

Сапожник К. Р., Божоев И. Ч., Башков О. В.
K. R. Sapozhnik, I. Ch. Bozhoev, O. V. Bashkov

ВЛИЯНИЕ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЁРДОСТЬ СТАЛИ 45

INFLUENCE OF SUPERMULTI-CYCLE LOADING ON STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF STEEL 45

Сапожник Ксения Романовна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sapozhnik_k@list.ru.

Ksenia R. Sapozhnik – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-na-Amure, 27, Lenin Ave. E-mail: sapozhnik_k@list.ru.

Божоев Илгиз Чыныбаевич – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ilgiz.bojoev@gmail.com.

Ilgiz Ch. Bozhoev – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: ilgiz.bojoev@gmail.com.

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: bashkov_ov@mail.ru.

Oleg V. Bashkov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Komsomolsk-on-Amur, Russia); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: bashkov_ov@mail.ru.

Аннотация. Работа посвящена исследованию структурных изменений и механических свойств стали 45 в условиях объёмной ультразвуковой обработки в режиме сверхмногоциклового усталости. Образцы из стали 45 подвергались циклическим испытаниям ультразвуковой установкой, созданной в лаборатории на базе ультразвукового генератора номинальной мощностью 1 кВт. В образцах, изготовленных по расчётной модели, возбуждались стоячие волны ультразвуковой частотой 20 кГц и осуществлялось растяжение-сжатие с максимальной амплитудой 203 МПа. Увеличение количества циклов ультразвукового воздействия приводит к увеличению микротвёрдости и структурным изменениям в зоне максимальных напряжений материала.

Summary. The paper is dedicated to the study of structural changes and mechanical properties of steel 45 in conditions of volume ultrasonic processing in the mode of very high cycle fatigue. Specimens of steel 45 were subjected to cyclic tests by an ultrasonic unit created in the laboratory on the basis of an ultrasonic generator with nominal output 1 kW. In the specimens made according to the calculation model stationary waves were excited at an ultrasonic frequency of 20 kHz and tension-compression were carried out with a maximum amplitude of 203 MPa. An increase in the number of cycles of ultrasonic exposure leads to an increase in microhardness and structural changes in the zone of maximum stresses material.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, сверхмногоцикловая усталость, упрочнение, плотность границ зёрен, микротвёрдость.

Key words: ultrasonic vibrations, very high cycle fatigue, hardening, grain boundary density, microhardness.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-452.2022.4).

Введение. Воздействие ультразвука позволило интенсифицировать более тридцати технологических процессов, что стало возможным благодаря особенностям ультразвуковых колебаний. Его универсальность в применении к различным материалам, обусловленная способностью ультразвука проникать в любую упругую среду, способствовала появлению эффективных методов обработки материалов [1; 2]. На сегодняшний день наиболее перспективными направлениями исследований и применения технологии ультразвуковой обработки, сопровождающейся воздействием на структуру материалов, являются:

1. снятие остаточных напряжений ультразвуковой ударной обработкой сварного шва [3; 4];
2. повышение уравниваемости структуры в деформируемых материалах, а также в объёмных наноструктурированных материалах, полученных методами интенсивной пластической деформации [5; 6];
3. ультразвуковое ударное упрочнение, реализуемое по схеме поверхностного пластического деформирования [7; 8];
4. процесс сверхмногоцикловых испытаний материалов на усталость [9–11].

Большинство перечисленных методов обработки направлено на изменение поверхностных и приповерхностных слоёв. Несмотря на то что особенности воздействия на материал при создании в нём мощных ультразвуковых полей достаточно хорошо изучены, природа структурных изменений, происходящих при объёмном ультразвуковом воздействии при малых амплитудах колебаний, в настоящее время недостаточно раскрыта. Представление о совокупности процессов и механизмах их протекания в структуре материала с момента начала ультразвукового воздействия до разрушения материала можно получить, изучая поведение материалов в условиях сверхвысоких циклических испытаний на усталость, основанных на объёмном ультразвуковом воздействии.

