

Губин В.В., Аникеев Н.А., Дьяченко Д.И. Исследование возможности оценки состояния стальных образцов с применением динамических спектрограмм акустических сигналов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 147–155. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.14

Gubin V.V., Anikeev N.A., Dyachenko D.I. On evaluating the state of steel specimens using dynamic spectrograms of acoustic signals. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 3, pp. 147-155. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.14



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.14

УДК 620.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОГРАММ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В.В. Губин, Н.А. Аникеев, Д.И. Дьяченко

Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, Волгоград, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 27 июля 2018 г.  
Принята: 25 сентября 2018 г.  
Опубликована: 08 октября 2018 г.

#### Ключевые слова:

термообработка, отпуск, микроструктура стали, твердость, неразрушающий контроль, ударное воздействие, затухающие колебания, частотно-временной, спектральный анализ, сонограмма, БПФ, окно Хеннинга.

### АННОТАЦИЯ

Изучены возможности оценки изменений свойств подшипниковой стали в процессе термообработки с применением визуализации с помощью динамических спектрограмм (сонограмм), которые отображают изменения спектральных характеристик акустических сигналов по временной координате. В качестве образцов были взяты кольца упорных подшипников из стали марки ШХ15, новые и бывшие в эксплуатации. Проведено исследование изменения спектральных характеристик стальных образцов по акустическому отклику на точечное ударное воздействие в зависимости от изменений прочностных свойств и микроструктуры, генерируемых в образцах посредством отпуска с выдержкой при температурах в диапазоне от 360 до 560 °С. Анализ и сравнение сигналов акустического отклика выполнялись с применением программного спектроанализатора. Показана информативность применяемой методики для определения изменений состояния стальных образцов после термообработки. Анализ динамических спектрограмм путем визуального сопоставления участков сонограмм при различных значениях размера окна Хеннинга позволил выявить наиболее индикативные спектральные признаки – сдвиг частот резонансных гармоник и изменение декремента затухания. Обнаружена четкая зависимость сдвига частот и изменения декремента затухания основных резонансных гармоник от температуры отпуска закаленных образцов из стали марки ШХ15. При повторной закалке отпущенных образцов наблюдаются обратные изменения частот резонансных гармоник и декремента затухания. Изменения указанных индикативных спектральных характеристик соответствуют изменениям твердости и микроструктуры стали. Данная методика может быть использована при разработке экспресс-методов неразрушающего контроля для оценки изменений состояния стальных конструктивных элементов и контроля качества термообработки.

© ПНИПУ

© Губин Вячеслав Валерьевич – вед. инж., e-mail: [gubinv@mail.ru](mailto:gubinv@mail.ru), ORCID: [0000-0003-1947-5586](https://orcid.org/0000-0003-1947-5586).  
Аникеев Никита Андреевич – к.ф.-м.н., вед. инж., e-mail: [anikeev@vniktinho.ru](mailto:anikeev@vniktinho.ru), ORCID: [0000-0002-8262-9149](https://orcid.org/0000-0002-8262-9149).  
Дьяченко Денис Игоревич – к.т.н., зав. лаб., e-mail: [dyachenkodi@vniktinho.ru](mailto:dyachenkodi@vniktinho.ru), ORCID: [0000-0003-1410-3492](https://orcid.org/0000-0003-1410-3492).

Vyacheslav V. Gubin – Leading Engineer, e-mail: [gubinv@mail.ru](mailto:gubinv@mail.ru), ORCID: [0000-0003-1947-5586](https://orcid.org/0000-0003-1947-5586).  
Nikita A. Anikeev – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Leading Engineer, e-mail: [anikeev@vniktinho.ru](mailto:anikeev@vniktinho.ru), ORCID: [0000-0002-8262-9149](https://orcid.org/0000-0002-8262-9149).  
Denis I. Dyachenko – CSC in Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: [dyachenkodi@vniktinho.ru](mailto:dyachenkodi@vniktinho.ru), ORCID: [0000-0003-1410-3492](https://orcid.org/0000-0003-1410-3492).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## ON EVALUATING THE STATE OF STEEL SPECIMENS USING DYNAMIC SPECTROGRAMS OF ACOUSTIC SIGNALS

V.V. Gubin, N.A. Anikeev, D.I. Dyachenko

All-Russian Scientific Research and Construction Institute of Equipment  
for Oil Refining and Petrochemical Industry, Volgograd, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 27 July 2018  
Accepted: 25 September 2018  
Published: 08 October 2018

#### Keywords:

heat treatment, tempering,  
steel microstructure, hardness,  
nondestructive testing, impact  
action, damped oscillations,  
time-frequency, spectral analysis,  
sonogram, FFT, Hanning window.

### ABSTRACT

The main purpose of this work was to study the possibility of estimating the changes in properties of bearing steel during heat treatment by visualization using dynamic spectrograms (sonograms) that display changes in the spectral characteristics of acoustic signals within time. The changes of spectral characteristics of the point impact acoustic response in the steel specimens were studied depending on the microstructure changes generated in the specimens using heat treatment with various parameters. The analysis and comparison of acoustic response signals were performed using software spectrum analyzer. The informativeness of the applied technique aimed at estimating changes in the microstructure of steel as a result of heat treatment is shown. The analysis of dynamic spectrograms allowed revealing indicative spectral features, such as shifting in the resonant frequencies and change in the damping decrement. A clear dependence of the shift of the resonant frequencies and the damping decrement of the signal on the tempering temperature of the quenched ball-bearing steel specimens was found. After the tempered specimens were re-quenched, reverse changes in the resonant harmonics frequencies and the damping decrement were observed. Changes in the observed indicative spectral characteristics correspond to changes in hardness and microstructure of the steel. This technique can be used for development of nondestructive testing express methods to evaluate changes in the state of steel structural elements and perform quality control during heat treatment.

