристики рэлеевских акустических волн.

Исследованы скорости распространения рэлеевских волн в рессорно-пружинной стали 60С2А после операций навивки и высокотемпературной механической обработки. Для исследований использованы теневой метод и метод автоциркуляции с пьезоэлектрическими преобразователями ЦТС-19 частотой 5 МГц с конструкцией специального блока. Преобразователи обеспечивают ввод и приём рэлеевской волны по внутренней и наружной образующей поверхности пружины. Показано, что метод сравнения результатов измерения скорости рэлеевских волн на фиксированной базе по образующей витка на внутренней и внешней поверхностях пружины чувствителен к нарушениям в структуре материала и появлениям дефектов. Найдена однозначная связь структурных состояний на внешней и внутренней стороне пружины со скоростью рэлеевской волны.

В результате проведённых измерений сделан вывод о значимой чувствительности рэлеевских волн к структурному состоянию исследуемой стали. Обнаружен рост скорости волны на внутренней поверхности витка в зоне контакта с оправкой относительно внешней стороны витка, сигнализирующий о неполной закалке стали в этой зоне в процессе высокотемпературной механической обработки. Относительная разница скоростей в разных образцах пружин составляет приблизительно до 1 % (≈ 30 м/с), что является значительной величиной для оценки качества высокотемпературной механической обработки.

Ключевые слова: скорость рэлеевских волн, теневой метод и метод автоциркуляции, рессорно-пружинная сталь.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

Адрес для переписки:

Гущина Л.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Gushchina L.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,
Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

В.В. Муравьев, Л.В. Гущина.
Структроскопия витков пружин после высокотемпературной
механической обработки на основе измерения скорости
рэлеевских волн.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 2. – С. 147–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

For citation:

V.V. Murav'ev, L.V. Gushchina.
[Structuroscopy of Coils after High-Temperature
Mechanical Treatment on the Basis of Measurements
of Rayleigh Waves Velocity].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 2, pp. 147–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

Structuroscopy of Coils after High-Temperature Mechanical Treatment on the Basis of Measurements of Rayleigh Waves Velocity

V.V. Murav'ev^{1,2}, L.V. Gushchina¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tatiana Baramzinoy str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 01.10.2021

Accepted for publication 17.05.2022

Abstract

For the manufacture of spring springs of rolling stock (wagons, locomotives, cars), bars made of spring steels are used. With high-temperature machining, when winding springs and quenching them, there is a difference in the cooling rates of the inner and outer sides of the spring coils, which leads to a difference in the structural state and affects the durability of the springs. The aim of the work is to study the effect of structural changes in the outer and inner surfaces of spring steel coils after winding and high-temperature machining operations on the measured characteristics of Rayleigh acoustic waves.

The propagation velocities of Rayleigh waves in spring-steel 60C2A after winding and high-temperature machining operations are investigated. The shadow method and the autocirculation method with piezoelectric converters CTS-19 with a frequency of 5 MHz with a special block design were used for research. The converters provide input and reception of the Rayleigh wave along the inner and outer forming surface of the spring. It is shown that the method of comparing the results of measuring the velocity of Rayleigh waves on a fixed base by the coil generator on the inner and outer surfaces of the spring is sensitive to disturbances in the structure of the material and the appearance of defects. An unambiguous relationship of the structural states on the outer and inner sides of the spring with the velocity of the Rayleigh wave is found.

As a result of the measurements, a conclusion was made about the significant sensitivity of Rayleigh waves to the structural state of the steel under study. An increase in the wave velocity was detected on the inner surface of the coil in the contact zone with the mandrel relative to the outer side of the coil, signaling incomplete hardening of steel in this zone during high-temperature machining. The relative speed difference in different spring samples is approximately up to 1 % (≈ 30 m/s), which is a significant value for assessing the quality of high-temperature machining.