В области мало- и многоциклового усталости уже существуют определённые закономерности, выведенные из механических констант, благодаря которым можно предположить поведение материала. При циклическом нагружении в материале могут происходить процессы как упрочнения, так и разупрочнения. Характер процесса зависит от исходной структуры материала, величины амплитуды максимальных напряжений и продолжительности нагружения [12]. Тем не менее область изучения сверхвысокоциклового воздействия ультразвука и испытаний на сверхмногоцикловую усталость по-прежнему содержит много вопросов, касающихся кинетики структурных изменений и свойств материалов.

Следовательно, установление эффекта сверхвысокоциклового ультразвукового воздействия на структуру и свойства материалов при нагрузках, соответствующих напряжениям ниже предела выносливости, позволит выявить определённые закономерности изменения структуры, определить подходы к выбору параметров нагружения, при контроле которых можно добиться улучшения показателей необходимых свойств: упрочнения материала или снятия в нём напряжений. Полученные результаты могут быть полезны при разработке новых методов структурной модификации материалов, обработка которых затруднена традиционными механическими или термическими методами. Целью данной работы является изучение эффекта объёмного ультразвукового воздействия на структуру и механические свойства стали 45 в условиях сверхмногоциклового нагружения.

Материалы и методы. Исследуемым материалом является нормализованная сталь 45 в состоянии поставки. Все образцы изготовлены из одной партии стального проката. Химический состав и физические свойства материала приведены в табл. 1. Сталь 45 является широко используемым конструкционным материалом благодаря своим эксплуатационным свойствам при низкой стоимости. Высокая обрабатываемость позволяет легко варьировать размеры изготавливаемых образцов.

Для обработки была спроектирована и изготовлена ультразвуковая установка. Основу установки составляют генератор типа ИЛ-10, магнитострикционный преобразователь и колебательная система, состоящая из ступенчатого рупора с прикреплённым к нему с помощью резьбового соединения образцом. Колебательная система спроектирована таким образом, чтобы обеспечить ре-

зональное состояние элементов конструкции при рабочей частоте установки 20 400 Гц. Определение начальных геометрических размеров колебательной системы и характеристик напряжённого состояния ультразвукового концентратора и образца проводили в программном пакете Abaqus методом конечных элементов [13]. Собственные частоты, формы колебаний, распределение напряжений и амплитуды перемещений элементов ультразвуковой колебательной системы определялись моделированием.

Таблица 1

Свойства стали 45

Физические свойства			Химический состав, %					
Модуль Юнга E , ГПа	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
						Не выше		
207,3	7364	0,31	0,42...0,50	0,17...0,37	0,5...0,8	0,25	0,3	0,3

Геометрические размеры концентратора и образца, обеспечивающие ультразвуковые колебания системы в условиях резонанса, показаны на рис. 1. Размеры a , b , c выбраны исходя из резонансных свойств концентратора.

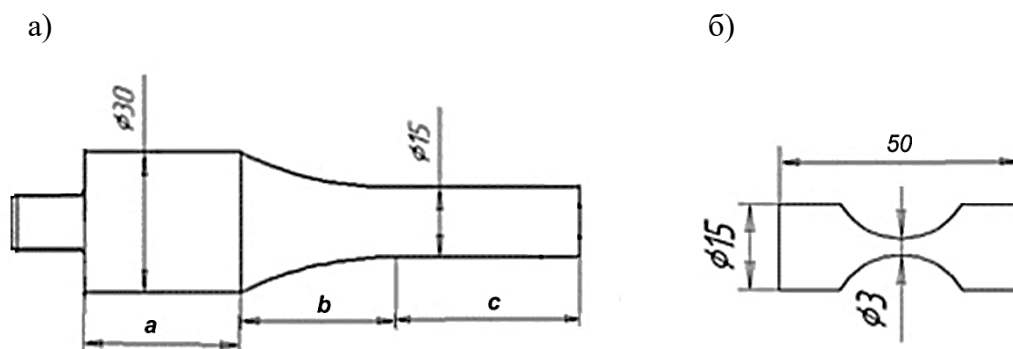


Рис. 1. Конфигурация элементов колебательной системы: а – концентратор; б – образец

Результат моделирования напряжённого состояния материала в элементах колебательной системы представлен на рис. 2.

