

Технология и технологические машины

УДК 621.923

DOI 10.18698/0536-1044-2017-1-63-70

Управление осевыми упругими деформациями нежестких колец подшипников при плоском шлифовании торцов

В.А. Носенко, В.Н. Тышкевич, А.В. Саразов, С.В. Орлов

Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а

The Control of Axial Elastic Deformations of Non-Rigid Bearing Rings when Flat Grinding End Surfaces

V.A. Nosenko, V.N. Tyshkevich, A.V. Sarazov, S.V. Orlov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University, 404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a



e-mail: nosenko@volpi.ru, tubem@mail.ru, mechanic@volpi.ru



Предложены алгоритм и методика определения оптимальных условий шлифования торцовой поверхности нежестких колец подшипников, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности Ra , отсутствие шлифовочных прижогов, допуск плоскостности торцовой поверхности) при максимальной производительности процесса. Математические модели составляющих силы резания, коэффициента шлифования и шероховатости обработанной поверхности (параметр Ra) получены методом полного факторного эксперимента типа 2^4 , где 4 — число факторов. Входные факторы (твердость шлифовального круга, глубина шлифования, скорость подачи стола и наработка) являются параметрами оптимизации процесса шлифования. Математические модели выходных факторов предназначены для ограничения области допустимых значений параметров оптимизации. В качестве целевой функции выбрана производительность обработки. Оптимизация параметров в области допустимых значений осуществлена исходя из достижения максимальной производительности процесса. Определены условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцовой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: осевые упругие деформации, кольцо подшипника, шлифование торцовых поверхностей, качество обработанной поверхности, оптимизация процесса.



The authors propose the algorithm and method of determining optimal conditions for grinding end surfaces of non-rigid bearing rings that guarantees obtaining predefined quality requirements to the machined surface (surface roughness parameter Ra , absence of

grinding burns, required flatness tolerance of end surface) while ensuring the maximum efficiency of the process. Mathematical models of the cutting force components, grinding ratio, and roughness of the machined surface (Ra parameter) are obtained by the method of full factorial experiment of the 2^4 type where 4 is the number of factors. The input factors (grinding wheel hardness, depth of grinding, table feed speed and run) are considered as the optimization parameters of the grinding process. Mathematical models of the output factors are used to limit the range of allowable values of the optimization parameters. The resulting efficiency is chosen as an objective function. The optimization of parameters in the range of allowable values is carried out with the view of ensuring maximum efficiency of the process. The conditions of providing the required flatness tolerance of the bearing ring end surface are determined. These conditions take into account axial deformation of the ring under the magnetic field of the machine and the radial component of the grinding force.

Keywords: axial elastic deformations, bearing ring, grinding of end surfaces, quality of machined surface, process optimization.

При механической обработке нежестких деталей необходимо учитывать упругие деформации, возникающие от усилий закрепления и резания. Отклонения формы деталей вследствие упругих деформаций под действием силы закрепления на столе станка и силы резания во многих случаях значительно превышают погрешности, вызванные биением шпинделей, неточностью установки и другими факторами. Опыт изготовления нежестких колец подшипников показывает, что современную технологию шлифовальной обработки невозможно разрабатывать без учета жесткости деталей и упругой деформации в процессе обработки [1].

Осевые упругие деформации при обработке торцов нежестких колец подшипников обусловлены начальным отклонением торцевой поверхности от плоскостности, образовавшимся после термообработки и на предыдущих операциях механической обработки. При закреплении таких колец на столе плоскошлифовального станка магнитным полем и под действием силы резания заготовка деформируется. После прекращения действия силы резания и раскрепления заготовки вследствие осевой упругой деформации возвращаются определенные отклонения от плоскостности торцевой поверхности кольца. Технологические способы устранения возникающих погрешностей формы значительно увеличивают время обработки и стоимость операции [1–3].

