
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.03
УДК 621.822

М.Г. Бабенко, С.В. Слесарев

Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

**К ВОПРОСУ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЯХ**

Представлены результаты исследования механизма изменения размерной точности прецизионных деталей типа колец подшипников, возникающего из-за асимметрии эпюр остаточных напряжений относительно главных осей поперечных и продольных сечений колец, которые происходят в процессе релаксации. Особенно остро задача стабилизации геометрических параметров стоит перед производством прецизионных подшипников качения классов точности 6 и выше, которые широко используются в различных машинах и агрегатах. Даже незначительное изменение размеров в течение определенного интервала времени приводит к резкой потере точности этих подшипников. Существующая технология и известные способы стабилизации геометрических показателей, такие как термическая обработка, низкотемпературный отпуск, искусственное старение, малоэффективны, так как их использование на практике приводит к большим энергетическим затратам, а степень уточнения геометрических размеров и формы незначительна. Ввиду этого работы по совершенствованию технологии стабилизации геометрических показателей прецизионных подшипников являются весьма актуальными. Объектом исследований в данной работе являются кольца подшипникового узла ремennого натяжного устройства автомобиля (натяжных роликов) следующих типов: 2108-1006120-01, 2112-1006120-01. Контроль исследуемых параметров деталей проводился с применением следующего оборудования: дифрактометр MAP 3, координатно-измерительная машина FARO ARG EDGE. Как показывают исследования, стабилизация размеров деталей, а также значений отклонения от круглости (овальность) происходит на 15-й день после применения предлагаемого метода релаксации остаточных напряжений в прецизионных деталях типа колец подшипников, основанного на распространении ультразвуковой энергии через специальную жидкость (эффект кавитации).

Ключевые слова: подшипник, остаточные напряжения, релаксация, кавитация, овальность, параметры, автомобиль, контроль, среднее квадратичное отклонение, поле рассеяния, математическое ожидание, дисперсия, ультразвук.

M.G. Babenko, S.V. Slesarev

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russian Federation

**ON THE QUESTION OF RELAXATION OF RESIDUAL STRESSES
IN THIN-WALLED PARTS**

The article presents the results of studies of the mechanism of changing the dimensional accuracy of precision parts such as bearing rings, which arise due to the asymmetry of the plots of residual stresses relative to the main axes of the transverse and longitudinal sections of the rings that occur during relaxation. The production of precision rolling bearings of accuracy classes 6 and higher, which are widely used in various machines and aggregates, is particularly critical for the stabilization of geometric parameters. Even a slight change in size over a certain time interval leads to a sharp loss of accuracy of these bearings. The existing technology and known methods of stabilizing geometric parameters, such as heat treatment, low-temperature tempering, artificial aging, are ineffective, since their use in practice leads to high-energy costs, and the degree of refinement of geometric dimensions and shapes is insignificant. Therefore, work on improving the technology of stabilizing the geometric parameters of precision bearings is very relevant. The object of research in this work is the rings of the bearing assembly of the belt tensioner of the car (tensioning rollers) of the following types 2108-1006120-01, 2112-1006120-01. The control of the studied parameters of the parts was carried out using the following equipment, namely: the MAR 3 diffractometer, the FARO ARG EDGE coordinate measuring machine. Studies show that the stabilization of the dimensions of the parts, as well as the values of deviation from roundness (ovality), occurs on the 15th day after the application of the proposed method of relaxation of residual stresses in precision parts such as bearing rings based on the propagation of ultrasonic energy through a special liquid (cavitation effect).

Keywords: bearing, residual stresses, relaxation, cavitation, ovality, parameters, car, control, mean square deviation, scattering field, mathematical expectation, dispersion, ultrasound.

Важнейшей задачей прецизионного машиностроения, в частности подшипникоостроения, на современном этапе является разработка более эффективных технологических процессов изготовления деталей, обеспечивающих не только достижение высокой точности при минимуме затрат, но и сохранение первоначальных показателей точности в течение всего срока службы изделия [1].

Одним из основных факторов, приводящих к снижению первоначальной точности деталей, является релаксация остаточных напряжений [2–8]. Увеличение отклонений формы деталей, вызываемое релаксацией напряжений, неизбежно приводит к снижению надежности и уменьшению срока службы машин, снижению их эксплуатационных свойств [9–14]. В связи с этим осуществляется и развернутое изучение основных закономерностей процесса формирования остаточных напряжений и влияния на него параметров обработки [15–17].

В последние годы стали весьма актуальными вопросы изучения остаточных напряжений. В ряде отраслей машиностроения находят все более широкое применение конструкции, состоящие из маложестких деталей. Такие детали должны обладать достаточно высокой точностью формы, обеспечивающей возможность их сборки без создания дополнительных напряжений [18–23].

Исследование колец подшипников 2108-1006120-01 по остаточным напряжениям проводилось рентгеновским методом на дифрактометре MAP 3 [24]. Контроль величины овальности колец проводился на координатно-измерительной машине FARO ARG EDGE [25]. С целью определения эффективности данного вида обработки испытывали четыре партии колец по 30 штук в каждой, которые выбирались случайным образом из группы колец, прошедших предварительную обработку согласно технологическому процессу изготовления данной детали:

1-я партия колец являлась контрольной (над кольцами не производили никаких действий по снятию внутренних напряжений);

2-я партия подвергалась ультразвуковой обработке в жидкой среде;

3-я партия подвергалась виброобработке с поворотом детали на 25° – 30° и режимами $A = 10$ мкм, $t = 5$ мкм, $d = 35$ мкм;

4-я партия – обычному термическому отпуску (отпуск при температуре 150°C в печи в течение 3 ч, температура плавления полиамида ПА66 литьевого по ОСТ 6-06-369–74 составляет 252°C).

