

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦАХ ПОДШИПНИКОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

© 2020 В.А. Дмитриев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 12.05.2020

Изложены методика и результаты расчета остаточных напряжений в тонких поверхностных слоях колец подшипников с произвольным поперечным сечением после финишной абразивной и различных методов поверхностной упрочняющей обработки дорожек качения. Результаты расчета проверены путем моделирования процесса образования остаточных напряжений, обусловленных температурными деформациями при круглом врезном шлифовании колец.

Ключевые слова: кольца подшипников, режимы обработки, шлифование, упрочнение, деформации, остаточные напряжения, моделирование МКЭ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-31-36

ВВЕДЕНИЕ

При точении, шлифовании, дробеструйной обработке в поверхностном слое дорожки качения кольца подшипника возникают пластические деформации, которые после разгрузки приводят к образованию остаточных напряжений. Учитывая существенное влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства, их определение имеет большое практическое значение. В основополагающей работе [1] изложена методика и приведены расчетные формулы для определения первоначальных остаточных напряжений в тонкостенных трубах методом колец и полосок с учетом дополнительных напряжений от вырезки кольца, разрезки по радиусу и снятию слоев.

Используя изложенный метод, в работе [2] приведены расчетные формулы для определения остаточных напряжений в кольцах подшипников с симметричным поперечным сечением (рис. 1). Показано, что при исследовании остаточных напряжений в тонких поверхностных слоях ($a/h \leq 1/40$) колец малой кривизны ($h/R < 1/3...1/5$), к которым относится большинство колец подшипников, спогрешностью, не превышающей трех процентов, можно воспользоваться общей формулой:

$$\sigma_{\theta}(a) - \mu\sigma_s(a) = \pm \frac{2E}{D^2} \left[Y_0(a)\delta_p - \frac{I_x}{S_x} \frac{d\delta(a)}{da} \right], \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала кольца; δ_p – увеличение среднего диаметра кольца после разрезки по радиусу и соответствующее растягивающим остаточным напряжениям; D – сред-

ний диаметр кольца; $Y_0(a)$ – координата центра тяжести слоя da ; I_x – момент инерции поперечного сечения кольца; S_x – статический момент линии контура поперечного сечения кольца, с которого удаляется слой a . Знаки плюс или минус принимаются при определении остаточных напряжений соответственно на наружной или внутренней поверхности кольца.

Однако кольца конических, радиально-упорных и многих других типов подшипников не удовлетворяют условию симметрии поперечного сечения относительно срединной плоскости. При удалении остаточных напряжений характер деформаций таких колец существенно отличается от деформаций колец с симметричным поперечным сечением: кроме изменений диаметра дополнительно имеют место угловые деформации диаметральных сечений разрезанного кольца, которые проявляются во

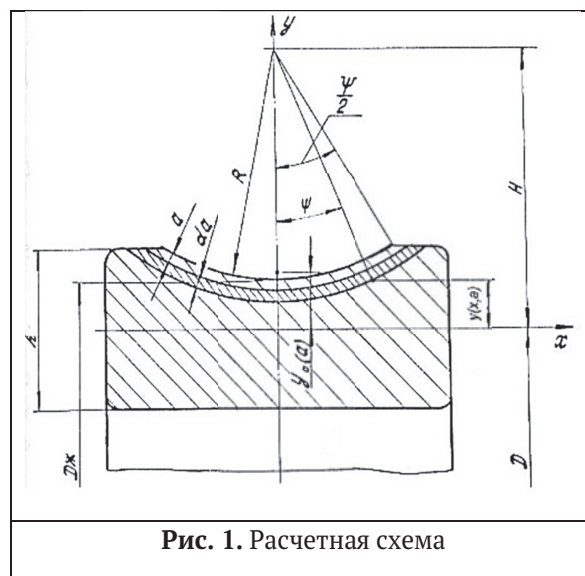


Рис. 1. Расчетная схема

Дмитриев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов.
E-mail: tmsi@samgtu.ru