Keywords: Rayleigh wave velocity, through transmission method and auto-circulation method, spring steel.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

Адрес для переписки:

Гущина Л.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Gushchina L.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069,
Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

В.В. Муравьев, Л.В. Гущина.
Структуроскопия витков пружин после высокотемпературной
механической обработки на основе измерения скорости
рэлеевских волн.
Приборы и методы измерений.
2022. – Т. 13, № 2. – С. 147–154.
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

For citation:

V.V. Murav'ev, L.V. Gushchina.
[Structuroscopy of Coils after High-Temperature
Mechanical Treatment on the Basis of Measurements
of Rayleigh Waves Velocity].
Devices and Methods of Measurements.
2022, vol. 13, no. 2, pp. 147–154 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

Введение

Рессорные элементы тележки грузовых и пассажирских вагонов в процессе эксплуатации подвержены воздействию нагрузок, отличающихся значениями, уровнем, характером и методом действия. Наиболее опасным явлением в рессорных пружинах является усталость металла, особенно существенно проявляющаяся в местах концентрации напряжений, в качестве которых могут быть структурные несовершенства [1–3]. Для изготовления рессорных пружин подвижного состава (вагонов, локомотивов, автомобилей) применяют прутки из пружинных сталей 60С2А, которые подвергаются таким воздействиям, как обработка металлов давлением, высокотемпературная механическая обработка (ВТМО), термическая обработка. В процессе ВТМО при навивке пружин и их закалке возникает различие в скоростях охлаждения внутренней и наружной сторон витков пружины, что приводит к различию в структурном состоянии и сказывается на долговечности пружин [4, 5].

Проблема поиска новых подходов к исследованию отклонений структурного состояния различных частей термически обрабатываемых металлоизделий и после различных внешних энергетических воздействий – одна из важнейших в металловедении [6–8]. Получаемые структурные состояния и физико-механические свойства материалов выгодно оценивать ультразвуковыми методами [9–14]. Основным информативным параметром при выполнении акустической структуроскопии является скорость распространения волн. Большинство методик акустической структуроскопии базируется на методах с использованием контактных пьезоэлектрических преобразователей, при этом предъявляются высокие требования к геометрическим размерам, плоскопараллельности поверхности ввода и отражающей поверхности, чистоте обработки поверхности, качеству контакта и др. Недостаточно высокая точность методик, а также необходимость использования эталонных образцов ограничивает их применение. Поэтому исследование возможности оценки структурного состояния материала на криволинейной поверхности пружин, основанное на измерении скорости рэлеевских акустических волн, является актуальной задачей.

Используемые подходы. Методика эксперимента

Различие структурных состояний на внутренней и внешней поверхностях витка пружины, возникающих при производстве пружин в процессе ВТМО, не выявляется штатными методами. Однако они существенно сокращают долговечность пружин. Из рисунка 1 видно, что в месте касания горячей заготовки пружины с оправкой, в связи с уменьшением скорости охлаждения при закалке ниже критической, возникает зона с недостаточным теплоотводом при взаимодействии с закалочной средой, которая не проникает в эту зону. Вследствие чего, после операции закалки не реализуется высокопрочная структура и образуется зона неполной закалки, характеризующаяся продуктами немартенситного распада с наличием зёрен феррита и перлита (рисунок 2а) в отличие от полной закалки с мартенситным превращением (рисунок 2б).

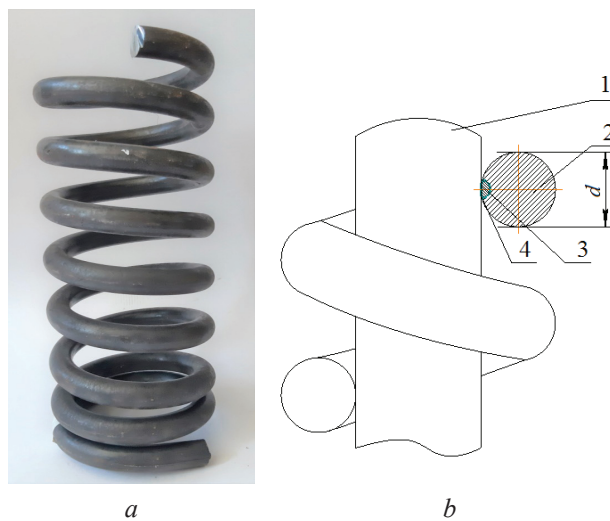


Рисунок 1 – Внешний вид пружины (а) и навивка её на оправку при высокотемпературной механической обработке (б): 1 – оправка; 2 – сечение витка; 3 – зона с пониженной температурой; 4 – линии контакта – зона неполной закалки