Для обработки результатов была использована программа Statistica. Обработка результатов

по каждой группе колец 2108-1006120-01 проводилась по принципу создания контрольных карт по полю рассеяния, математическому ожиданию, дисперсии и среднему квадратичному отклонению.

В процессе обработки полученных данных были построены гистограммы (рис. 1–4) распределения показателей отклонения овальности колец до заливки реборды из полиамида, сразу же после заливки реборды из полиамида, после первого дня и на 15-й день после заливки реборды. Анализ гистограмм позволяет сделать следующие выводы о влиянии ультразвуковой обработки на показатели овальности колец подшипников в выбранные интервалы времени (см. рис. 1).

Анализ контрольной группы колец подшипников (см. рис. 1) показал, что овальность колец подшипников, не обработанных ультразвуком, меняется с течением времени. Величина σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины – остается примерно на одном уровне и изменяется на 10–15 % (табл. 1). Анализируя кривую нормального распределения овальности колец подшипника контрольной группы по ω – величине рассеяния контрольной группы, можно говорить о том, что величина овальности колец подшипников, не обработанных ультразвуком, не будет обеспечивать заданные параметры в собранных подшипниках. Об этом можно судить по увеличению среднего квадратичного отклонения случайной величины и увеличению величины рассеяния контрольной группы на 15-й день измерения.

Графики нормального распределения величин овальности колец второй группы наблюдения (см. рис. 2) показывают резкое уменьшение величины среднего квадратичного отклонения, что, в свою очередь, приводит к уменьшению величины рассеяния. Величина рассеяния указывает на увеличение концентрации частот колец, имеющих одинаковые значения овальности (гистограмма распределения овальности после обработки ультразвуком в первый день).

Затем происходит увеличение значения среднего квадратичного отклонения (график становится пологим). Значение σ становится близким к значению среднего квадратичного отклонения (табл. 2), но полученного до заливки реборды (разница составляет 17 %). Исходя из этого, можно судить об уменьшении внутренних напряжений, так как величина овальности возвращается к значению, полученным до заливки реборды.

Графики нормального распределения овальности третьей группы показывают следующее (см. рис. 3).

Кривая нормального распределения после заливки реборды сместилась относительно кривой, полученной по значениям овальности до заливки реборды, также произошло уменьшение значений σ и ω , что говорит о концентрации значений

овальности в данном интервале. Смещение кривой говорит об изменении значений овальности колец в данной группе, а именно об увеличении значения овальности, что свидетельствует о наличии напряжений внутри колец.