взаимном повороте сечений друг относительно друга. Применение образцов-свидетелей простой геометрической формы (например, цилиндрических колец) не гарантирует достоверности результатов, так как физическое состояние поверхностного слоя образцов-свидетелей не может быть идентичным состоянию поверхности реального кольца вследствие различия условий обработки цилиндрической поверхности образцов и дорожек качения колец подшипников. Получим расчетные зависимости для определения остаточных напряжений в кольцах с произвольным поперечным сечением.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задачу будем решать в предположении, что остаточные напряжения, образовавшиеся в тонком поверхностном слое толщиной a_n (рис. 2), являются осесимметричными и вдоль рассматриваемого участка АВ контура поперечного сечения кольца распределены равномерно, т.е. $\sigma_\theta = \sigma_\theta(\xi), \sigma_S = \sigma_S(\xi), \tau_{S\theta} = 0$. В общем случае $\sigma_\theta \neq \sigma_S$. Через U и V обозначены главные оси поперечного сечения кольца, которые расположены под углом α относительно основных координатных осей X и Y. В результате разрезки кольцо претерпевает некоторые деформации, сопровождающиеся перераспределением остаточных напряжений.

Положим, что на некотором участке АВ контура поперечного сечения удаляется слой СД малой толщины a ($a < a_n$), как показано на рис. 2. Удаление слоя СД приведет к взаимным перемещениям сечений Е и F. Вследствие осевой симметрии распределения остаточных напряжений указанные перемещения составят изменение диаметра кольца δ и взаимный поворот диаметральных поперечных сечений в своей плоскости на угол ψ . Эти перемещения, обозначенные в общем виде через Δ , найдем, используя интеграл Мора:

$$\Delta = \int_0^\pi (\Delta\chi_U \dot{M}_V + \Delta\chi_V \dot{M}_U + \varepsilon \dot{N}) R d\varphi, \quad (2)$$

где $\Delta\chi_U, \Delta\chi_V, \varepsilon$ – приращения кривизн и относительное удлинение разрезанного кольца от

остаточных напряжений; $\dot{N}, \dot{M}_U, \dot{M}_V$ – усилия и моменты относительно главных центральных осей U и V от единичных нагрузок, соответствующих искомым перемещениям (рис. 3 а, б).

Учитывая малость толщины слоя a , на основе работы [3] имеем следующие выражения для приращений кривизны и относительного удлинения разрезанного кольца:

$$\begin{aligned} \Delta\chi_U &= \frac{1}{EI_V} \int_0^S \int_0^a U(\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi ds \approx \frac{S_V}{EI_V} \int_0^a (\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi, \\ \Delta\chi_V &= -\frac{1}{EI_U} \int_0^S \int_0^a V(\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi ds \approx -\frac{S_U}{EI_U} \int_0^a (\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi, \\ \varepsilon &= \frac{1}{EF} \int_0^S \int_0^a (\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi ds \approx \frac{S}{EF} \int_0^a (\sigma_\theta - \mu\sigma_S) d\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где F, I_V, I_U – площадь и моменты инерции поперечного сечения относительно главных осей U, V; S – длина участка АВ контура поперечного сечения кольца; S_U, S_V – статические моменты линии АВ относительно осей U и V.

Используя зависимости

$$\dot{M}_U = \dot{M}_X \cos\alpha + \dot{M}_Y \sin\alpha, \quad (4)$$

$$\dot{M}_V = -\dot{M}_X \sin\alpha + \dot{M}_Y \cos\alpha$$

и единичное нагружение (см. рис.3 а, б), получим выражение для изменения диаметра δ :

$$\begin{aligned} \delta &= \int_0^\pi [\Delta\chi_U (-R \cos\alpha \sin\varphi) + \Delta\chi_V (-R \sin\alpha \sin\varphi) + \varepsilon \sin\varphi] R d\varphi = \\ &= -2[R^2(\Delta\chi_U \cos\alpha + \Delta\chi_V \sin\alpha) - R\varepsilon]. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогично, используя единичное нагружение, показанное на рис.3 б, найдем выражение для ψ :

$$\begin{aligned} \psi &= \int_0^\pi (\Delta\chi_U \sin\alpha \sin\varphi - \Delta\chi_V \cos\alpha \sin\varphi) R d\varphi = \\ &= 2R(\Delta\chi_U \sin\alpha - \Delta\chi_V \cos\alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

В работе [4] с помощью МКЭ определены дополнительные остаточные напряжения в кольцах с произвольной формой сечения после их разрезки и приведена расчетная формула:

$$\sigma_p \approx \frac{E \delta_T U_c}{2\pi R^2 \cos\alpha}, \quad (7)$$

где δ_T и U_c – соответственно расхождение тор-



Рис. 2. Расчетная схема для определения остаточных напряжений в кольце с произвольным поперечным сечением

цов разрезанного кольца и расстояние от центра дорожки качения (точки С) до главной оси V.