Figure 1 – Spring appearance (а) and its winding on the mandrel at high temperature mechanical machining (б): 1 – mandrel; 2 – cross – section of the coil; 3 – zone with low temperature; 4 – contact lines – zone of incomplete hardening

Известно, что скорость распространения ультразвуковых волн в сплавах связана с их

структурой [15]. Наиболее выгодным вариантом для разработки методики структуроскопии является использование волн Рэлея, распространяющихся на строго фиксированной базе. С целью исследования структурного состояния пружин тележки железнодорожного вагона были сконструированы 4 блока

рэлеевских преобразователей для пружин разного диаметра (рисунок 3), соответственно по два блока для установки на наружной и внутренней поверхностях витка пружины. В конструкции преобразователей использовались пьезопластины ЦТС-19 частотой 5 МГц.

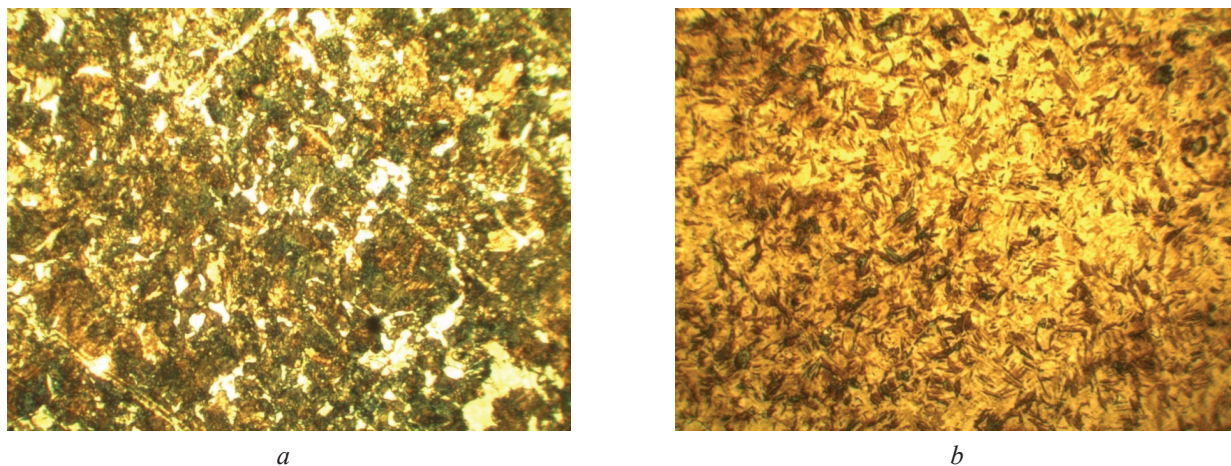


Рисунок 2 – Микроструктура вблизи внутренней (a) и внешней (b) частей витка пружины при увеличении 1000
Figure 2 – Microstructure near the inner (a) and outer parts (b) part of the spring coil at 1000 magnification

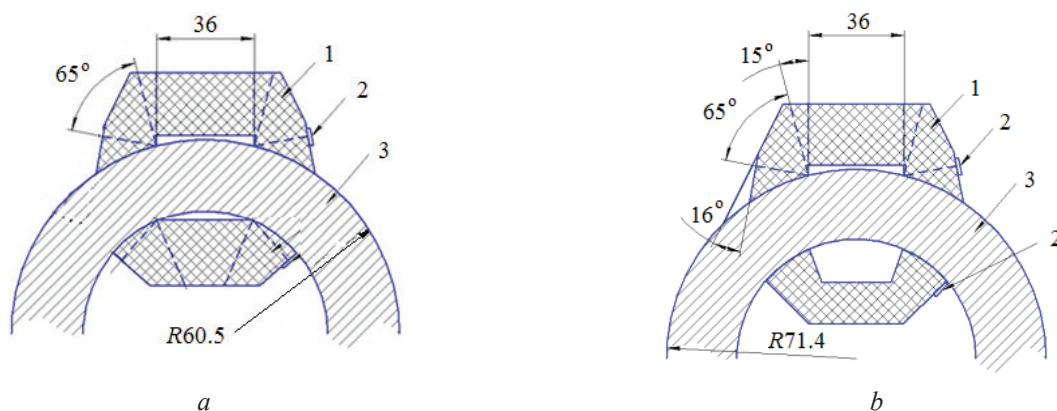


Рисунок 3 – Рэлеевские преобразователи для контроля структурного состояния пружин радиусом 60,5 мм (a) и 71,4 мм (b): 1 – корпус преобразователя из оргстекла; 2 – пьезоэлемент; 3 – пружина