© PNRPU

### Введение

Снижение исходных прочностных характеристик материала стальных элементов и конструкций является одной из важнейших проблем современной промышленности. Неразрушающие методы контроля деградации свойств материала в процессе эксплуатации являются перспективным направлением, так как позволяют своевременно выявить переход элементов в предельное состояние и во многих случаях продлить эксплуатацию оборудования без увеличения риска аварийности.

Основными причинами перехода стальных элементов в предельное состояние являются процессы деградации исходной структуры, вызванные комплексом механических нагрузок, термических воздействий и влияния коррозионно-активных сред. Структурная поврежденность материала приводит, в частности, к явлению увеличения внутреннего трения, проявляющегося при колебаниях малой амплитуды в упругой области [1]. Связь характера воздействия на материалы с параметрами распространения упругих волн в настоящее время широко исследована [2, 3, 4, 5]. Изучается возможность применения данной корреляции в акустических методах неразрушающего контроля при оценке структурных изменений материала, приводящих к критическому состоянию конструктивных элементов [6, 7, 8, 9], в частности в акустических резонансных методах [10, 11]. Д.С. Бурцев в работе [12] исследовал возможность применения упомянутой связи в технологии изготовления колоколов с целью обеспечения заданных акустических свойств.

Целью данного исследования являлось изучение возможности выявления прочностных и структурных изменений в стали через сравнение спектральных характеристик возбуждаемых резонансных колебаний образцов, выявление наиболее индикативных спектральных параметров и сопоставление их с результатами анализа микроструктуры и измерений твердости.

### 1. Эксперимент

Для исследования зависимости спектральных характеристик от структурных изменений материала в качестве образцов были выбраны кольца упорных подшипников диаметром 110 мм и толщиной 7 мм из стали ШХ15, разделенные на две группы – новые и бывшие длительное время в эксплуатации. Конструктивные элементы для подшипников из стали ШХ15 поставляются в состоянии закалки по следующему режиму: нагрев до 830 °С с выдержкой 30 мин, охлаждение в масле при температуре 30 °С, отпуск при 150 °С в течение 1,5 ч, охлаждение на воздухе. Для изменения механических свойств и микроструктуры материала в целях настоящего исследования образцы подвергались отпуску при температурах 360, 460 и 560 °С с выдержкой 20 мин и при температуре 560 °С с выдержкой 4 ч. Указанные режимы были выбраны с учетом необходимости обеспечить внесение прогнозируемых изменений в прочностные свойства и микроструктуру материала в соответствии с уже хорошо изученным поведением стали ШХ15 при различных режимах термообработки [13].

Возбуждение акустических колебаний производилось точечным ударным воздействием на образцы в одной и той же точке. Запись колебаний производилась посредством направленного измерительного микрофона и внешнего аудиоинтерфейса, подключенного к компьютеру. Ранее были проведены эксперименты по сходной методике, позволившие выявить снижение добротности балочных образцов как колебательных систем в результате эксплуатационной структурной поврежденности материала [14]. Аналогичный подход предлагается в [15].

В настоящем исследовании для обработки акустических сигналов применялись методы частотно-временного спектрального анализа [16, 17], которые используются в акустических методах диагностики конструктивных элементов [18, 19, 20, 21]. Для определения различий спектральных характеристик образцов до и после термообработки применен метод визуализации спектральной информации посредством так называемых сонограмм – динамических спектрограмм, которые отображают изменение амплитудного спектра во времени. Как показано в [22, 23], сравнение сонограмм облегчает выявление наиболее индикативных параметров, принимаемых в дальнейшую обработку. Визуализация с помощью сонограмм успешно применяется при анализе сигналов различных процессов при неразрушающем контроле [24, 25].

## 2. Результаты

### 2.1. Термообработка образцов

Две группы образцов (группа 1 – новые и группа 2 – бывшие в эксплуатации) были подвергнуты термообработке в соответствии с табл. 1. Исходное значение твердости у исследованных новых образцов находилось в диапазоне 62,5–63,5 HRC, у бывших в эксплуатации 60,0–61,5 HRC. Результат термообработки контролировался измерением твердости методом Роквелла по шкале HRC. Полученные изменения твердости согласуются с результатами по [26].

Таблица 1

Режимы термообработки и значения твердости

Table 1

Heat treatment parameters and hardness values

Номер образца	Температура отпуска, °C	Продолжительность выдержки, мин	Твердость, HRC
Новые:			
1-1	360	20	54,0
1-2	460	20	46,5
1-3	560	20	36,0
1-4	560	240	30,5
Бывшие в эксплуатации			
2-1	360	20	53,0
2-2	460	20	45,0
2-3	560	20	35,5
2-4	560	240	28,0

### 2.2. Анализ изменений микроструктуры после отпуска

Микроструктура исследовалась оптическим методом на шлифах, выполненных на образцах, подвергнутых термообработке, и на образцах, оставленных в исходном состоянии. После термообработки наблюдаются следующие изменения (рис. 1):

- изменилась кристаллическая решетка с тетрагональной ОЦК на кубическую ОЦК;
- произошел разрыв когерентности карбидов ( $\epsilon$ -карбид превратился в цементит);
- снизился уровень остаточных напряжений, распался остаточный аустенит на феррит и цементит;
- в процессе термообработки имели место диффузионные процессы сфероидизации и коагуляции, карбидов стало больше и размеры их увеличились.