Подставив в (5) и (6) выражения для $\Delta\chi_U, \Delta\chi_V, \varepsilon$ из (3) и дифференцируя по a , получим следующие формулы для определения остаточных напряжений в тонком поверхностном слое дорожки качения кольца подшипника с произвольным поперечным сечением с учетом перераспределения остаточных напряжений в результате резки:

$$\sigma_\theta(a) - \mu\sigma_S(a) \approx -\frac{E\delta_T U_c}{2\pi R^2 \cos\alpha} - \frac{2E \frac{d\delta}{da}}{D \left[D \left(\frac{SV}{IV} \cos\alpha - \frac{SU}{IU} \sin\alpha \right) - \frac{2S}{F} \right]}, \quad (8)$$

$$\sigma_\theta(a) - \mu\sigma_S(a) \approx -\frac{E\delta_T U_c}{2\pi R^2 \cos\alpha} - \frac{2E \frac{d\psi}{da}}{D \left(\frac{SV}{IV} \sin\alpha + \frac{SU}{IU} \cos\alpha \right)}, \quad (9)$$

где $D=2R$ – средний диаметр кольца.

Из изложенного следует, что остаточные напряжения в кольцах с произвольным поперечным сечением можно определять по любой из полученных формул. Окончательный выбор выражения зависит от того, какая из величин, δ или ψ , может быть измерена в процессе удаления поверхностных слоев с наибольшей точностью. Если поверхностные слои удалять с кольца по схеме, показанной на рис. 4, то угол ψ будет равен взаимному повороту торцов разрезанного кольца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используя изложенную методику, получим расчетную зависимость для определения остаточных напряжений во внутреннем кольце роликового конического подшипника 7517A.02 после предварительного шлифования дорожки качения. На рис. 5 приведен технологический эскиз кольца и геометрические характеристики сечения, полученные по 3D-модели кольца. На кругло шлифовальной операции кольцо устанавливается на две жесткие опоры, левым торцом притягивается к электромагнитному патрону, и выполняется предварительное шлифование дорожки качения В, выдерживая размер 2 и угол α . В табл.1 приведены геометрические характеристики сечения кольца.

Подставив в выражение (8) найденные геометрические характеристики сечения, получим:

$$\sigma_\theta(a) - \mu\sigma_S(a) \approx -\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \cdot (-3,38)}{2 \cdot 3,14 \cdot 47,45^2 \cos 10,41} - \frac{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \frac{d\delta}{da}}{94,9 \left[94,9 \left(\frac{111,67}{2890,39} \cos 10,41^\circ - \frac{-83,69}{33200,89} \sin 10,41^\circ \right) - \frac{2 \cdot 24,76}{305,98} \right]} = 4,83 - 1223,94 \frac{d\delta}{da}.$$