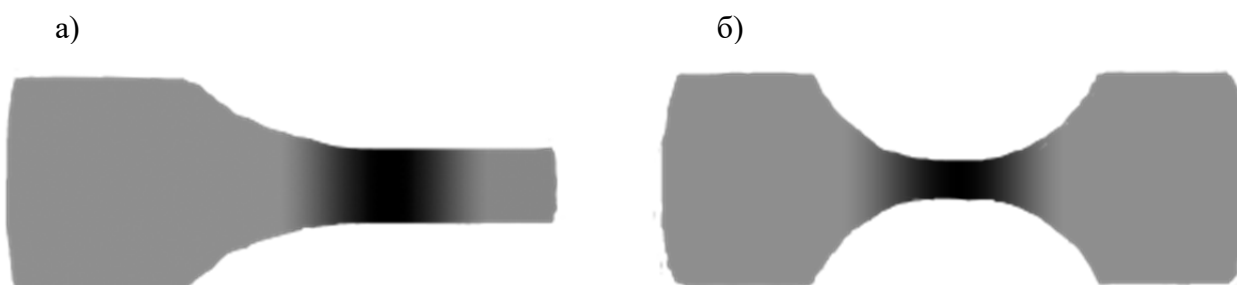


Рис. 2. Характеристики напряжённого состояния: а – концентратор; б – образец

Особенностями разработанной колебательной системы являются модернизированные конфигурации её элементов. Таким образом, имитированный ультразвуковой концентратор с катеноидальным переходом обеспечивал увеличение амплитуд сообщаемых образцу колебаний в 11,2 раза, чего нельзя было достичь за счёт использования традиционных форм (конической, экспоненциальной и т. п.). Конфигурация образца, также выполненного с катеноидальной формой рабочей части, обеспечивала наибольшее значение амплитуды напряжения в середине образца с

плавным снижением к краям образца, что позволяет сравнивать влияние сразу нескольких уровней напряжений на структуру материала [15].

После экспериментального определения уровня оптимального значения напряжения, при котором материал может выдержать без разрушения значительное число циклов, соответствующее значениям сверхмногоциклового нагружения, образцы были испытаны в следующем условии: максимальное напряжение в центре образца было выбрано 203 МПа. Получение экспериментальных значений частоты резонансной системы и значимых выходных параметров ультразвуковых колебаний осуществлялось с помощью высокоскоростного лазерного виброметра Polytec HCV-2000. На протяжении всего испытания контролировали температуру образца, чтобы не допустить её значительного превышения, которое могло бы повлиять на структурные изменения материала образца.

После ультразвуковой обработки образцы подвергались разрезке по центральной оси на две половины, шлифовке, полировке центральной части одной из половин в месте среза для последующего микроскопического анализа. Анализ микроструктуры проводили на микроскопе Nikon Eclipse MA200 при увеличении $\times 400$. Цифровые изображения микроструктур обрабатывали с помощью пакета программ Image-Pro.Plus-5.1.

Критерием количественной оценки при анализе микроструктуры материала служила плотность границ структурных элементов q_i [16], ранее широко применявшаяся при количественном анализе структурных изменений металлических материалов:

$$q_i = \frac{P_i}{F_i},$$

где P_i – периметр структурного элемента; F_i – площадь структурного элемента.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 показано распределение плотности границ зёрен в области минимальных напряжений, т. е. в области, удалённой от зоны максимальных напряжений в образце, и в зоне максимальных напряжений. Приведено распределение плотности границ зёрен q_i для образцов, подвергнутых испытаниям с разным числом циклов: исходное состояние без ультразвуковой обработки, испытания с числом циклов $N = 2,4 \cdot 10^7$ и $N = 3,94 \cdot 10^8$.