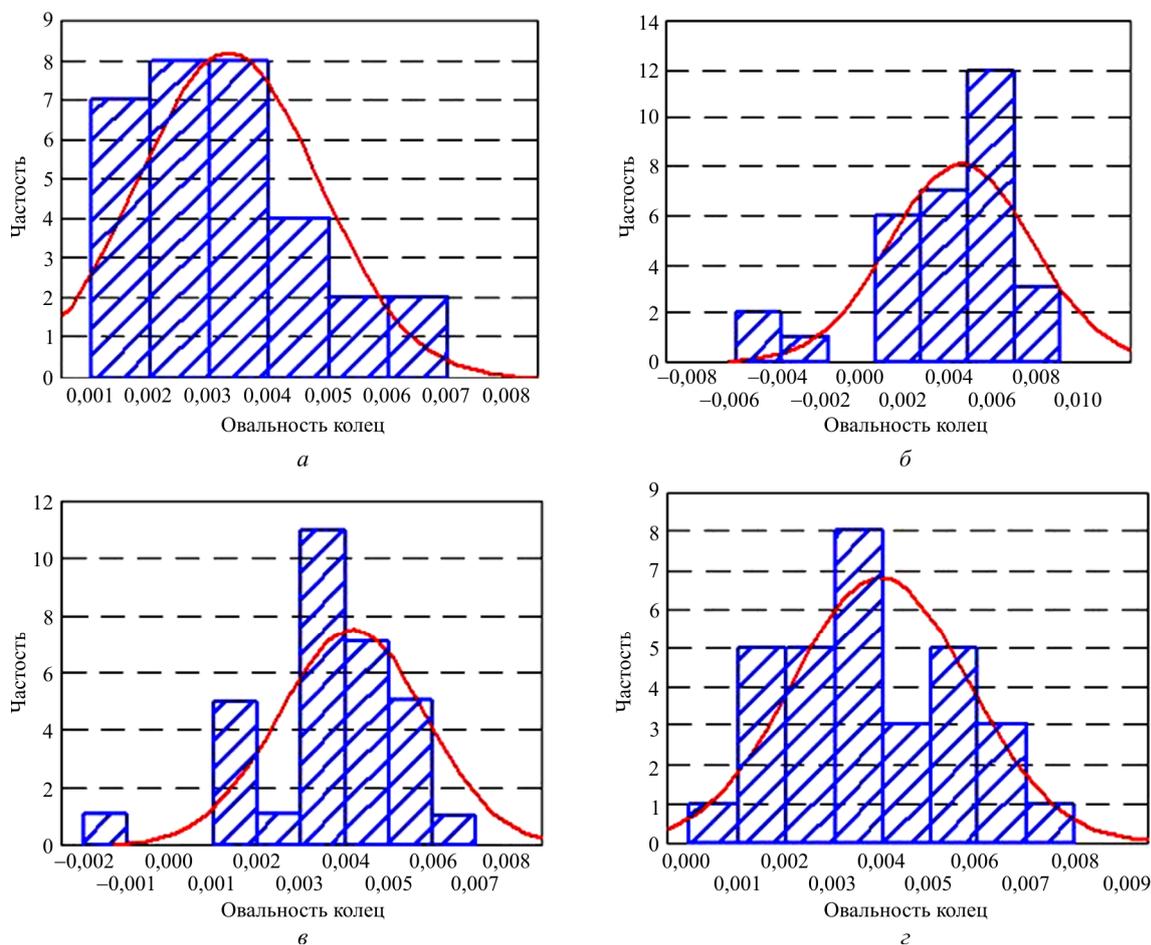


Рис. 1. Распределение показателей отклонения овальности колец подшипников без использования методик снятия остаточных напряжений: а – до заливки реборды; б – после заливки реборды; в – через 1 день после заливки реборды; г – на 15-й день после заливки реборды

Таблица 1

Анализ группы колец подшипников, не обработанных ультразвуком

Этап	Поле рассеяния ω , мкм	Математическое ожидание X , мкм	Дисперсия σ^2 , мкм ²	Среднее квадратичное отклонение σ , мкм
До заливки реборды	9,06	2,53	2,28	1,51
После заливки реборды	18,24	3,99	9,24	3,04
В 1-й день измерений	9,96	2,93	2,76	1,66
На 15-й день измерений	10,8	3,54	3,26	1,80

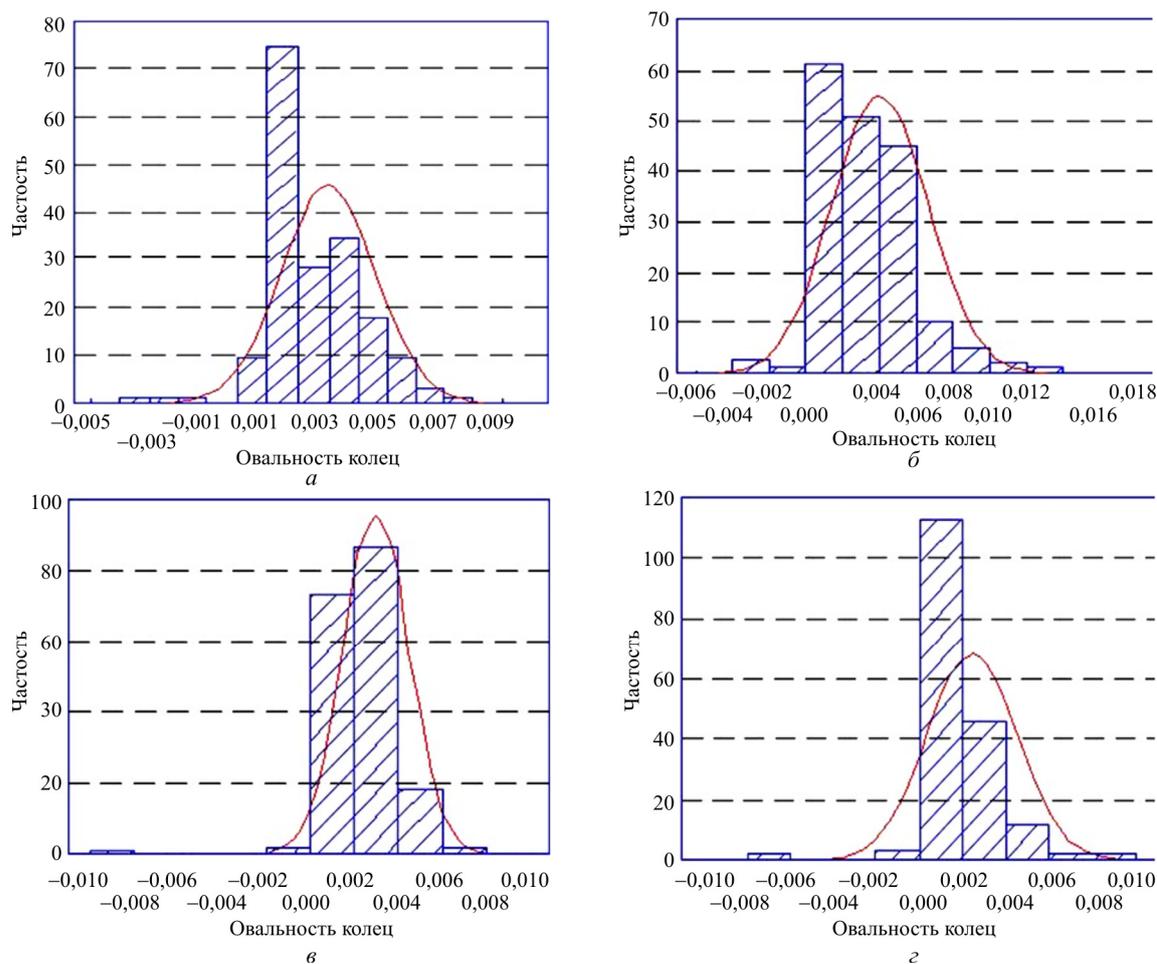


Рис. 2. Распределение показателей отклонения овальности колец подшипников, обработанных ультразвуковыми волнами через рабочую жидкость: *a* – до заливки реборды; *b* – после заливки реборды; *v* – через 1 день после заливки реборды; *z* – на 15-й день после заливки реборды