На рис. 6 представлены эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном



Рис. 3. Единичные нагружения кольца

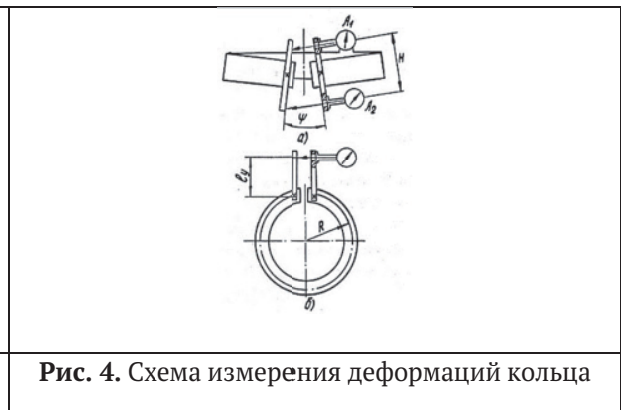


Рис. 4. Схема измерения деформаций кольца

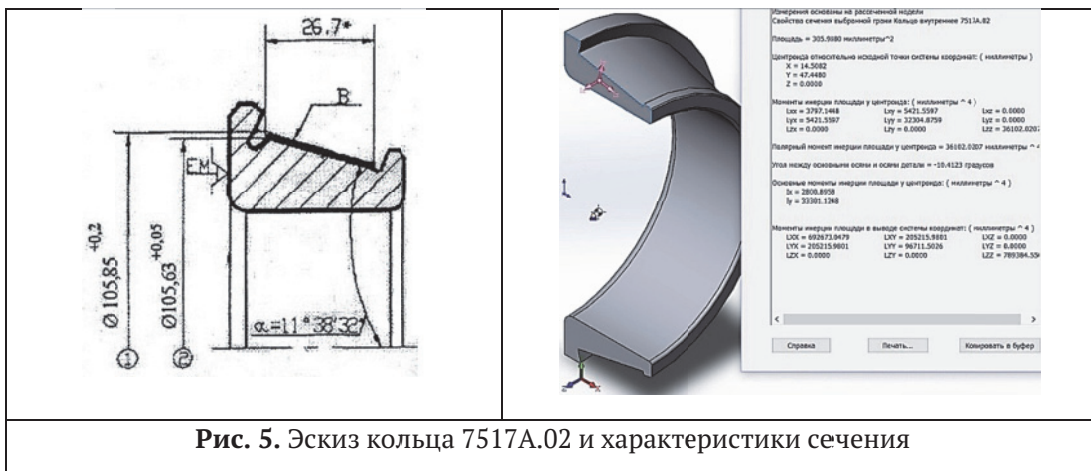


Рис. 5. Эскиз кольца 7517A.02 и характеристики сечения

Таблица 1. Геометрические характеристики сечения кольца 7517A.02

D, мм	F, мм ²	S, мм	α, град	I _v , мм ⁴	I _ш , мм ⁴	S _v , мм ²	S _ш , мм ²	U _A , мм	V _A , мм
94,90	305,98	24,76	10,41	2800,9	33301,14	111,67	83,69	-3,38	4,51

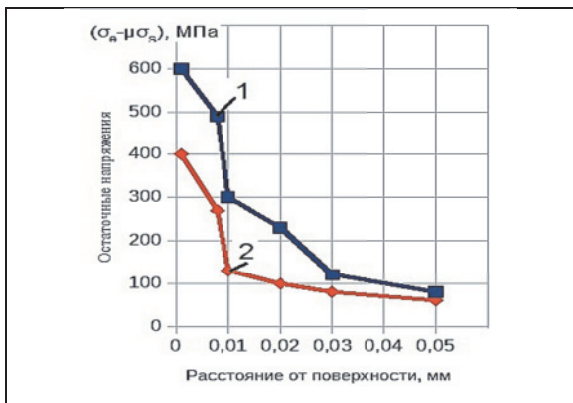


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений по дорожке качения внутренних колец подшипника 7517A.02 после черного -1 и чистового -2 шлифования

слое дорожки качения внутреннего кольца роликового подшипника 7517A.02 из стали ШХ-15 твердостью HRC 61...64 после операций предварительного и окончательного шлифования, полученные по выражению (8) на основе экспериментальных измерений деформаций колец после их разрезки и последующего травления поверхности дорожки качения [1, 2].

Теоретически рассчитать остаточные напряжения с учетом истории изготовления детали во многих случаях затруднительно из-за сложности физических и технологических процессов. Поэтому для оценки точности и качества предложенных расчетов выполнено компьютерное моделирование МКЭ процесса шлифования путем последовательного приложения к дорожке

качения конвекции и теплового потока, определенного через режимы шлифования [5, 6].

Вначале решалась плоская задача нестационарной теплопроводности с подвижным источником тепла в зоне резания. Получено распределение неравномерного температурного поля по сечению кольца подшипника. На основе предложенной модели решена задача распределения эквивалентных напряжений и деформаций по сечению кольца вследствие его периодического и неравномерного нагрева. На рис. 7 представлены результаты расчета нагрева кольца поле снятия припуска 0,16 мм на 20 с шлифования, а на рис. 8 показана картина распределения напряжений в зоне шлифования в тот же момент времени.

На втором этапе после снятия тепловой нагрузки последовательно решались плоские нелинейные деформационные задачи для каждого шага нестационарного теплового анализа с учетом зависимости физических свойств материала кольца от температуры и билинейной диаграммы деформирования, что позволило определить остаточные деформации и напряжения, возникшие в кольце подшипника. На рис. 9 показано распределение остаточных напряжений по глубине после удаления припуска 0,16 мм и последующего остывания кольца до 20° С. Наблюдается качественная корреляция распределения остаточных напряжений, полученных экспериментально по предложенным выражениям (8-9) (см. рис. 6) и теоретически на основе моделирования МКЭ.