Figure 3 – Rayleigh transducers for the control of the structural state of springs with a radius of 60.5 mm (a) and of 71.4 mm (b): 1 – plexiglass transducer housing; 2 – piezoelectric element; 3 – spring

Преобразователи, показанные на рисунке 3, обеспечивают ввод рэлеевской волны по внутренней и наружной образующей поверхности пружины. Для точности контроля крайне важно, чтобы расстояние, пройденное рэлеевской волной на внешней стороне витка пружины и на внутренней, было одинаково. Поэтому расстояние между точками ввода и

выхода рассчитали теоретически и проверили экспериментально, что составило для внешнего и внутреннего преобразователей 20 и 36 мм соответственно.

Для исследования образцов пружин были использованы структуроскоп ИСП-12 (ультразвуковой индикатор структурных превращений) и ультразвуковой дефектоскоп ДЮ 1000.

Схема контроля с помощью структуроскопа ИСП-12 представлена на рисунке 4.

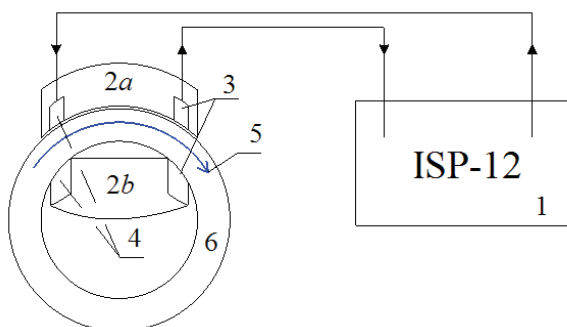


Рисунок 4 – Схема установки блока преобразователей на витке пружины: 1 – структуроскоп ИСП-12; 2a – преобразователь для внешней части витка пружины; 2b – преобразователь для внутренней части витка пружины; 3 и 4 – излучающие и приёмные пьезоэлементы; 5 – путь рэлеевской волны; 6 – виток пружины

Figure 4 – Plant layout of the transducers unit on the spring coil: 1 – structuroscopy ISP-12; 2a – transducer for the exterior part of spring; 2b – transducer for the internal part of spring; 3 and 4 – radiating and receiving piezoelectric elements; 5 – Rayleigh wave way; 6 – spring coil

В основе работы структуроскопа ИСП-12 лежит метод автоциркуляции импульсов, суть которого заключается в том, что генератор импульсов, возбуждающий пьезоэлектрический преобразователь, синхронизируется импульсами, прошедшими через анализируемую среду. Прошедший по образцу ультразвуковой импульс, принимается приёмным пьезопреобразователем и преобразуется в электрический сигнал, формирующий следующий вводимый в образец импульс. При этом частота следования импульсов зависит от времени пробега импульсом расстояния между пьезопреобразователями, следовательно (при неизменном расстоянии между пьезопреобразователями), от скорости распространения ультразвука в образце.

Измерения времени распространения рэлеевской волны с помощью дефектоскопа ДЮ 1000 проводились следующим образом: ультразвуковой импульс возбуждался и принимался непосредственно дефектоскопом, затем по регистрируемым импульсам рассчитывался интервал времени между излучением и приёмом волны, проходящей по дуге окружности пружины от излучающего к приёмному преобразователю (рисунок 5).

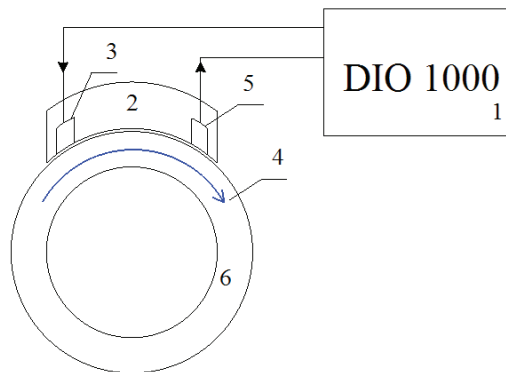


Рисунок 5 – Схема установки блока преобразователей на витке пружины: 1 – дефектоскоп ДЮ 1000; 2 – блок преобразователей; 3 и 5 – излучающие и приёмные пьезоэлементы; 4 – путь рэлеевской волны; 6 – виток пружины