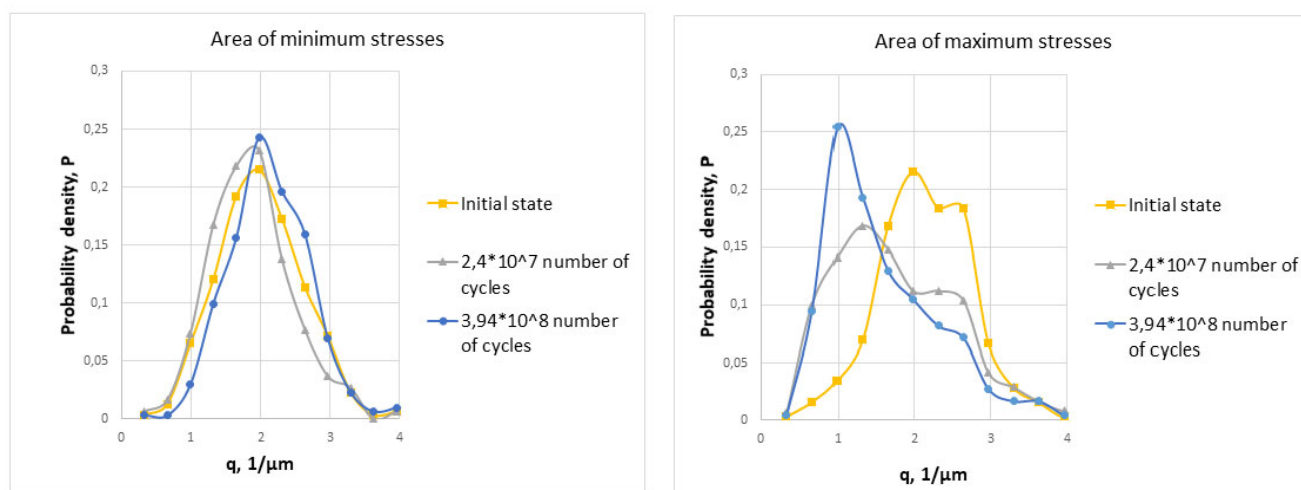


Рис. 3. Изменение плотности границ зёрен в областях максимальных и минимальных напряжений

По результатам количественной оценки распределения плотности границ зёрен q было установлено, что в зоне влияния минимальных напряжений ультразвукового воздействия (краевые части образцов) существенных структурных изменений не происходит даже при максимальном количестве циклов нагружения. Однако область максимальных напряжений (центр образца) характеризуется смещением пика распределения плотности границ зёрен из области $q_i = 2,0 \dots 2,5 \text{ мкм}^{-1}$ в область

$q_i = 1,3 \dots 1,5 \text{ мкм}^{-1}$ для образца с числом циклов $N = 2,4 \cdot 10^7$ и в область $q_i = 0,9 \dots 1,1 \text{ мкм}^{-1}$ для образца с числом циклов $N = 3,94 \cdot 10^8$. Смещение пика распределения плотности границ зёрен в область меньших значений свидетельствует о том, что при ультразвуковом воздействии с заданным уровнем напряжения 203 МПа криволинейность границ зёрен снижается, в результате чего происходит снижение плотности границ зёрен. С увеличением числа циклов нагружения наблюдаемые структурные изменения становятся более выраженными – увеличивается значение пика распределения плотности границ зёрен.

Такие изменения в структуре приводили и к изменению механических свойств материала. Это было выявлено по результатам измерения микротвёрдости образцов вдоль продольной оси из области максимальных напряжений с шагом 1 мм (см. рис. 4). Повышение микротвёрдости наблюдалось в диапазоне до 3 мм от области влияния максимальных напряжений, что соответствовало уровню механических напряжений 157...203 МПа.