Цель работы — разработка алгоритма и методики выбора оптимальных условий плоского шлифования торцевых поверхностей нежестких колец подшипников, обеспечивающих получение заданного допуска плоскостности торцевых поверхностей и других обязательных

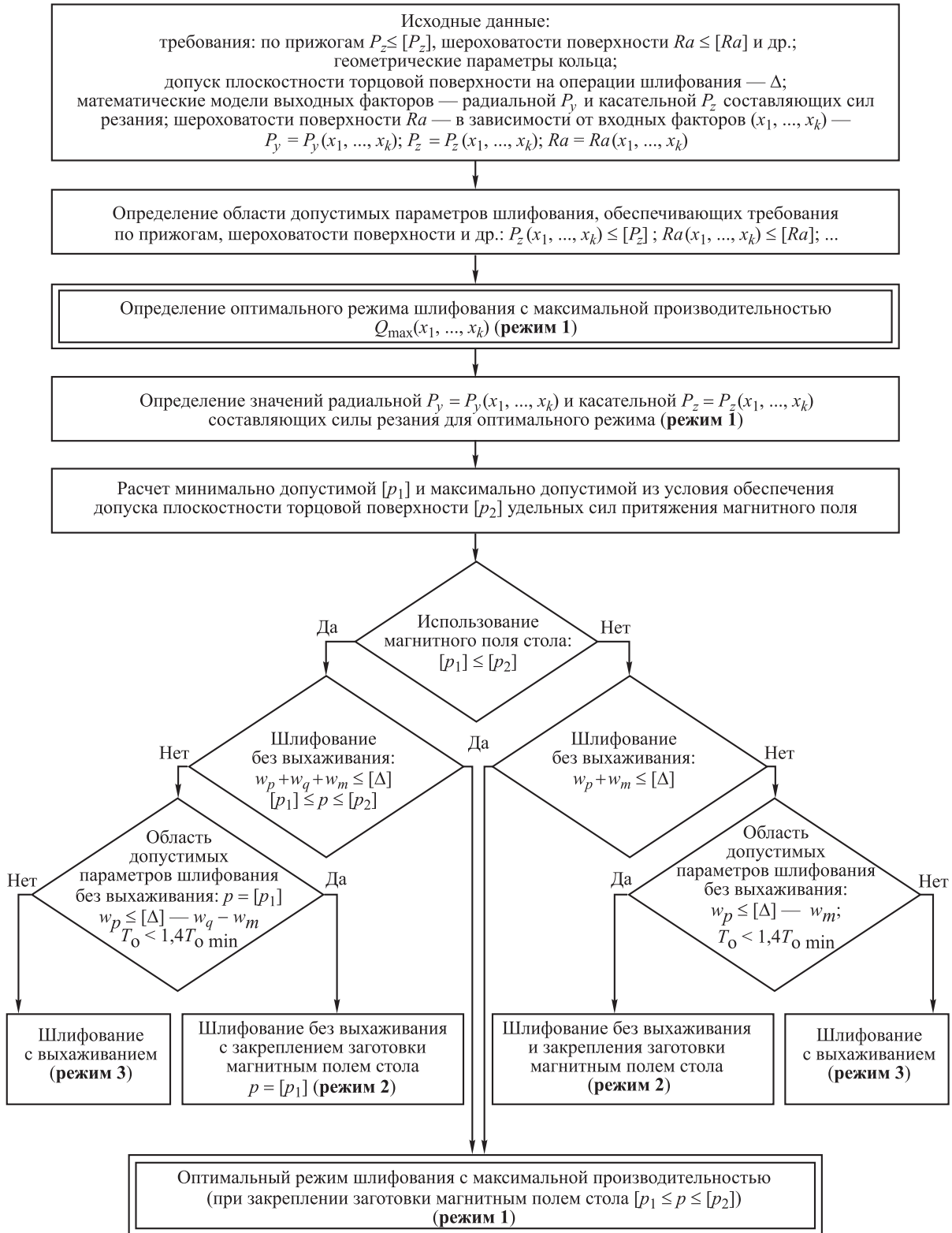
требований к качеству обработанной поверхности.

Методика исследования, математические модели. Осевая деформация заготовки непосредственно в процессе шлифования происходит под действием радиальной составляющей силы резания. Из других показателей качества в рассматриваемом примере выбраны шероховатость обработанной поверхности (параметр Ra) и отсутствие шлифовочных прижогов. Основной причиной их образования является температура шлифования, зависящая от касательной составляющей силы резания, поэтому для оптимизации процесса шлифования необходимы математические модели составляющих силы резания и шероховатости обработанной поверхности.

В рассмотренном примере использованы математические модели [4–7], полученные при шлифовании подшипниковой стали марки ШХ15. Входными параметрами моделей являются данные характеристики абразивного инструмента (зернистость шлифовального порошка из электрокорунда белого и твердость круга на керамической связке 6-й структуры), режимные факторы (скорость подачи стола, глубина шлифования) и наработка (объем удаляемого металла).

Предлагаемые алгоритм (см. рисунок) и методика выбора оптимальных режимов шлифования торцевой поверхности нежестких колец подшипников предполагают выделение двух этапов оптимизации процесса.