Figure 5 – Plant layout of the transducers unit on the spring coil: 1 – flaw detector DIO 1000; 2 – transducers unit; 3 и 5 – radiating and receiving piezoelectric elements; 4 – Rayleigh wave way; 6 – spring coil

Результаты исследования

Исследования проводились на 4-х образцах-вырезках пружин внешним диаметром 143 мм и на 3-х – диаметром 121 мм, изготовленных по технологии ВТМО в разное время из разных партий прутков. Пружины изготовлены из стали марки 65С2Г, поверхность которых имеет шероховатость Rz40.

Химический анализ металла образцов пружины № 1 диаметром 121 мм, виток Ø 15 мм, № 2 диаметром 143 мм, виток Ø 20 мм и № 3 диаметром 121 мм, виток Ø 18 мм показал, что химические составы образцов соответствуют требованиям ГОСТ 14959-2016.

Отклонение по твёрдости на торце витка в разных точках по диаметру с шагом 1 мм от внутренней поверхности до наружной составило 1 HRC. Твёрдость измерялась на приборе ПМТ-3. Образец диаметром 143 мм: 56–57 HRC; образцы диаметром 121 мм: 46–47 HRC.

Результаты исследования относительного изменения частоты автоциркуляции для образцов пружин диаметром 143 и 121 мм структуроскопом ИСП-12 представлены в таблице. В образце № 1 пружины диаметром 143 мм относительное изменение частоты существенно меньше, чем на образцах № 2–4,

что свидетельствует о менее значимых различиях в структуре на внутренней и внешней стороне витка. Для пружин диаметром 121 мм также наблюдаются различия по относительному изменению частоты в разных образцах. Следовательно, можно заключить, что операции ВТМО, проводимые в разное время и на разных партиях, могут отличаться по качеству структур на внутренней стороне витка.

Наблюдаемое различие относительного изменения частоты автоциркуляции от внутренней до внешней стороны пружины во всех 7 образцах свидетельствует о повышении скорости распространения рэлеевской волны на внутренней части пружины, что означает разницу структурных состояний внешней и внутренней частей пружины. Согласно [12, 13], увеличение скорости соответствует увеличению равновесности структурного состояния, в отличие от закалочных структур.

Регистрируемое дефектоскопом DIO 1000 время прохождения сигнала по фиксированному пути, показывает снижение времени по внутренней стороне пружины, что означает рост скорости волны относительно внешней стороны и сигнализирует о неполной закалке стали в процессе ВТМО либо о самоотпуске. Средняя погрешность измерения времени прохождения импульса составила 0,01 мкс. Максимальная погрешность составляет не более 0,03 мкс.

Погрешность измерений частоты автоциркуляции колеблется для разных образцов от 1 до 5 Гц. Основными факторами, влияющими на погрешность, являются различия в шероховатости поверхности и отклонения установки преобразователя по образующей вследствие кривизны пружины, а также различия в условиях ввода и приёма волн для внешнего и внутреннего преобразователя. Относительная погрешность измерений составила 0,01 %, что соответствует исследованиям, изложенным в [16].

На основе результатов измерений частоты автоциркуляции структуроскопом ИСП-12 рассчитана скорость рэлеевских волн. Значение частоты f_a представляет собой величину, обратную времени t_a прохождения ультразвуковой волны от излучающей пьезопластины до приёмной. Время t_a складывается из двух времён: времени задержки ультразвуковой волны в призме преобразователя t_p и времени распространения рэлеевской волны в образце пружины t_R :

$$f_a = \frac{1}{t_a};$$

$$t_a = 2t_p + t_R;$$

$$t_p = \frac{l_p}{C_p};$$

$$C_R = \frac{l_s f_a C_p}{C_p - 2l_p f_a}.$$

Таблица / Table

Относительные изменения частоты автоциркуляции ($\Delta f_a/f_a$) и скорости ($\Delta C_R/C_R$) в исследованных образцах с использованием ИСП-12 и относительные изменения времени прохождения сигнала ($\Delta t/t$) и скорости ($\Delta C_R/C_R$), зарегистрированных дефектоскопом DIO 1000