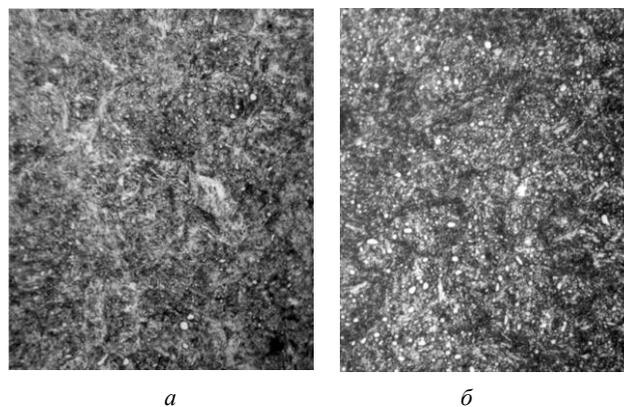


Рис. 1. Микроструктура образцов стали ШХ15, увеличение  $\times 2000$ : а – в исходном закаленном состоянии; б – после отпуска при 560 °C и выдержке 20 мин

Fig. 1. The microstructure of the steel specimens 52100, image amplification  $\times 2000$ : a – is in the original quenched state; b – after tempering at 560 °C and holding for 20 minutes

Превращения до конца не прошли, указанные изменения имеют промежуточный характер, что обусловлено выбранным режимом термообработки. Как показали исследования микроструктуры, полнота изменений увеличивается с повышением температуры отпуска и продолжительностью выдержки при температуре отпуска, что согласуется с данными, приведенными в [27].

### 2.3. Анализ изменений спектральных характеристик

До и после проведения термообработки для каждого образца записывался акустический отклик на точечное ударное воздействие. Механическими средствами обеспечивалось постоянство силы и направления удара и точки ударного воздействия на образцах. Оцифровка сигнала выполнялась с частотой дискретизации 44100 Гц и разрешением по вертикали 16 бит. Записанные сигналы обработаны программным спектроанализатором с применением БПФ с оконными функциями Хеннинга, Хэмминга, Блэкмана и Гаусса, которые детально описаны в [27], размером от 256 до 8192 отсчетов. Для пред-

варительного анализа сигналов и нахождения показательных спектральных характеристик, которые могут служить индикаторами изменений свойств материала в результате термообработки, были сформированы сонограммы, на которых амплитуда отображается изменением цветового оттенка (или яркости в градациях серого) каждой частотной компоненты. Пример сонограмм образца до и после термообработки показан на рис. 2.

Предварительный анализ спектров сигналов показал, что исследуемые образцы как колебательные системы имеют относительно высокую добротность и четко выраженные резонансные гармоники, частоты которых в процессе затухания остаются практически неизменными в пределах погрешности разрешения по частоте вплоть до размера окна 8192 отсчета. Амплитуда шумовой составляющей сигнала падает на более чем 100 дБ в течение менее чем 0,05 с, затем в спектре сигнала за исключением помех остаются резонансные гармоники, которые затухают на 100 дБ в течение порядка нескольких секунд.

Данное обстоятельство позволило предложить вариант исследования записанных сигналов одновременно в двух режимах: 1) с размером окна 8192 отсчета для обеспечения более высокого разрешения по частоте и, соответственно, более точного измерения частот резонансных гармоник (жертвуя разрешением по времени, что допустимо, так как мы уже определили, что частоты можно считать неизменными по всей длительности сигнала); 2) с размером окна 512 отсчетов для обеспечения более высокого разрешения по времени с целью оценки относительного изменения декремента затухания для основных резонансных гармоник, измеренных в первом режиме.

После проведенного сравнения по аналогии с выполненным в [29] оказалось, что в режиме 1 предпочтительнее использовать окно Хеннинга по сравнению с окном Блэкмана, так как, несмотря на более заметные утечки в боковые лепестки спектра, центральный лепесток более узкий (рис. 3), что позволяет точнее определить частоту гармоники.