На первом этапе при выборе оптимальных условий шлифования (режим 1) заготовку кольца рассматривают как абсолютно жесткую и оптимизацию параметров осуществляют из условия выполнения требований к таким пара-



Алгоритм оптимизации режимов шлифования торцов нежестких колец подшипников с управлением осевой упругой деформацией

метрам, как шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др.

Используя математические модели радиальной P_y и касательной P_z составляющих силы

резания, шероховатости поверхности Ra и др. ($P_y = P_y(x_1, \dots, x_k)$; $P_z = P_z(x_1, \dots, x_k)$; $Ra = Ra(x_1, \dots, x_k)$; ...), определяют области допустимых значений параметров характеристики

абразивного инструмента и режимов x_1, \dots, x_k , обеспечивающих выполнение требований к качеству торцевой поверхности.

Дальнейшую оптимизацию параметров в области допустимых значений проводят по критерию максимальной производительности процесса $Q_{\max}(x_1, \dots, x_k)$. Эти оптимальные параметры определяют первый режим шлифования (режим 1).

По оптимальным параметрам режима 1 находят оптимальные значения радиальной и касательной составляющих силы резания. Пример оптимизации для некоторых показателей качества дан в работах [4–7].

Математические модели приведенных к ширине образца составляющих силы резания p_y и p_z , коэффициента шлифования $K_{\text{ш}}$ и шероховатости обработанной поверхности Ra получены методом полного факторного эксперимента типа 2^k , где k — число факторов. С учетом производственного опыта были выбраны следующие диапазоны варьирования входных факторов: F — зернистость шлифовального круга (ГОСТ Р 52381–2005) — от $F60$ до $F46$; $c_1(x_1)$ — твердость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведенной скорости распространения акустических волн (ГОСТ Р 52710–2007), — от 4 504 (K) до 4 930 м/с (L); $t(x_2)$ — глубина шлифования — от 0,01 до 0,02 мм/ход; $v_s(x_3)$ — скорость подачи стола — от 10 до 20 м/мин; $V(x_4)$ — наработка, приведенная к ширине обрабатываемой поверхности — от 100 до 400 мм². Указанные в скобках параметры x_1, x_2, x_3, x_4 являются условными

обозначениями кодированных значений фактора. Как показал анализ полученных результатов, наибольшее влияние на дисперсию оказывает зернистость шлифовального порошка. Поэтому математические модели разрабатывали для каждой зернистости в отдельности при $k = 4$ (см. таблицу), что обеспечило однородность дисперсий составляющих силы резания.

В результате специально проведенных исследований установлено, что шлифовочные прижоги образуются при $p_z > 6$ Н/мм [4–7].

Для колец из стали ШХ15 определена область значений входных факторов, обеспечивающих допустимые значения $[Ra] \leq 2,5$ мкм и $[p_z] \leq 6$ Н/мм. С использованием целевой функции получены оптимальные режимы шлифования, позволяющие получить наибольшую приведенную режущую способность (производительность) $Q_{\max} = 260$ мм²/мин: $t_{\text{opt}} = 0,02$ мм/ход; $v_{s \text{ opt}} = 13$ м/мин. Приведенные значения составляющих силы резания на данных режимах шлифования: $p_y = 16$ Н/мм, $p_z = 6$ Н/мм, для круга, находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости K (измеряемой скоростью звука $c = 4 500$ м/с) [4–7].

Второй этап оптимизации режимов шлифования заготовки кольца заключается в обеспечении допуска плоскостности торцевой поверхности, где необходимо учитывать осевые упругие деформации при закреплении и шлифовании заготовки.

Как показывает практика, получение требуемой шероховатости торцевой поверхности кольца подшипника возможно без использова-