Таблица 2

Анализ группы колец подшипников, обработанных ультразвуком через рабочую жидкость

Этап	Поле рассеяния ω , мкм	Математическое ожидание X , мкм	Дисперсия σ^2 , мкм ²	Среднее квадратичное отклонение σ , мкм
До заливки реборды	7,08	3,03	1,4	1,18
После заливки реборды	26,76	3,9	19,9	4,46
В 1-й день измерений	9,66	3,13	2,6	1,61
На 15-й день измерений	7,56	3,58	1,6	1,26

График (см. рис. 3, *в*) овальности колец, обработанных ультразвуком, показывает, что изменение отклонения от круглости (овальность) продолжилось. Значение поля рассеяния также продолжило изменяться. Среднее квадратичное отклонение увеличилось на 20 %. При повторном измерении были получены следующие результаты.

Значение середины кривой нормального распределения вернулось в положение, которое наблюдалось у кривой до заливки реборды. Значение

σ увеличилось и приблизилось к значению σ до заливки реборды, отличие составляет 15 % (табл. 3). Поле рассеяния также приблизилось к величине ω , полученной до заливки реборды, что позволяет судить о стабилизации размеров деталей на 15-й день после ультразвуковой обработки и снижении остаточных напряжений.

Графики нормального распределения овальности четвертой группы (см. рис. 4) показывают следующее.

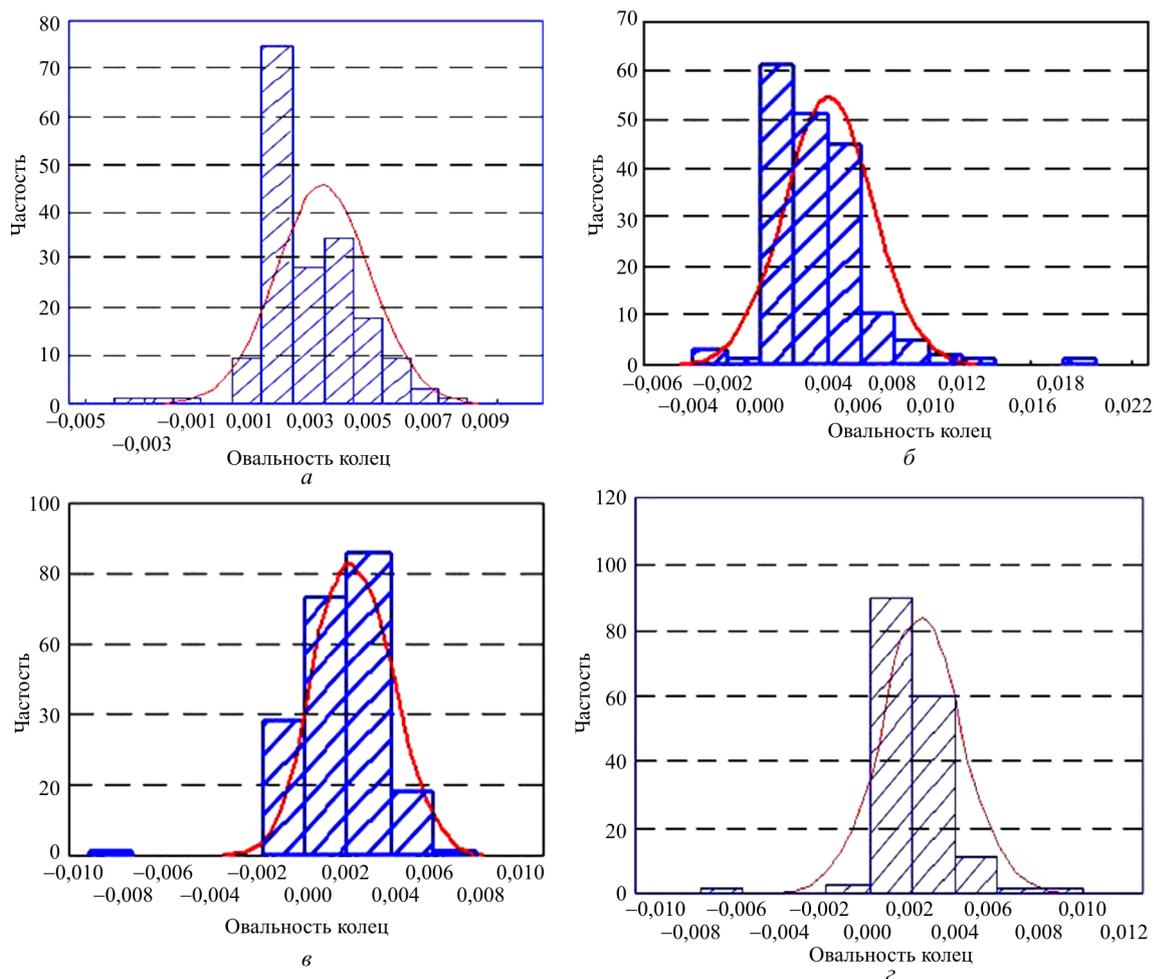


Рис. 3. Распределение показателей отклонения овальности колец подшипников, обработанных ультразвуковыми волнами при непосредственном контакте с деталью: а – до заливки реборды; б – после заливки реборды; в – через 1 день после заливки реборды; г – на 15-й день после заливки реборды