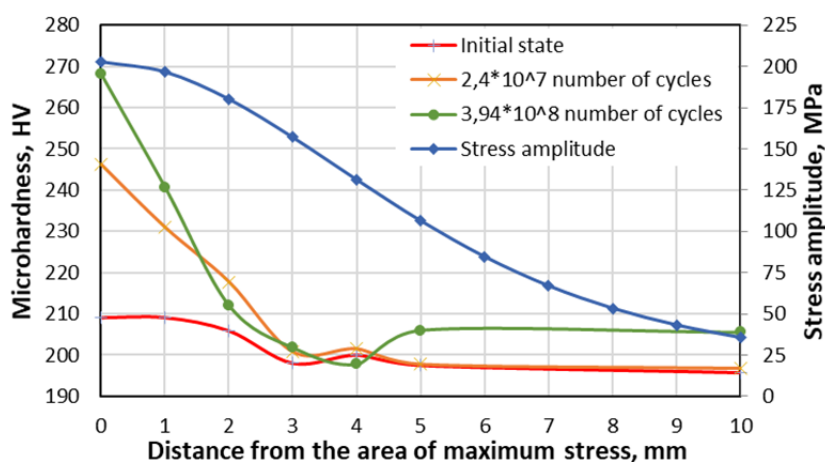


Рис. 4. Распределение напряжений и значений микротвёрдости, измеренных вдоль продольной оси образцов, начиная с области максимальных напряжений

При амплитудах напряжений менее 157 МПа (диапазон более 3 мм от центра образца) значения микротвёрдости соответствуют значениям микротвёрдости материала в исходном состоянии.

Таким образом, можно предположить, что воздействие ультразвукового циклического нагружения при напряжениях ниже 157 МПа приводит к незначительным структурным изменениям при сохранении значений показателей механических свойств. На рис. 5 видно, что структурные изменения, выявляемые параметром плотности границ зёрен, наблюдаются при напряжениях 106 МПа и выше. При более низких напряжениях плотность границ зёрен увеличивается, постепенно приближаясь к плотности границ зёрен в исходном состоянии стали.

По мере удаления от области максимальных напряжений медианное значение плотности границ зёрен увеличивается, и на расстоянии 10 мм приближается к значению, соответствующему исходному состоянию материала. Это подтверждает максимальную эффективность ультразвукового воздействия на структуру нормализованной стали 45 в состоянии поставки в диапазоне 157...203 МПа.

Микротвёрдость в области максимальных напряжений после обработки в течение $N = 2,4 \cdot 10^7$ циклов увеличилась на 13 %, а после $N = 3,9 \cdot 10^8$ циклов – на 31 % в сравнении со значениями микротвёрдости исходного состояния образца (см. рис. 4). Это свидетельствует о влиянии продолжительности низкоамплитудной ультразвуковой обработки на механические свойства среднеуглеродистой стали.

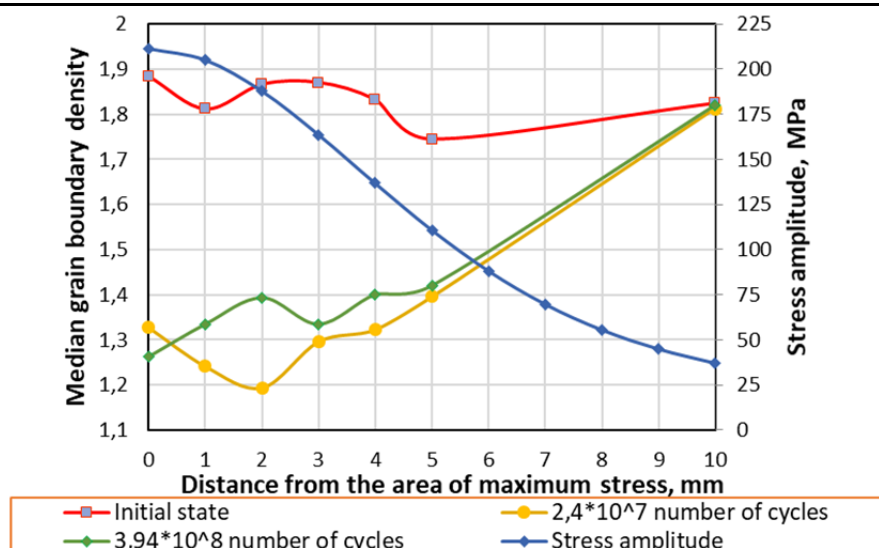


Рис. 5. Изменение средней плотности границ зёрен вдоль продольной оси образцов

Вывод. Сверхмногоцикловое нагружение рассматривалось как возможность изучения поведения материала в условиях ультразвукового объёмного воздействия при различном числе циклов и низких уровнях напряжений – от 203 МПа и ниже.