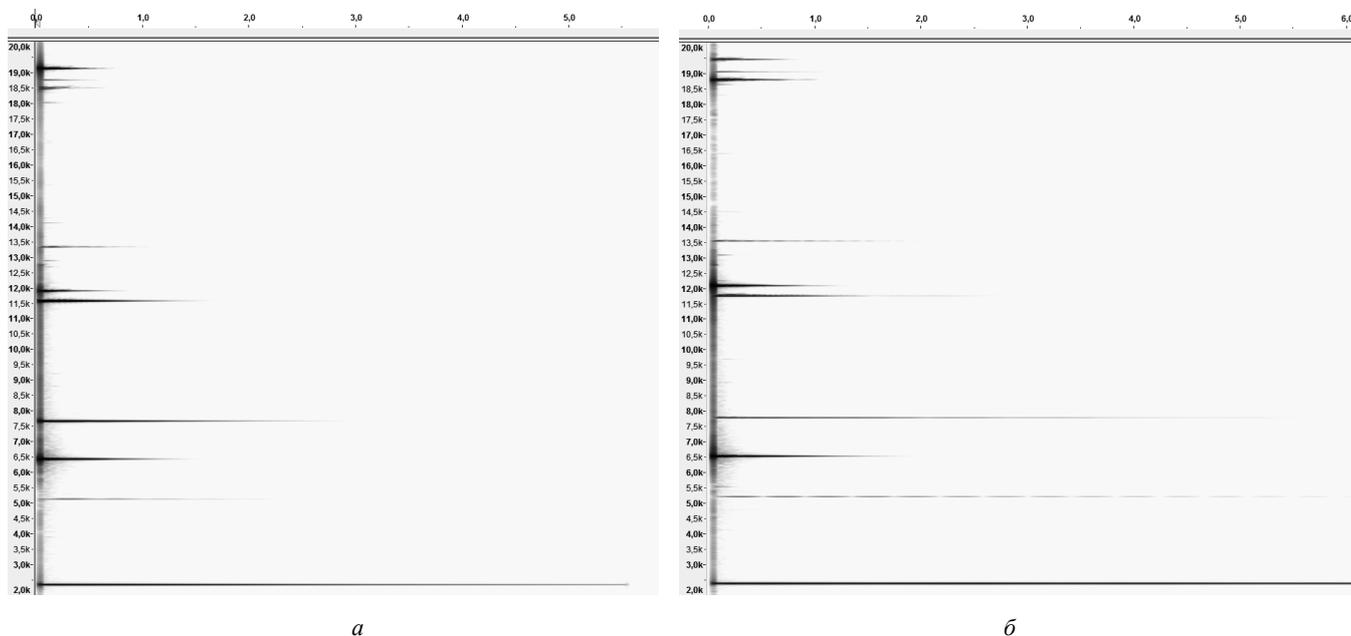


Рис. 2. Сонограммы образца 1-2: *а* – до отпуска; *б* – после отпуска  
 Fig. 2. Sonograms of the specimen 1-2: *a* – is before tempering; *b* – is after tempering

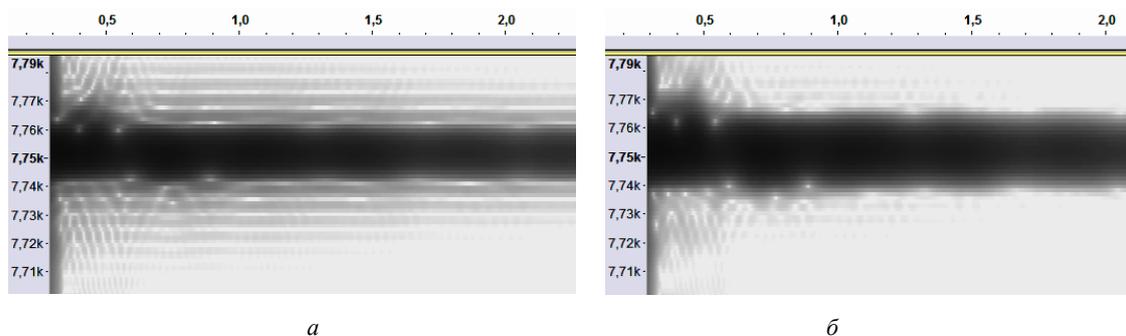


Рис. 3. Сравнение участка спектра сигнала, обработанного с применением окна размером 8192 отсчета: *а* – окно Хеннинга; *б* – окно Блэкмана  
 Fig. 3. Comparison of a part of the signal spectrum processed using a window of 8192 size specimen: *a* – is Hanning window; *b* – is Blackman window

Значения сдвига частот основных резонансных гармоник образца 1–1

Table 2

The shift in frequency values of the main resonance harmonics of the specimen 1-1

№ п/п	Частота, Гц		Сдвиг частоты, %
	до отпуска	после отпуска	
1	2405	2427	0,96
2	5300	5353	1,04
3	6545	6610	0,99
4	7645	7720	0,98
5	11540	11660	1,04
6	12080	12200	0,99
7	18750	18940	1,01
8	19080	19275	1,02