Таблица 3

Анализ группы колец подшипников, обработанных ультразвуковыми волнами при непосредственном контакте с деталью

Этап	Поле рассеяния ω , мкм	Математическое ожидание X , мкм	Дисперсия σ^2 , мкм ²	Среднее квадратичное отклонение σ , мкм
До заливки реборды	8,82	2,83	2,17	1,47
После заливки реборды	15,3	3,33	6,52	2,55
В 1-й день измерений	10,5	2,67	3,08	1,75
На 15-й день измерений	8,28	3	1,91	1,38

Кривая нормального распределения после заливки реборды сместилась относительно кривой, полученной по значениям овальности до заливки реборды, также произошло уменьшение значений σ и ω , что говорит о концентрации значений овальности в данном интервале. Смещение кривой говорит об изменении значений овальности колец в данной группе, а именно об увеличении значения овальности, что свидетельствует о наличии напряжений внутри колец.

График овальности колец, обработанных ультразвуком, показывает, что изменение отклонения от круглости (овальность) продолжилось. Значение поля рассеяния также продолжило изменяться. Среднее квадратичное отклонение увеличилось на 14 %. При повторном измерении были получены следующие результаты.

Значение середины кривой нормального распределения вернулось в положение, которое на-

блюдалось у кривой до заливки реборды. Значение σ увеличилось и приблизилось к значению σ до заливки реборды, отличие составляет 17 % (табл. 4). Поле рассеяния также приблизилось к величине ω , полученной до заливки реборды, что позволяет судить о стабилизации размеров деталей на 15-й день после ультразвуковой обработки и снижении остаточных напряжений.

Анализируя графики общего распределения овальности до и после ультразвуковой обработки, можно говорить о стабилизации отклонений от круглости (овальность) колец подшипника. После

заливки реборды из полиамида происходит резкое увеличение овальности деталей в партии, о чем свидетельствует снижение высоты кривой нормального распределения, т.е. увеличение σ – среднего квадратичного отклонения случайной величины, что говорит об увеличении поля рассеяния ω . Увеличение поля рассеяния свидетельствует о большом разбросе размеров и, следовательно, меньшей точности. При этом вершина кривой нормального распределения смещается относительно середины поля рассеяния, что свидетельствует об измерении математического ожидания (рис. 5).