Математические модели параметров процесса шлифования стали ШХ15

Параметр	Модель
$p_y(F46)$, Н/мм	$p_y = 19,9 + 5,45x_1 + 3,43x_2 + 0,99x_3 + 3,67x_4 + 1,02x_1x_2 - 2,40x_1x_3 + 2,6x_1x_4 + 0,69x_2x_3 - 1,42x_3x_4 - 1,49x_1x_3x_4$
$p_y(F60)$, Н/мм	$p_y = 31,42 + 0,91x_1 - 3,21x_2 - 1,02x_4 + 1,78x_1x_2 - 3,44x_2x_3 + 0,77x_3x_4 + 1,93x_1x_2x_3x_4 + 2,06x_1x_2x_3 - 3,078x_1x_2x_4 - 0,73x_1x_3x_4$
$p_z(F46)$, Н/мм	$p_z = 6,21 + 0,82x_1 + 0,9x_2 + 0,82x_3 + 0,49x_4 - 0,54x_1x_3 + 0,23x_1x_4$
$p_z(F60)$, Н/мм	$p_z = 9,18 + 1,86x_1 + 0,67x_3 - 0,27x_4 + 0,32x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,37x_3x_4 + 0,37x_1x_2x_3x_4 + 0,72x_1x_2x_3 - 0,35x_1x_2x_4$
$K_{\text{ш}}(F46)$	$K_{\text{ш}} = 44,77 - 5,06x_2 - 13,51x_3 + 6,15x_1x_3$
$K_{\text{ш}}(F60)$	$K_{\text{ш}} = 22,75 - 1,97x_1 - 5,83x_2 - 1,68x_3 - 2,61x_1x_2 + 1,71x_1x_3 - 4,77x_2x_3$
$Ra(F46)$, мкм	$Ra = 1,81 - 0,22x_1 + 0,46x_3 - 0,22x_1x_3$
$Ra(F60)$, мкм	$Ra = 1,92 + 0,27x_1 + 0,2x_2 + 0,29x_1x_2 + 0,3x_1x_3 + 0,26x_1x_2x_3$
Примечание. В скобках указана зернистость шлифовального круга.	

ния выхаживания. Выхаживание применяют для обеспечения допуска плоскостности. Основное время обработки с выхаживанием увеличивается в среднем на 40 % [8, 9].

Условие обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца без выхаживания при закреплении заготовки кольца магнитным полем стола определяется неравенством

$$w_p + w_q + w_m \leq [\Delta], \quad (1)$$

где w_p, w_q, w_m — максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе и кручении под действием соответственно силы резания, силы притяжения магнитного поля стола станка и массы кольца; $[\Delta]$ — допустимая осевая упругая деформация кольца.

Значение $[\Delta]$ с учетом коэффициента запаса точности λ вычисляют по формуле

$$[\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_r,$$

где Δ — допуск плоскостности торцевой поверхности на операции шлифования; Δ_r — допуск плоскостности при шлифовании жесткой заготовки, определяемый из справочной литературы, например из работы [9].

Варьируемыми параметрами при управлении значением максимальной осевой упругой деформации являются сила резания и притяжение магнитного поля стола станка. Для обеспечения оптимального режима шлифования с максимальной производительностью при закреплении заготовки магнитным полем стола условие (1) дополняется неравенством

$$[p_1] \leq p \leq [p_2],$$

где $[p_1]$ — минимально допустимая удельная сила притяжения из условий отсутствия сдвига, проворота, опрокидывания заготовки кольца, определяемая из справочной литературы, например из [10]; p — удельная сила притяжения магнитного поля стола станка; $[p_2]$ — максимально допустимая удельная сила притяжения магнитного поля стола станка, определяемая из условия обеспечения заданного допуска плоскостности (1).

Алгоритмы и методика определения максимальных осевых упругих деформаций для не жестких колец с начальными отклонениями от плоскостности торцевых поверхностей приведены в работах [2–4]. Степенная аппроксимация коэффициентов податливости кольца позволяет получить выражение для вычисления макси-

мально допустимой удельной силы притяжения магнитного поля стола станка из условия обеспечения заданного допуска плоскостности (1):

$$[p_2] = \left[0,75\Delta - \Delta_r - y_i - \frac{r^3}{EI_z I_y} P_y \times \right. \\ \left. \times \left(1,6404 I_{yc} i^{-2,58} + 0,41277 \frac{EI_z I_y}{GI_k} i^{-3,002} \right) \right] \times \\ \times \frac{1}{\frac{r^4 b}{EI_z I_y} \left(6,6939 I_{yc} i^{-4,258} + 5,7763 \frac{EI_z I_y}{GI_k} i^{-6,147} \right) - \frac{mg}{2\pi r b}},$$

где y_i — уровень, соответствующий i -му количеству опорных контактов (y_3 принимаем равным нулю); i — число опорных контактов базовой торцевой поверхности кольца с поверхностью стола станка; r — радиус центральной оси кольца, проходящей через центр тяжести поперечного сечения; E, G — модули нормальной упругости и сдвига материала кольца; I_z, I_y — главные центральные моменты инерции поперечного сечения кольца; I_{yc} — осевой момент инерции поперечного сечения кольца относительно центральной вертикальной оси; I_k — момент инерции поперечного сечения кольца при кручении; m — масса кольца; g — ускорение свободного падения; $b = (D - D_1)/2$ — ширина базового торца кольца (D и D_1 — наружный и внутренний диаметр кольца).