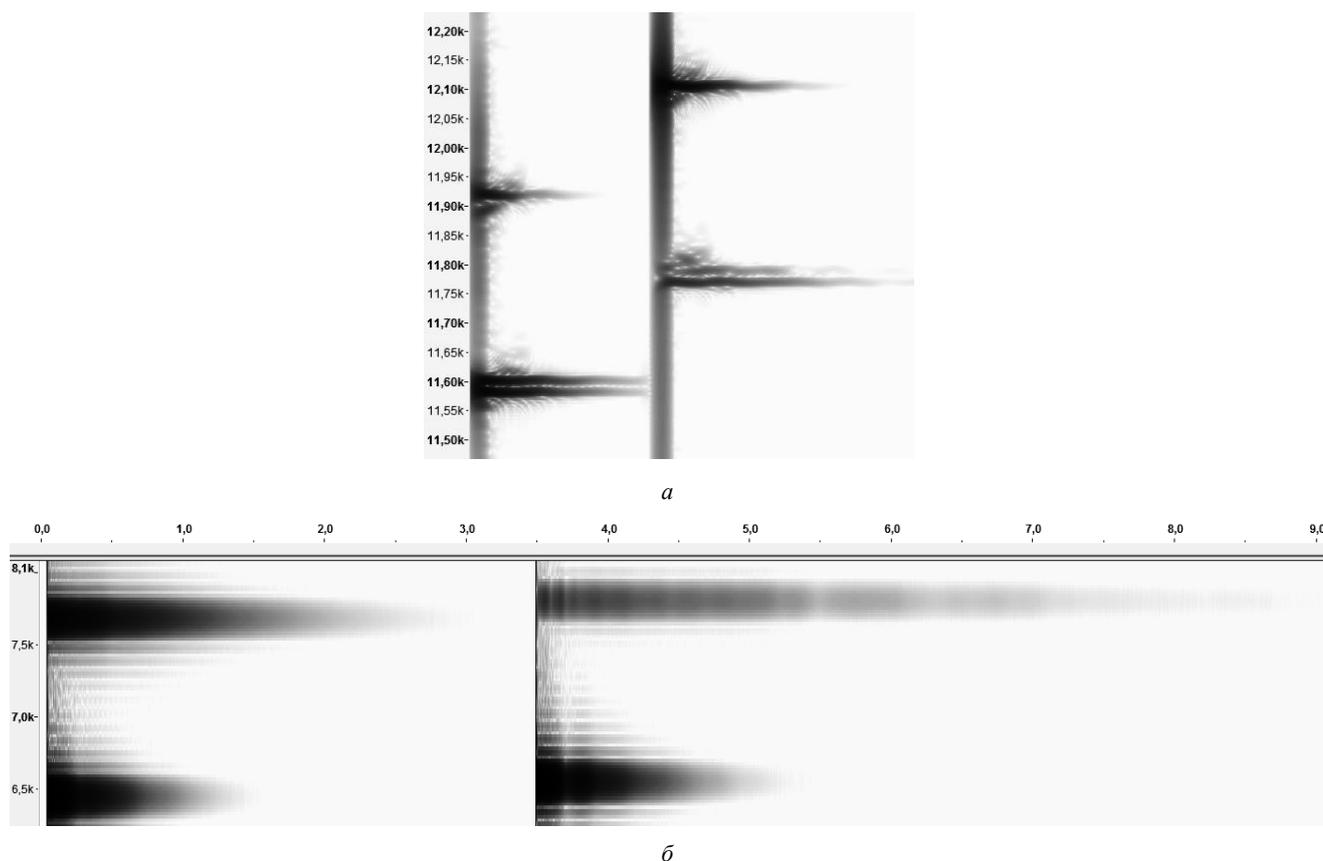


Рис. 4. Сравнение участка спектра по сонограммам образца 1–2 до отпуска (слева) и после отпуска (справа): *a* – размер окна 8192 отсчета; *b* – размер окна 512 отсчетов. По оси абсцисс–время в секундах, по оси ординат – частота в кГц  
 Fig. 4. Comparison of the spectral range according to the sonograms of the specimen 1-2 before tempering (on the left) and after tempering (on the right): *a* – is the window size of 8192 specimens; *b* – is the window size of 512 specimens.  
 The abscissa is the time in seconds; the ordinate is the frequency in kHz

На рис. 4, показано сравнение сонограмм до и после отпуска, а также наглядно продемонстрирован сдвиг частот, на рис. 4, *b* – снижение декремента затухания.

Характер изменения спектрограмм после термообработки у всех образцов идентичный. Зарегистрированы сдвиг частот вверх и снижение декремента затухания основных резонансных гармоник, результаты приведены в табл. 3. Причем величина сдвига частоты примерно равна для всех основных резонансных гармоник, разброс значений сдвига частоты для разных гармоник составляет  $\pm 4\%$  от средней величины сдвига. Установлена зависимость указанных из-

менений от параметров термообработки – температуры и длительности выдержки (рис. 5). Установлено, что влияние термообработки на спектральные характеристики образцов, бывших в эксплуатации, несколько больше, чем новых.

За исключением опубликованных данных по результатам многолетних исследований церковных колоколов [30], других источников, как отечественных, так и зарубежных, указывающих на сдвиг частот резонансных гармоник образцов при структурных изменениях после длительной эксплуатации, не найдено. В работе [30] обнаружено понижение частот основных обертонов и увеличение

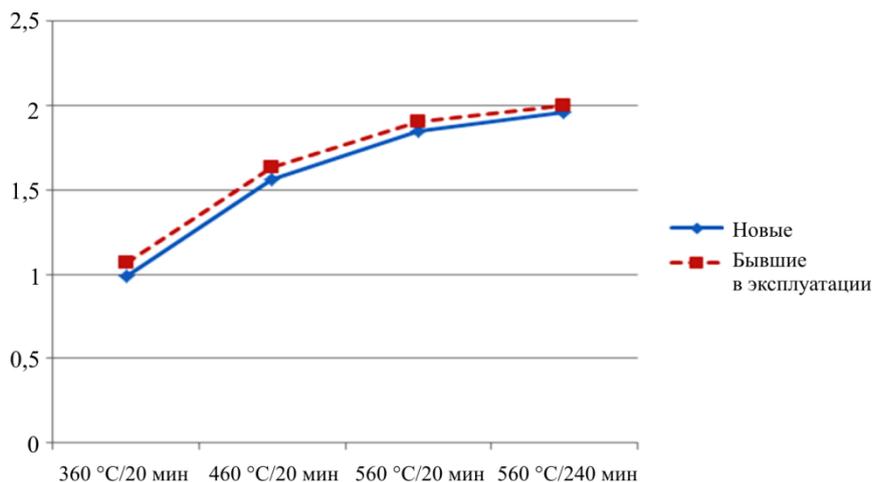


Рис. 5. Зависимость сдвига частот резонансных гармоник на примере гармоники № 4 по табл. 2 (в диапазоне от 7600 до 7700 Гц) для колец подшипников новых и бывших в эксплуатации.

По оси ординат – значение относительного изменения частоты в %  
 Fig. 5. Dependence of the frequency shift of resonant harmonic No. 4 according to table 2 (in the range from 7600 to 7700 Hz) for new and long-term used bearing rings.  
 The ordinate represents the relative change of frequency in percent

декремента затухания в процессе длительной эксплуатации колоколов. Эти изменения связаны с накоплением эксплуатационной структурной поврежденности материала, что, в свою очередь, вызывает повышение внутреннего трения, которое проявляется при затухании акустических колебаний малой амплитуды в упругой области. Другим фактором при длительной эксплуатации, который необходимо принимать во внимание в случае конструктивных элементов, подвергающихся циклическим нагрузкам, таких как элементы подшипников, является накопление внутренних напряжений. В работе [31], где предлагается способ восстановления исходных механических свойств металла сварных труб, бывших длительное время в эксплуатации, исследовано влияние определенных режимов термообработки на снижение структурной поврежденности.