Relative changes in the frequency of autocirculation ($\Delta f_a/f_a$) and velocity ($\Delta C_R/C_R$) in the studied samples using ISP-12 and relative changes in the signal transit time ($\Delta t/t$) and velocity ($\Delta C_R/C_R$) recorded by the DIO 1000 flaw detector

№	D, mm	ISP-12		DIO 1000	
		$\Delta f_a/f_a$	$\Delta C_R/C_R$	$\Delta t/t$	$\Delta C_R/C_R$
1	143	0.0032	0.0055	0.0018	0.0041
2		0.0041	0.0092	0.0030	0.0066
3		0.0043	0.0095	0.0033	0.0049
4	121	0.0038	0.0089	0.0030	0.0074
5		0.0046	0.0103	0.0033	0.0090
6		0.0044	0.0096	0.0025	0.0090

Скорость продольной волны в призме преобразователя, изготовленного из оргстекла, $C_p = 2670$ м/с. Расстояние, проходимое волной в призме $l_p = 0,02$ м. Расстояние, проходимое волной в образце пружины, равное базе преобразователя, $l_s = 0,036$ м. Относительное изменение скорости рэлеевских волн по результатам измерения частоты автоциркуляции структуроскопом ИСП-12 по внутренней и внешней стороне пружин отражены в таблице, также в таблице представлены относительные изменения скорости рэлеевских волн, рассчитанных по результатам измерений времени прохождения импульса с помощью DIO 1000.

Из результатов видно, что наблюдается уменьшение скорости рэлеевской волны

в наружной части витка пружины относительно внутренней. По результатам исследований можно отметить, что метод измерения скорости ультразвука чувствителен к нарушениям в структуре материала и появлениям дефектов.

Заключение

Показано, что метод сравнения результатов измерения скорости рэлеевских волн на фиксированной базе по образующей витка на внутренней и внешней поверхностях пружины чувствителен к нарушениям в структуре материала и появлениям дефектов. Различие скорости рэлеевских волн свидетельствует о различии структурного состояния металла.

Обнаружен рост скорости волны на внутренней поверхности витка в зоне контакта с оправкой относительно внешней стороны витка, сигнализирующий о неполной закалке стали 65С2Г в этой зоне в процессе высокотемпературной механической обработки. Относительная разница скоростей в разных образцах пружин составляет до 1 % (≈ 30 м/с), что является значительной величиной для оценки качества высокотемпературной механической обработки.

Благодарности

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

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of the RFBR Bel-a grant (project no. 20-58-0015) using the UNU “Information measurement system for the research of acoustic properties of materials and products”.

Список использованных источников

1. Орлова А.М. Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов / А.М. Орлова [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 221–232.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-221-232

2. Сунь Х. Анализ остаточных напряжений в винтовых цилиндрических пружинах при высокой температуре / Х. Сунь, В.Л. Данилов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 6. – С. 384–396.

DOI: 10.7463/0615.0778617

3. Del Llano-Vizcaya L., Rubio-Gonzales C., Mesmacque G., Banderas-Hernández A. Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs // Materials and Design, 2007, vol. 28, no. 4, pp. 1130–1134.

DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.033

4. Ulrike Karr, Yusuke Sandaiji, Ryota Tanegashima, Shogo Murakami, Bernd Schönbauer, Michael Fitzka, Herwig Mayer. Inclusion initiated fracture in spring steel under axial and torsion very high cycle fatigue loading at different load ratios // International Journal of Fatigue, 2020, vol. 134, p. 105525.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105525

5. Лавриненко Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния при навивке пружин под воздействием комбинированного нагружения / Ю.А. Лавриненко // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15. – № 9. – С. 399–404.

6. Околович Г.А. Термическая обработка пружин железнодорожного транспорта / Г.А. Околович, Д.В. Кураков, Т.Г. Шарикова, С.А. Чекалина // Ползуновский альманах. – 2015. – № 2. – С. 141–145.

7. Титов А.В. Влияние режимов термической обработки на микроструктуру пружин ответственного назначения из стали 60с2а и титанового сплава ВТ16 / А.В. Титов // Металлообработка. – 2015. – № 5 (89). – С. 43–49.

8. Орлова А.М. Анализ методик расчета горизонтальной жесткости пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов / А.М. Орлова [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 191–201.