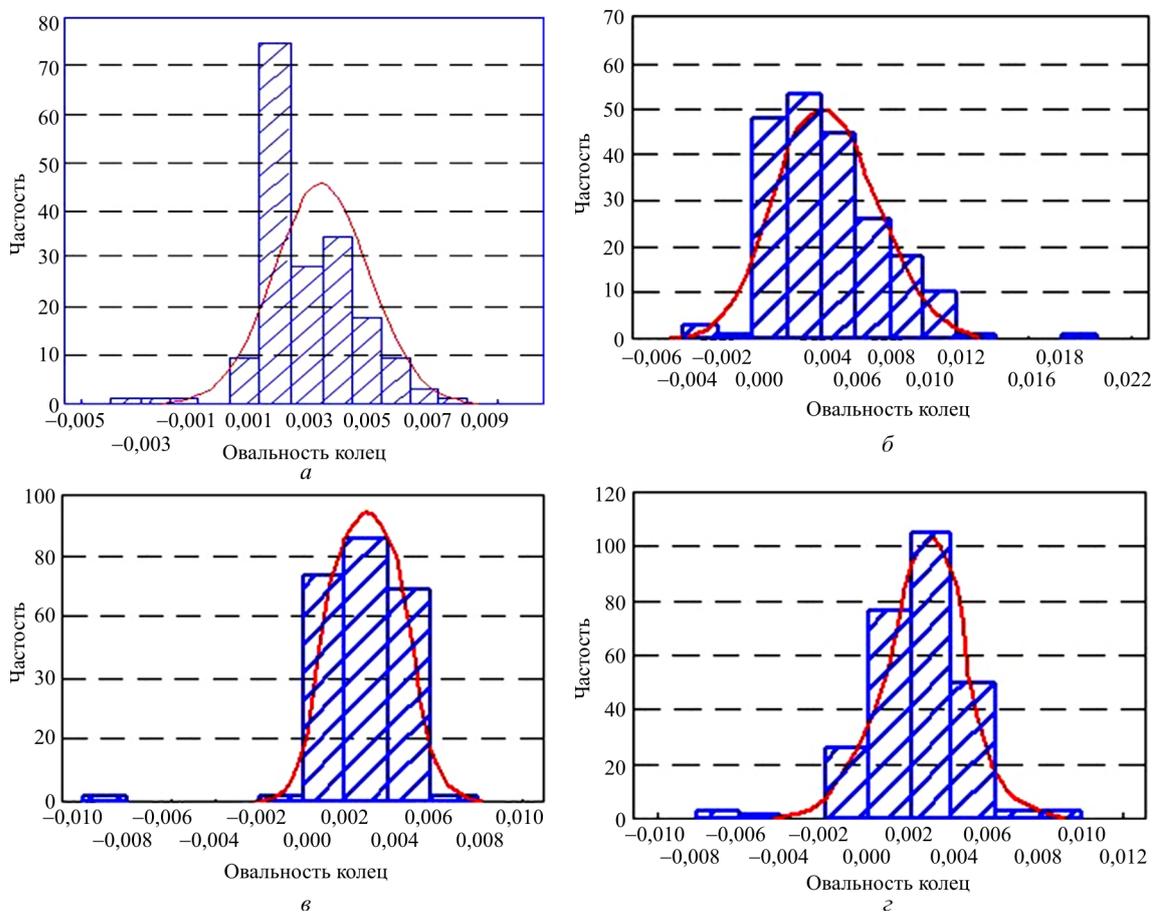


Рис. 4. Распределение показателей отклонения овальности колец подшипников с применением термического отпуска: а – до заливки реборды; б – после заливки реборды; в – через 1 день после заливки реборды; г – на 15-й день после заливки реборды

Таблица 4

Анализ группы колец подшипников, обработанных термическим отпуском

Этап	Поле рассеяния ω , мкм	Математическое ожидание X , мкм	Дисперсия σ^2 , мкм ²	Среднее квадратичное отклонение σ , мкм
До заливки реборды	9,06	3,1	2,3	1,51
После заливки реборды	15,18	3,8	6,4	2,53
В 1-й день измерений	6,54	2,97	1,19	1,09
На 15-й день измерений	9,48	2,5	2,5	1,58

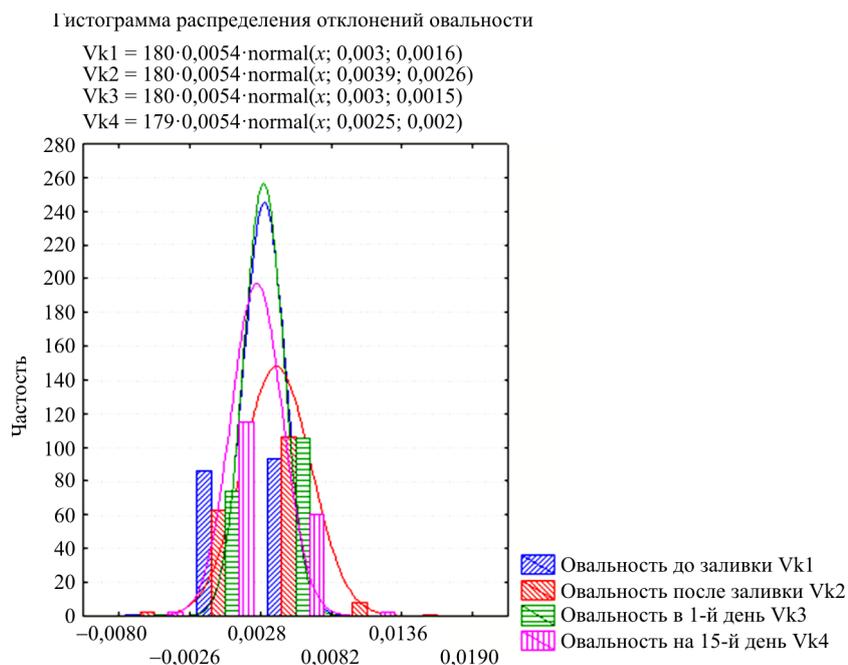


Рис. 5. Общее распределение овальности до и после ультразвуковой обработки

После ультразвуковой обработки колец наблюдения проводились через определенный интервал времени. Так, при первом измерении (1-й день) кривая закона нормального распределения вытянулась, т.е. произошло уменьшение величины σ – среднего квадратичного отклонения случайной величины. Поле рассеяния ω уменьшилось, точность колец с ребордой из полиамида после ультразвуковой обработки увеличилась, но нормального распределения, стала несимметричной, в результате чего можно говорить о влиянии различных причин систематического и случайного характера.

На 15-й день после ультразвуковой обработки проводилось повторное измерение выбранной партии колец подшипников. Кривая нормального распределения стала симметричной, но σ уменьшилась на 30 % по сравнению с предыдущим показанием. Дальнейшие измерения не показали изменений величины среднего квадратичного отклонения, что говорит о стабилизации величины овальности колец подшипников. Стабилизация показателей говорит об уменьшении остаточных напряжений, связанных с различными этапами обработки.

Список литературы

1. Слесарев С.В. Совершенствование технологии стабилизации остаточных напряжений в прецизионных деталях типа колец подшипников на основе применения ультразвуковой энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2006. – 16 с.

2. Филимонов Е.В., Слесарев С.В. Влияние основных технологических факторов обработки на точностные параметры колец и их механические характеристики // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 4, № 1. – С. 38.

3. Королев А.В., Бабенко М.Г., Слесарев С.В. Ультразвуковое снятие остаточных напряжений с использованием эффекта кавитации // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 4, № 1 (42). – С. 52–56.

4. Королев А.В., Мелентьев В.А. Исследование технологии бокового выдавливания при изготовлении колец // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 2, № 1 (24). – С. 41–45.

5. Управление качеством поверхности деталей машиностроения / Т.Г. Насад, А.Н. Васин, А.А. Казинский [и др.] // СТИН. – 2018. – № 7. – С. 30–32.

6. Болкунов В.В., Слесарев С.В. Релаксация остаточных напряжений в деталях машин энергией ультразвуковых колебаний сквозь жидкую среду // Наука, образование, производство: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Брянск, 23–25 сентября 2014 г. / под общ. ред. М.Г. Шалыгина. – Брянск, 2014. – С. 19–24.

7. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С.П. Буркин [и др.] // Достижения в теории и практике трубного производства / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2004. – С. 87–97.

8. Мочалов Н.А., Белов М.И., Мочалов С.Н. Определение величины овализации и уровня остаточных напряжений при бухтовом волочении труб // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2002. – № 1. – С. 24–27.

9. Бабенко М.Г., Слесарев С.В. Стабилизация геометрических характеристик деталей точного машиностроения // Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления

научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов: материалы II Междунар. молодеж. науч.-техн. конф., г. Курск, 17–18 июня 2016 г.: в 2 т. – Курск, 2016. – Т. 1. – С. 29–32.

10. Шур Д.М. Силовой метод определения остаточных напряжений // Заводская лаборатория. – 1959. – № 5. – С. 588–591

11. Дроздов В.М., Казанцев А.С. Оценка механических методов определения остаточных напряжений // Новые методы испытания и обработки материалов. – Минск: Наука и техника, 1975. – С. 23–29.

12. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и положения. – М.: Наука, 1982. – 112 с.

13. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Расчет релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрического изделия в условиях ползучести // Вестник Самарского государственного технического университета. Физ.-мат. науки. – 2001. – № 12. – С. 61–73.

14. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

15. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.

16. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. – 2002. – № 10. – С. 17–24.

17. Давиденков Н.Н. К вопросу о классификации и проявлении остаточных напряжений // Заводская лаборатория. – 1959. – № 3. – С. 318–319.

18. А.с. CCCPSU 1052550. Способ снятия остаточных напряжений в металлических деталях; МПКС21D1/30B23P25/00 / Полнов В.Г., Могильнер М.Н., Сагалевиц В.М. – № 3427966; заяв. 23.04.1982; опубл. 07.11.1983.

19. Пат. RU 2140842 С1. Способ вибростарения деталей / Королев А.В., Чистяков А.М., Кривега В.А., Моисеев В.Г. – № 97100284/02; заявл. 10.01.1997; опубл. 10.11.1999.

20. Пат. RU 2457100 С2. Способ релаксации остаточных напряжений / Королев А.В., Королев А.А., Королев А.А. – № 2010118995/02; заявл. 11.05.2010; опубл. 27.07.2012.

21. Королев Р.Д., Слесарев С.В. К вопросу определения поверхностных остаточных напряжений в материалах измерением твердости // Юность и знания – гарантия успеха: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Курск, 17–18 декабря 2014 г. / отв. ред. М.С. Разумов. – Курск, 2014. – С. 176–177.

22. Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С. Технология снятия остаточных напряжений при многоцикло-вой обкатке колец подшипников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 1 (67). – С. 22–26.

23. Технология стабилизации остаточных напряжений в упругих чувствительных элементах приборов давления на основе применения ультразвуковой энергии / Т.А. Балтаев, А.В. Королев, А.А. Королев [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

24. Буркин С.П., Шимов Г.В. Экспресс-анализ остаточных напряжений в трубах // Сталь. – 2012. – № 5. – С. 72–75.

25. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю., Захаров О.В. Комплекс математических моделей для контроля технически сложных поверхностей на мобильных координатно-измерительных машинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 3. – С. 48–60.

References

1. Slesarev S.V. Sovershenstvovanie tekhnologii stabilizatsii ostatochnykh napriazhenii v pretsizionnykh detaliakh tipa kolets podshpnikov na osnove primeneniia ul'trazvukovoi energii [Improving the Technology of Stabilizing Residual Stresses in Precision Parts such as Bearing Rings Based on the Application of Ultrasonic Energy]. PhD theses. Saratov, 2006, 16 p.

2. Filimonov E.V., Slesarev S.V. Vliianie osnovnykh tekhnologicheskikh faktorov obrabotki na tochnostnye parametry kolets i ikh mekhanicheskie kharakteristiki [The influence of the main technological factors of machining on the accuracy parameters of the rings and their mechanical characteristics]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 38.

3. Korolev A.V., Babenko M.G., Slesarev S.V. Ul'trazvukovoe sniatie ostatochnykh napriazhenii s ispol'zovaniem effekta kavitatsii [Ultrasonic removal of residual stresses using the cavitation effect]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 4, no. 1 (42), pp. 52–56.

4. Korolev A.V., Melent'ev V.A. Issledovanie tekhnologii bokovogo vydavlivaniia pri izgotovlenii kolets [Study of lateral extrusion technology in ring fabrication]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 2, no. 1 (24), pp. 41–45.

5. Nasad T.G., Vasin A.N., Kazinskii A.A. Upravlenie kachestvom poverkhnosti detalei mashinostroeniia [Managing the surface quality of machine parts]. *STIN*, 2018, no. 7, pp. 30–32.

6. Bolkunov V.V., Slesarev S.V. Relaksatsiia ostatochnykh napriazhenii v detaliakh mashin energiei ul'trazvukovykh kolebani skvoz' zhidkuiu sredu [Relaxation of residual stresses in machine parts by the energy of ultrasonic vibrations through a liquid medium]. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Ed. M.G. Shalygina. Briansk, 2014, pp. 19–24.

7. Burkin S.P. Analiz sposobov opredeleniia i ustraneniia os-tatochnykh napriazhenii v trubnykh zagotovkakh [Analysis of methods for determining and eliminating residual stresses in pipe billets]. *Dostizheniia v teorii i praktike trubnogo proizvodstva*. UGTU-UPI. Ekaterinburg, 2004, pp. 87–97.