Таблица 3

Средние значения сдвига частот и относительного изменения декремента затухания основных резонансных гармоник после отпуска

Table 3

The shift in frequency values and relative change in the damping decrement of main resonance harmonics after tempering

Номер образца	Средние значения сдвига частот, %	Относительное изменение декремента затухания гармоники 7,6–7,7 кГц
1-1	0,99	0,56
1-2	1,56	0,44
1-3	1,85	0,38
1-4	1,96	0,34
2-1	1,07	0,53
2-2	1,63	0,42
2-3	1,90	0,36
2-4	2,00	0,33

После анализа данных образцы 1–1, 1–2 и 1–3 были подвергнуты закалке по следующему режиму: нагрев до 830 °C с выдержкой 30 мин, охлаждение в масле при температуре 30 °C, отпуск при 150 °C в течение 1,5 ч, охлаждение на воздухе. Ввиду того что точное воспроизведение в лабораторных условиях режима закалки, соответствующего режиму при промышленном изготовлении деталей, не представляется возможным, в ходе данного исследования получена лишь приближенная оценка изменений. Анализ акустических спектральных характеристик после закалки показывает, что происходят изменения, обратные изменениям после отпуска – снижение частот основных резонансных гармоник и увеличение декремента затухания приблизительно до исходного уровня. Дальнейшие исследования образцов с чередованием отпуска и закалки в лабораторных условиях на одном и том же оборудовании, возможно, позволят получить более точные результаты.

### Выводы

Подтверждена повторяемость изменений акустических спектральных характеристик сигналов акустического отклика на точечное ударное воздействие после термообработки и их соответствие изменениям микроструктуры образцов и твердости. Обнаружено изменение частот основных резонансных гармоник образцов в результате термообработки. Установлено, что влияние термообработки на акустические спектральные характеристики образцов, бывших в эксплуатации, несколько больше, чем новых.

Результаты спектрального анализа возбуждаемых колебаний стальных образцов, подвергаемых термообработке, с применением динамических спектрограмм позволяют сделать вывод об информативности данного подхода

и возможности определения индикативных спектральных параметров для оценки структурных изменений материала. Результаты данной работы могут быть использованы

при разработке экспресс-методов неразрушающего контроля изменений состояния стальных конструктивных элементов и контроля качества термообработки.

### Библиографический список

1. Dreiman N., Fry E. Sound radiation of structural metals at normal and elevated temperatures // International Compressor Engineering Conference, USA. – Paper 1260. – 1998. – P. 325–330.
2. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 183 с.
3. Левитан Л.Я., Федорченко А.Н., Шарко А.В. Влияние режимов термообработки на акустические характеристики углеродистых сталей // Дефектоскопия. – 1980. – № 9. – С. 52–57.
4. О связи параметров распространения упругих волн с характеристиками длительной прочности конструкционных материалов / Б.А. Конюхов, Б.С. Перельман, А.Л. Углов, В.И. Унылов // Проблемы прочности. – 1982. – № 9. – С. 49–51.
5. Влияние технологической обработки высокопрочной стали на коэффициенты упругоакустической связи / В.Ф. Быстров, В.В. Гузовский, В.Ф. Золотов, Н.Е. Никитина // Дефектоскопия. – 1986. – № 7. – С. 92–93.
6. Мишакин В.В., Демедик С.Д. Акустический метод оценки поврежденности материалов // Дефектоскопия. – 1991. – № 9. – С. 93–95.
7. Васильев В.Г., Углов А.Л., Хлыбов А.А. Акустический метод контроля состояния корпусов ВВЭР // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 1. – С. 258–266.
8. Озябкин А.Л., Колесников И.В., Харламов П.В. Динамический мониторинг состояния резьбовых соединений тормозных систем вагонов // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов н/Д, 2012. – № 1. – С. 23–30.
9. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals / A. Glowacz, W. Glowacz, Z. Glowacz, J. Kozik // J. Measurement. – 2018. – Vol. 113. – P. 1–9.
10. Ковалев А.Я., Возный Т.С. Метод генерации акустических гармоник в исследованиях усталости металлов // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 315–319.
11. Lesage J.C., Sinclair A.N. Characterization of Prestressed Concrete Cylinder Pipe by Resonance Acoustic Spectroscopy // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2015. – Vol. 6. – Iss. 1. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000180](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000180) (accessed 29 June 2018).
12. Бурцев Д.С. Конструктивное и технологическое обеспечение функционально-эстетических свойств колоколов: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во Моск. гос. маш. ун-та. – 2013.
13. Спектор А.Г., Зельбет Б.П., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. – М.: Металлургия, 1980. – 264 с.
14. Оценка эксплуатационной поврежденности по излучаемому акустическому полю при ударных испытаниях стальных образцов / П.Р. Нечипоренко [и др.] // Радиоинформ-2017: сб. науч. тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИРЭА, 2017. – С. 603–609.
15. Микита Г.И. Вейвлет-спектральный метод контроля звучания колоколообразных изделий с учетом особенностей объектов контроля [Электронный ресурс] // Академия Тринитаризма. – публ. 11936, 04.04.2005. – URL: <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0218/001a/02180003.htm> (дата обращения: 30.06.2018).
16. Allen R.L., Mills D.W. Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure. – Wiley-IEEE Press, 2004. – 966 p.
17. The simulation study of three typical time frequency analysis methods / Yifeng Lia [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2017. – Vol. 8. – 02007.
18. Sawczuk W., Szymański G. M. Diagnostics of the railway friction disc brake based on the analysis of the vibration signals in terms of resonant frequency // Archive of Applied Mechanics. – 2017. – Vol. 87. – Iss. 5. – P. 801–815.
19. Wayside acoustic diagnosis of defective train bearings based on signal resampling and information enhancement / Qingbo He, Jun Wang, Fei Hu, Fanrang Kong // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – Vol. 332. – Iss. 21. – P. 5635–5649.
20. Multi-bearing defect detection with trackside acoustic signal based on a pseudo time–frequency analysis and Dopplerlet filter / Haibin Zhang, Siliang Lu, Qingbo He, Fanrang Kong // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – Vol. 70–71. – P. 176–200.
21. Hemmati F., Orfali W., Gadala M.S. Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation // Applied Acoustics. – 2016. – Vol. 104. – P. 101–118.
22. Гучук В.В. Эргономические аспекты визуализации информационных параметров в системах контроля и управления // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – М., 2015. – № 2. – С. 81–84.
23. Гучук В.В., Нестеров В.С. Технологические аспекты визуализации информационных динамических параметров // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD-2010): тр. 4-й Междунар. конф. / ИПУ РАН. – М., 2010. – Т. 2. – С. 175–177.
24. Горбачев И.В., Прядко А.В. Вариант реализации акустической системы автоматизированного контроля герметичности магистральных нефтепроводов // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – Тюмень. – 2009. – № 1. – С. 6–11.
25. Захезин А.М. Метод неразрушающего контроля для определения зарождающихся дефектов при помощи фурье- и вейвлет-анализа вибрационного сигнала // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 28–33.
26. Бочкова Р.Р., Абрамова М.М. Караваева М.В. Влияние температуры предварительного отпуска на механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали после РКУП // Уральская школа молодых металлургов: сб. тр. XVIII Междунар. науч.-техн. урал. школы-семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург, 2017. – С. 435–439.
27. Наседкина Я.И., Караваева М.В., Кайбышев О.А. Влияние комбинированной термомеханической обработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали // Вестн. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2012. – Т. 16, № 5 (50). – С. 145–148.
28. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа. – М.: Техносфера, 2016. – 330 с.
29. Comparative Performance Analysis of Hamming, Hanning and Blackman Window / P. Podder, T.Z. Khan,