На рис. 10 представлена увеличенная в 20 раз деформированная модель кольца под-

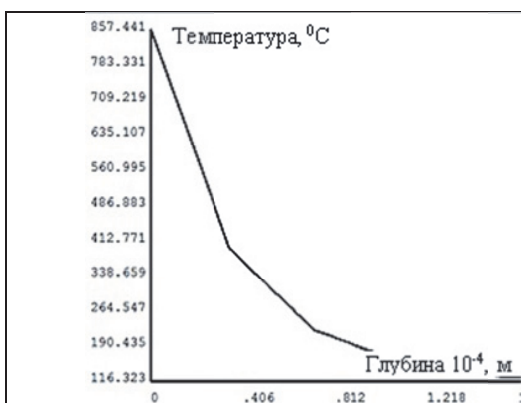


Рис. 7. Распределение температуры в зоне шлифования на 20 с

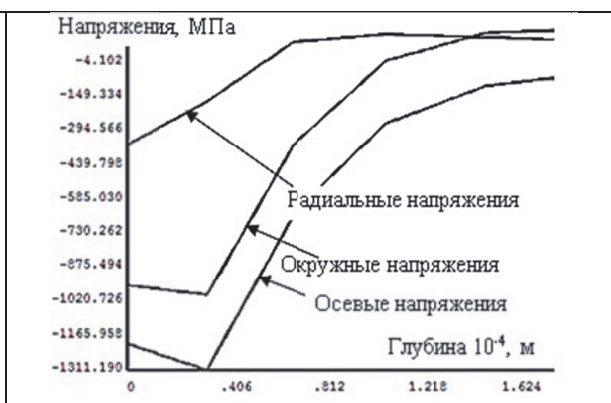


Рис. 8. Распределение напряжений в зоне шлифования на 20 с



Рис. 9. Распределение остаточных напряжений по глубине после удаления припуска 0,16 мм

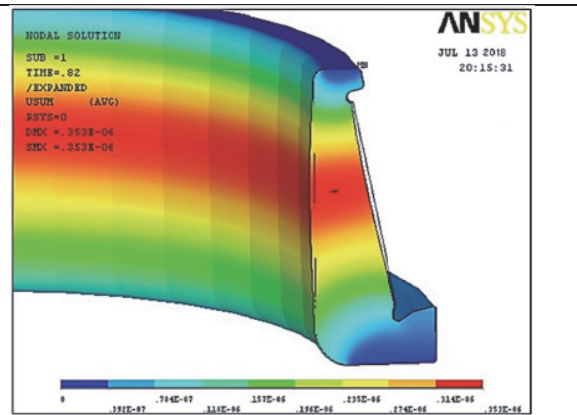


Рис. 10. Искажение формы кольца после шлифования дорожки качения - корсетность

шипника 7517A2.02 (пунктиром показано недеформированное сечение кольца) после черного шлифования. Деформации кольца обусловлены действием сил и изгибающих моментов, выраженных через интегральные величины технологических остаточных напряжений $p_{\theta s} = \int_0^a (\sigma_{\theta} - \mu \sigma_s) d\xi$ и $p_s = \int_0^a \sigma_s d\xi$ [3]. Анализ суммарных деформаций показывает, что наиболее деформированным участком модели является дорожка качения кольца. Максимальная деформация (прогиб) дорожки качения составляет приблизительно 16 мкм. При шлифовании под действием растягивающих остаточных напряжений кольцо приобрело корсетность. Такие погрешности формы колец являются недопустимыми, что отражено в технических требованиях на их изготовление.

В табл. 2 приведены значения параметров микрогеометрии колец и интегральные величины технологических остаточных напряжений после различных методов обработки поверхности дорожки качения кольца подшипника

32205-02 [7]. Интенсификация процесса упрочнения, сопровождающаяся увеличением интегральной величины остаточных напряжений (площади эпюры), приводит к возрастанию искажений формы колец.