На основе количественного анализа микроструктур с использованием критерия плотности границ зёрен установлено, что границы зёрен при обработке материалов ультразвуковым воздействием сглаживаются и их плотность уменьшается. Изменения структурного состояния стали 45 под действием длительных малоамплитудных нагрузок привели к локальному повышению микротвёрдости стали 45 до 13 % при числе циклов $N = 2,4 \cdot 10^7$ и до 31 % при количестве циклов $N = 3,94 \cdot 10^8$.

Установлено, что минимальный порог эффективных напряжений, способных вызвать существенные изменения в структуре стали 45, приводящие к повышению значений микротвёрдости, составляет не менее 157 МПа. Структурные изменения, приводящие к уменьшению плотности границ зёрен без изменения микротвёрдости, происходят в диапазоне 106...157 МПа.

На основании результатов данного исследования можно предположить, что такой подход к обработке материалов открывает большие перспективы для тех материалов, которые не поддаются обработке традиционными методами из-за их хрупкости, термонеустойчивости (например, объёмные наноструктурные материалы, полученные методами жёсткой пластической деформации).

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск: Изд-во АГТУ, 2010. – 178 с.
2. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман; пер. с нем. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1957. – 728 с.
3. Зарезин, В. Е. Методика повышения качества сварных швов ультразвуковой ударной обработкой с обоснованием оптимальных параметров упрочнения поверхностного слоя / В. Е. Зарезин // Техно-технологические проблемы службы. – 2016. – № 4 (38). – С. 16-22.
4. Сидоров, М. М. Повышение прочности сварных соединений из низколегированных сталей ультразвуковой ударной обработкой / М. М. Сидоров, Н. И. Голиков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2016. – № 1 (81). – С. 67-72.
5. Назаров, А. А. Обзор: неравновесные границы зёрен в объёмных наноструктурированных металлах и их восстановление под влиянием нагрева и циклической деформации / А. А. Назаров // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 372-381.
6. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов: учеб. пособие / О. Л. Гасанов, Е. С. Двилис, В. В. Полисадова, А. П. Зыкова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 148 с.

7. Чейлях, А. П. Перспективные технологии упрочнения при обработке материалов / А. П. Чейлях, Я. А. Чейлях, Ю. С. Самогугина. – Мариуполь: ООО «ППНС», 2016. – 378 с.
8. Артемьев, В. А. Упрочнение деталей ультразвуковой поверхностной пластической деформацией / В. А. Артемьев, Н. А. Крылова, В. Г. Шуваев // Материалы Международного симпозиума «Надёжность и качество». Т. 2. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2017. – С. 262.
9. Аномалии упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении металлов и кинетика развития повреждений / М. В. Банников, И. А. Банникова, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк // Меркурий ПФРК. – 2017. – № 4. – С. 63-70.
10. S. Chengqi, S. Qingyuan, H. Yuanpei, W. Yujie, Effects of intermittent loading on fatigue life of a high strength steel in very highcycle fatigue regime, International Journal of Fatigue. 117 (2018) 9-12.
11. A. Tridello, D. Paolino, M. Rossetto, Ultrasonic VHCF Tests on Very Large Specimens with Risk-Volume Up to 5000 mm, Applied Sciences. 10 (2020).
12. Терентьев, В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 287 с.
13. Золочевский, А. А. Введение в Abaqus: метод. пособие / А. А. Золочевский, А. А. Беккер. – Харьков: Группа Бизнес Инвестор, 2011. – 47 с.
14. Лавриненков, А. Д. Расчёт амплитудно-частотных характеристик ультразвуковых преобразователей продольных и продольно-крутильных колебаний с использованием пакета Abaqus / А. Д. Лавриненков // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – № 6. – С. 957-968.
15. Сапожник, К. Р. Моделирование ультразвуковых концентраторов для обработки объёмных наноструктурных материалов / К. Р. Сапожник, О. В. Башков, М. Д. Борисенко // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 259-264.
16. Ким, В. А. Количественная оценка карбидной неоднородности быстрорежущих сталей с помощью компьютерной металлографии / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 105-111.