H.M. Khan, M.M. Rahman // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 96. – No. 18. – P. 1–7.

30. Климин Е.А. К проблеме мониторинга микротоновых изменений в звучании колоколов // Колокола: история и современность: материалы науч. конф. – Ростов, – 2015. – С. 92–104.

## References

1. Dreiman N., Fry. E. Sound radiation of structural metals at normal and elevated temperatures. *International Compressor Engineering Conference, USA*, 1998, paper 1260, pp. 325-330.

2. Muravyev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. Skorost zvuka i struktura staley i splavov [The ultrasound velocity and structure of steels and alloys]. *Novosibirsk, Nauka*, 1996, 183 p.

3. Levitan L.Ya., Fedorchenko A.N., Sharko A.B. Vliyaniye rezhimov termoobrabotki na akusticheskie kharakteristiki uglirodistykh staley [Influence of heat treatment regimes on the acoustic characteristics of carbon steels]. *Defektoskopiya*, 1980, no. 9, pp. 52-57.

4. Konyukhov B.A., Perelman B.S., Uglov A.L., Unylov V.I. O svyazi parametrov rasprostraneniya uprugikh voln s kharakteristikami dlitelnoy prochnosti konstruksionnykh materialov [On the relationship between propagation parameters of elastic waves and the characteristics of the durability of structural materials]. *Problemy prochnosti*, 1982, no 9, pp. 49-51.

5. Bystrov V.F., Guzovskiy V.V., Zolotov V.F., Nikitina N.E. Vliyaniye tekhnologicheskoy obrabotki vysokoprochnoy stali na koeffitsienty uprugo-akusticheskoy svyazi [Effect of high-strength steel processing treatment on elastic-acoustic coupling coefficients]. *Defektoskopiya*, 1986, no. 7, pp. 92-93.

6. Mishakin V.V., Demedik S.D. Akusticheskiy metod otsenki povrezhdennosti materialov [Acoustic method for assessing damage of materials]. *Defektoskopiya*, 1991, no. 9, pp. 93-95.

7. Vasilyev V.G., Uglov A.L., Khlybov A.A. [Acoustic method for monitoring the state of VVER vessels]. *Atomnaya Energiya – Atomic Energy*, 2009, vol. 106, no. 1, pp. 37-42.

8. Ozyabkin A.L., Kolesnikov I.V., Kharlamov P.V. Dinamicheskiy monitoring sostoyaniya rezbovykh soedineniy tormoznykh sistem vagonov [Dynamic monitoring of threaded joints state of the wagon brake systems]. *Vestnik RGUPS*, 2012, No 1, pp. 23-30.

9. Glowacz A., Glowacz W., Glowacz Z., Kozik J. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. *J. Measurement*, 2018, vol. 113, pp. 1-9.

10. Kovalev A.Ya., Voznyy T.S. Metod generatsii akusticheskikh garmonik v issledovaniyakh ustalosti metallov [Method of generation of acoustic harmonics in studies of metal fatigue]. *Kiev, Naukova dumka, Prochnost materialov i elementov konstruksiy pri zvukovykh i ultrazvukovykh chastotakh nagruzheniya*, 1983, pp. 315-319.

11. Lesage J.C., Sinclair A.N. Characterization of Prestressed Concrete Cylinder Pipe by Resonance Acoustic Spectroscopy. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2015, vol. 6, iss. 1. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000180

12. Burtsev D.S. Konstruktivnoe i tekhnologicheskoe obespechenie funktsionalno-esteticheskikh svoystv kolokolov. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Constructive and technological support of the functional and aesthetic properties of bells. Thesis for the degree of PhD of technical sciences]. *Moskovskiy gosudarstvennyy mashinostroitelnyy universitet*, 2013.

13. Spektor A.G., Zelbet B.P., Kiseleva S.A. Struktura i svoystva podshipnikovyykh staley [Structure and properties of bearing steels]. *Moscow, Metallurgiya*, 1980, 264 p.