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-191-201

9. Григорьев В.М. Анализ разрушений пружин пассажирского вагона / В.М. Григорьев, В.М. Макиенко, П.В. Соколов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 1 (2–3). – С. 94–97.

10. Марков А.М. Пружины рессорного комплекта тележек грузовых вагонов / А.М. Марков [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 194–198.

11. Злобин Д.В. Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д.В. Злобин, О.В. Муравьева // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 99–104.

12. Муравьева О.В. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневое

электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О.В. Муравьева, М.Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 46–50.

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

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146

14. Баев А.Р. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.А. Тищенко // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 267–271.

15. Волкова Л.В. Использование многократного зеркально-теневого метода при ультразвуковом контроле пера подошвы рельса / Л.В. Волкова, А.В. Платунов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 38–45.

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-38-45

16. Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зувев, К.Л. Комаров // Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.

References

1. Orlova A.M., Rudakova E.A., Shevchenko D.V., Gusev A.V., Shalpegin G.S. [Approaches to assessing the stress-strain state of freight car spring suspension coils]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 221–232 (in Russian).

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-221-232

2. Sun' H., Danilov V.L. [Analysis of residual stress in helical cylindrical springs at high temperature]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of Bauman MSTU], 2015, no. 6, pp. 384–396 (in Russian).

DOI: 10.7463/0615.0778617

3. Del Llano-Vizcaya L., Rubio-Gonzales C., Mesmacque G., Banderas-Hernández A. Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, no. 4, pp. 1130–1134.

DOI: 10.1016/j.matdes.2006.01.033

4. Ulrike Karr, Yusuke Sandaiji, Ryota Tanegashima, Shogo Murakami, Bernd Schönbauer, Michael Fitzka, Herwig Mayer. Inclusion initiated fracture in spring steel under axial and torsion very high cycle fatigue loading at different load ratios. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 134, p. 105525.

DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105525

5. Lavrinenko YU.A. [Study of strain-stress state during springs coiling by combination loading].

Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii, 2017, vol. 15, no. 9, pp. 399–404 (in Russian).

6. Okolovich G.A., Kurakov D.V., Sharikova T.G., Chekalina S.A. [Heat treatment of springs of railway transport]. *Polzunovskij al'manah*, 2015, no. 2, pp. 141–145 (in Russian).

7. Titov A.V. [The effect of heat treatment on the microstructure of springs for critical applications SA of steel and titanium alloy VT16]. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 5(89), pp. 43–49 (in Russian).

8. Orlova A.M., Rudakova E.A., Shevchenko D.V., Gusev A.V., Popovich C.I., Savushkin R.A. [Analysis of design procedures for horizontal spring stiffness of bogie suspension of freight cars]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 191–201 (in Russian).

DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-191-201

9. Grigor'ev V.M., Makienko V.M., Sokolov P.V. [Analysis of the springs destruction of the passenger carriage]. *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona*, 2015, no. 1(2–3), pp. 94–97 (in Russian).

10. Markov A.M., Gabets A.V., Gabets D.A., Gavrnikov D.V. [Coil spring group for freight-car truck]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii* [Actual problems in machine building], 2016, no. 3, pp. 194–198 (in Russian).

11. Zlobin D.V., Murav'eva O.V. [Development features of electromagnetic acoustic defectoscopy equipment for bar iron using rod waves]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2012, no. 4, pp. 99–104 (in Russian).

12. Murav'eva O.V., Sokov M.YU. [Influence of the defect depth on the parameters of electromagnetic-acoustic multiple-shadow method of the rod testing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 46–50 (in Russian).

13. Petrov K.V., Sokov M.YU., Murav'eva O.V. [The effect of electromagnetic acoustic transducer design features on results of cylinder object testing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 2, pp. 135–146 (in Russian).

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146

14. Baev A.R., Majorov A.L., Tishchenko M.A. Ultrasonic methods of analysis of the metal articles surface hardening. *Foundry production and metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 267–271 (in Russian).

15. Volkova L.V., Platonov A.V. [Rail base point inspection using the mirror through transmission testing technique on multiple reflections]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 38–45 (in Russian). **DOI:** 10.22213/2413-1172-2019-4-38-45

16. Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. [Sound Speed and Structure of Steels and Alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996, 184 p.