8. Mochalov N.A., Belov M.I., Mochalov S.N. Opredelenie velichiny ovalizatsii i urovnia ostatochnykh napriazhenii pri bukhtovom volochenii trub [Determination of ovalization and residual stress levels in coiled tubing drawing]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgii*, 2002, no. 1, pp. 24–27.

9. Babenko M.G., Slesarev S.V. Stabilizatsiia geometricheskikh kharakteristik detalei tochnogo mashinostroeniia [Stabilization of geometric characteristics of precision engineering parts]. *Metalloobrabatyvaiushchie*

kompleksy i ro-bototekhnicheskie sistemy. Kursk, 2016, vol. 1, pp. 29–32.

10. Shur D.M. Silovoi metod opredeleniia osta-tochnykh napriazhenii [Power method for determining residual stresses]. *Zavodskaiia laboratoriia*, 1959, no. 5, pp. 588–591.

11. Drozdov V.M., Kazantsev A.S. Otsenka mekhani-cheskikh metodov opredeleniia ostatochnykh napriazhenii [Evaluation of mechanical methods for determining residual stresses]. *Novye metody ispytaniia i obrabotki materialov*, Minsk: Nauka i tekhnika, 1975, pp. 23–29.

12. Pozdeev A.A., Niashin Iu.I., Trusov P.V. Osta-tochnye napriazheniia: teoriia i polozheniia [Residual Stresses: Theory and Provisions]. Moscow: Nauka, 1982, 112 p.

13. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Raschet relaksatsii ostatochnykh napriazhenii v poverkhnostno uprochnennom sloe tsilindricheskogo izdeliia v usloviakh polzuchesti [Calculation of residual stress relaxation in the surface-hardened layer of a cylindrical article under creep conditions]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2001, no. 12, pp. 61–73.

14. Birger I.A. Ostatochnye napriazheniia [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p.

15. Kolmogorov V.L. Napriazheniia, deformatsii, razrushenie [Stresses, deformations, destruction]. Moscow: Metallurgiiia, 1970, 230 p.

16. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M. Poleznye i opasnye ostatochnye napriazheniia [Useful and dangerous residual stresses]. *Priroda*, 2002, no. 10, pp. 17–24.

17. Davidenkov N.N. K voprosu o klassifikatsii i proiavlenii ostatochnykh napriazhenii [On the classification and manifestation of residual stresses]. *Zavodskaiia laboratoriia*, 1959, no. 3, pp. 318–319.

18. Polnov V.G., Mogil'nsr M.N., Sagalevich V.M. Sposob sniatiia ostatochnykh napriazhenii v metallicheskiikh detaliakh [Method for relieving residual stresses in metal parts]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 3427966 (1983).

19. Korolev A.V., Chistiakov A.M., Krivega V.A., Moiseev V.G. Sposob vibrostareniia detalei [The way of vibration aging of parts]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 97100284/02 (1999).

20. Korolev A.V., Korolev A.A., Korolev A.A. Sposob relaksatsii ostatochnykh napriazhenii [Residual stress relaxation method] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2010118995/02. (2012).

21. Korolev R.D., Slesarev S.V. K voprosu opredeleniia poverkhnostnykh ostatochnykh napriazhenii v materialakh izmereniem tverdsti [On the Determination of Surface Residual Stresses in Materials by Hardness Measurement]. *Iunos' i znaniia – garantiia uspekha*, 2014. Ed. M.S. Razumov. Kursk, 2014, pp. 176–177.

22. Korolev A.V., Balaev A.F., Iakovishin A.S. Tekhnologiia sniatiia ostatochnykh napriazhenii pri

mnogotsiklovoi obkatke kolets podshipnikov [Residual stress relief technology for multicycle running of bearing rings]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2017, no. 1 (67), pp. 22–26.

23. Baltaev T.A., Korolev A.V., Korolev A.A. Tekhnologiia stabilizatsii ostatochnykh napriazhenii v uprugikh chuvstvitel'nykh elementakh priborov davleniia na osnove primeneniia ul'trazvukovoi energii [Technology for Stabilization of Residual Stresses in Elastic Sensitive Elements of Pressure Devices Based on the Application of Ultrasonic Energy]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*, 2015, no. 12, pp. 39–41.

24. Burkin S.P., Shimov G.V. Ekspres-analiz ostatochnykh napriazhenii v trubakh [Express analysis of residual stresses in pipes]. *Stal'*, 2012, no. 5, pp. 72–75.

25. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Iu., Zakharov O.V. Kompleks matematicheskikh modelei dlia kontroliia tekhnicheskii slozhnykh poverkhnostei na mobil'nykh koordinatno-izmeritel'nykh mashinakh [A set of mathematical models for the control of technically complex surfaces on mobile coordinate measuring machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 3, pp. 48–60.

Получено 21.01.2021

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Бабенко Марина Геннадьевна (Саратов, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и систем управления Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: babenkomg@mail.ru.

Слесарев Сергей Валентинович (Саратов, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и систем управления Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, e-mail: ser-slesarev@yandex.ru.

About the authors

Marina G. Babenko (Saratov, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Control Systems, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, e-mail: babenkomg@mail.ru.

Sergey V. Slesarev (Saratov, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology and Control Systems, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, e-mail: ser-slesarev@yandex.ru.