31. Пат. 2290620 РФ, МПК G 01 N 1/28, C 21 D8/00. Способ восстановления исходных механических свойств металла длительно эксплуатируемых электросварных труб / Шементов В.А., Зайцев Н.Л., Гайдт Д.Д., Демаков А.М. 2005122073/28; заявл. 12.07.2005; опубл. 27.12.2006.

14. Goldstein R.V., Nechiporenko P.R., et al. Otsenka ekspluatatsionnoy povrezhdennosti po izluchayemomu akusticheskomu polyu pri udarnykh ispytaniyakh stalnykh obraztsov [Assessment of operational damage by the acoustic field emitted in the blow test of steel samples]. *Moscow, MIREA, Sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RADIOINFOKOM–2017*, 2017, pp. 603-609.

15. Mikita G.I. Veyvletno-spektralnyy metod kontrolya zvuchaniya kolokolobraznykh izdeliy s uchetom osobennostey obektov kontrolya [Wavelet-spectral method for testing the sound of bell-shaped products, taking into account the features of the objects of control]. *Akademiya Trinitarizma*, 2005, no. 11936

16. Allen R.L., Mills D.W. Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure. *Wiley-IEEE Press*, 2004, 966 p.

17. Yifeng Lia, Lihui Zhang, Baohui Li, Yan Xu, Sanyuan Wu, Xiaoyang Wei, Xiaoyan Liu, Rong Lin and Quan Wang. The simulation study of three typical time frequency analysis methods. *BIO Web of Conferences*, 2017, vol. 8, 02007.

18. Sawczuk W., Szymański G. M. Diagnostics of the railway friction disc brake based on the analysis of the vibration signals in terms of resonant frequency. *Archive of Applied Mechanics*, 2017, vol. 87, iss. 5, pp. 801-815.

19. Qingbo He, Jun Wang, Fei Hu, Fanrang Kong. Wayside acoustic diagnosis of defective train bearings based on signal resampling and information enhancement, *Journal of Sound and Vibration*, 2013, vol. 332, iss. 21, pp. 5635-5649.

20. Haibin Zhang, Siliang Lu, Qingbo He, Fanrang Kong. Multi-bearing defect detection with trackside acoustic signal based on a pseudo time–frequency analysis and Dopplerlet filter, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 70-71, pp. 176-200.

21. Hemmati F., Orfali W., Gadala M.S. Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation. *Applied Acoustics*, 2016, vol. 104, pp. 101-118.

22. Guchuk V.V. Ergonomicheskiye aspekty vizualizatsii informatsionnykh parametrov v sistemakh kontrolya i upravleniya [Ergonomic aspects of information parameters visualization in control and management systems]. *Moscow, Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk, Scientific Information Publishing Center*, 2015, no. 2, pp. 81-84.

23. Guchuk V.V., Nesterov V.S. Tekhnologicheskiye aspekty vizualizatsii informatsionnykh dinamicheskikh parametrov [Technological aspects of visualization of information dynamic parameters]. *Moscow, ICS RAS, Sbornik trudov IV mezhdunarodnoy konferentsii "Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem" (MLSD-2010)*, 2010, vol. 2, pp. 175-177.

24. Gorbachev I.V., Pryadko A.V. Variant realizatsii akusticheskoy sistemy avtomatizirovannogo kontrolya germetichnosti magistralnykh nefteprovodov [Method of the acoustic system realization for automated tightness control of main oil pipelines]. *Tyumen, Nauka v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti*, 2009, no. 1, pp. 6-11.

25. Zakhezin A.M. [Method of non-destructive testing for detection the incipient defects using Fourier and wavelet analysis of vibration signal]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Stroitelstvo i arkhitektura"*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 28-33.
26. Bochkova R.R., Abramova M.M. Karavaeva M.V. Vliyanie temperatury predvaritelnogo otpuska na mekhanicheskie svoystva vysokouglerodistoy podshipnikovoy stali posle RKUP [Effect of pre-tempering temperature on the mechanical properties of high-carbon bearing steel after ECAP]. *Ekaterinburg, Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy uralskoy shkoly-seminara metallovedov – molodykh uchenykh "Uralskaya shkola molodykh metallovedov"*, 2017, pp. 435-439.
27. Nasedkina Y.I., Karavaeva M.V., Kaibyshev O.A. Vliyanie kombinirovannoy termomekhanicheskoy obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva vysokouglerodistoy podshipnikovoy stali [The impact of combined thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties high carbon bearing steel]. *Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviatsionnogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2012, vol. 16, no. 5(50), pp. 145-148.
28. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Okonnnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza [Window functions for harmonic analysis]. *Moscow, Tekhnosfera*, 2016, 330 p.
29. Podder P., Khan T.Z., Khan H.M., Rahman M.M. Comparative Performance Analysis of Hamming, Hanning and Blackman Window. *International Journal of Computer Applications*, 2014, vol. 96, no. 18, pp. 1-7.
30. Klimin E.A. K probleme monitoringa mikrotonovykh izmeneniy v zvuchanii kolokolov [To the problem of monitoring microtonic changes in the church bell sound]. *Rostov, Materialy nauchnoy konferentsii "Kolokola: istoriya i sovremennost"*, 2015, pp. 92-104.
31. Shementov V.A., Zaytsev N.L., Gaydt D.D., Demakov A.M. Sposob vosstanovleniya iskhodnykh mekhanicheskikh svoystv metalla dlitelno ekspluatiruemykh elektrosvarynykh trub [Method for reconditioning the initial mechanical properties of metal for long-lived electric welded pipes]. Patent 2290620 Russian Federation, MPK G 01 N 1/28, C 21 D8/00., 2005122073/28; Declared 12.07.2005, Published 27.12.2006.