Анализ технических требований на изготовление колец позволил определить основные параметры качества поверхности и точности обработки, которые необходимо обеспечить при применении упрочняющей технологии: $R_a \leq 0,32$ мкм; погрешность формы вдоль образующей: корсетность не допускается, бочкообразность по операционной технологической карте - не более $\Delta \leq 5$ мкм. Однако часто режимы упрочнения выбирают без учета указанных деформаций по исходной твердости материала с целью получения минимальной шероховатости или максимального наклепа обрабатываемой поверхности. В то же время стендовые испытания (табл. 3) показали, что зависимость долговечности подшипников от деформаций колец имеет оптимум, по которому следует опреде-

Таблица 2. Параметры микрогеометрии и интегральные величины технологических остаточных напряжений в кольцах после различных методов обработки

Способ обработки	Параметры микропрофиля, мкм				Интегральные величины остаточных напряжений	
	R_{max}	R_z	R_a	Искажение формы сечения Δ , мкм	$\int_0^a (\sigma_{\theta} - \mu \sigma_s) d\xi$, МПа·м	$\int_0^a \sigma_s d\xi$, МПа·м
Шлифование	4,3	3,4	0,6	5,5...8	0,022	0,031
Суперфиниш	0,8	0,62	0,08	≤ 1	-0,005	-0,0068
Обработка микрошариками при $p = 0,4$ МПа	3,0	2,8	0,3	2,5...4	-0,048	-0,068
Обкатывание шаром при $p_{cp} = 2900$ МПа	0,85	0,7	0,1	6,5...7	-0,07	-0,19

Таблица 3. Результаты стендовых испытаний подшипников 6-32205Д1

Способ обработки дорожки качения колец	Расчетные значения деформации колец		Долговечность подшипников, % к расчетной	
	ΔD	Δ	L_{90}	L_{50}
Суперфиниш	-	$\leq 1,0$	319	421
Суперфиниш + обработка микрошариками при $p = 0,4$ МПа	3...3,5	2,5...3,0	413	917
Суперфиниш + обкатывание шаром при $p_{cp} = 2900$ МПа	4,0...4,5	5,5...6,0	338	499

лять допускаемые деформации. Таким образом, допускаемые интегральные величины технологических остаточных напряжений и режимы упрочнения следует увязывать с допускаемыми искажениями формы колец.

ВЫВОДЫ

Разработаны расчетные формулы для определения остаточных напряжений в кольцах с произвольным поперечным сечением, которые находят применение при исследовании технологических остаточных напряжений и деформаций колец подшипников, дорожки качения которых подвергаются различным методам обработки.

Наблюдается качественная корреляция эпюр распределения остаточных напряжений, полученных экспериментально по предложенным выражениям и теоретически на основе моделирования МКЭ.

Характер и величины погрешностей формы колец подшипников после различных методов обработки определяются величиной и знаком интегральных значений остаточных напряжений.

Допускаемые интегральные величины технологических остаточных напряжений и режимы упрочнения следует увязывать с допускаемыми искажениями формы колец, полученными по результатам стендовых испытаний подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. - М.: МАШГИЗ, 1963. - 332 с.
2. Букатый С.А., Дмитриев В.А. Определение остаточных напряжений в кольцах подшипников качения после механической обработки // В кн.: Прогрессивные технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин и инструментов: Межвуз. сб., Куйбышев: КнТИ., 1980, с. 99-103.
3. Букатый С.А. Исследование деформаций деталей, возникающих после обработки поверхности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Куйбышев: КуАИ, 1979. - 18 с.
4. Фокин В.Г., Дмитриев В.А. Определение методом конечных элементов дополнительных остаточных напряжений при разрезке деталей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки, 2009. - № 1 (18). - С. 95-100.
5. Li Y.Y., Chen Y. Моделирование процесса шлифования. // Современное машиностроение. Серия Б. - 1989. - № 8. - С. 36-44.
6. Фокин В. Г., Дмитриев В. А. Определении остаточных напряжений методом конечных элементов в кольце роликового подшипника при шлифовании дорожки качения. // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. - 2015. - № 2(46). -С. 166-171.
7. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. в 2-х томах. Т. 2. / Под общ. ред. А.Г. Суслова. - Машиностроение, 2014. - 444 с.

DEFINITION OF RESIDUAL STRESSES IN RINGS OF BEARINGS WITH AN ARBITRARY CROSS-SECTION

© 2020 V.A. Dmitriev

Samara State Technical University

The methodology and results of calculating the residual stresses in thin surface layers of bearing rings with an arbitrary cross section after finishing abrasive and various methods of surface hardening of raceways are described. The calculation results were verified by modeling the process of formation of residual stresses caused by thermal deformations during circular mortise grinding of rings.

Keywords: bearing rings, machining modes, grinding, hardening, deformations, residual stresses, FEM modeling

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-31-36

Vladimir Dmitriev, Candidate of Technics, Associate Professor of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: tmsi@samgtu.ru