Значение силы $[p_2]$ выбирается как наибольшее из ряда при $i = 3, 4, 5, 6$.

Возможность использования магнитного поля стола станка для закрепления заготовки кольца реализуется при выполнении неравенства

$$[p_1] \leq [p_2]. \quad (2)$$

Шлифование без выхаживания с закреплением заготовки магнитным полем стола при $p = [p_1]$ становится возможным в результате уменьшения силы P_y путем соответствующего снижения режимных факторов в ранее определенной области, а также поиском в этой же области допустимых значений параметров процесса, при которых выполняются следующие условия:

$$w_p \leq [\Delta] - w_m - w_q; T_0 < 1,4T_{0\min}, \quad (3)$$

где T_0 — основное время шлифования; $T_{0\min}$ — основное время шлифования без выхаживания

при максимальной производительности обработки, параметры реализации которой были определены ранее (режим 1).

При существовании в области допустимых значений параметров процесса, удовлетворяющих условиям (3), дальнейшую оптимизацию проводят по критерию максимальной производительности.

При невыполнении условий (3) реализуется режим 3 — шлифование с выхаживанием. Параметры процесса шлифования соответствуют режиму 1, но его время возрастает в среднем на 40 %.

При невыполнении условия (2) шлифование первого торца кольца проводят без закрепления магнитным полем стола, заготовку фиксируют упорами.

Условие обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца без выхаживания и закрепления заготовки кольца магнитным полем стола определяется неравенством

$$w_p + w_m \leq [\Delta]. \quad (4)$$

При выполнении условия (4) шлифование первого торца проводят с параметрами режима 1.

Реализация режима 2 без закрепления магнитным полем стола возможна при соблюдении условий

$$w_p + w_m \leq [\Delta]; T_o < 1,4T_{o \min}. \quad (5)$$

Если условия (5) не выполняются, то шлифование первого торца кольца проводят без закрепления магнитным полем стола с выхаживанием (режим 3).

На разработанный способ устранения изогнутости торцов колец шлифованием получен патент [11].

Выводы

1. Разработанные алгоритм, методика и математические модели позволяют определять оптимальные условия плоского шлифования периферией круга на станке с круглым магнитным столом нежестких колец подшипников с начальными отклонениями торцевых поверхностей от плоскостности.

2. Оптимальные условия обеспечивают получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса плоского шлифования.

3. Требуемый допуск плоскостности торцевой поверхности кольца обеспечивается управлением значением осевой упругой деформации кольца.

Литература

- [1] Коротков Б.И., Коротков С.Б., Тышкевич В.Н., Орлов С.В. *Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец*. Волгоград, ВолгГТУ, 2007. 133 с.
- [2] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Светличная В.Б. Определение осевых перемещений при шлифовании торцов подшипниковых колец. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2010, № 2, с. 70–74.
- [3] Копецкий А.А., Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В. Влияние упругих деформаций на погрешность формы при закреплении и обработке колец подшипников. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2012, № 2–3, с. 103–107.
- [4] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В. Плоское шлифование торцов колец крупногабаритных подшипников с требуемым качеством поверхности. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Машиностроение*, 2014, т. 14, № 4, с. 67–78.
- [5] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Саразов А.В. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников. *Вестник машиностроения*, 2015, № 4, с. 60–66.
- [6] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В. Обеспечение требуемого качества торцевых поверхностей колец подшипников шлифованием. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2015, № 3, с. 31–35.
- [7] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Саразов А.В., Орлов С.В. Обеспечение допуска плоскостности при шлифовании торцов нежестких колец подшипников. *Механика XXI века*, 2016, № 15, с. 173–179.

- [8] Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Стратегия плоского шлифования деталей переменной жесткости. *Металлообработка*, 2006, № 1, с. 2–7.
- [9] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г. ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение-1, 2001. 914 с.
- [10] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2. Москва, Машиностроение-1, 2003. 944 с.
- [11] Орлов С.В., Тышкевич В.Н., Коротков Б.И., Носенко В.А. *Способ устранения изогнутости торцов деталей класса колец шлифованием*. Пат. 2370354 РФ, МПК В 24 В7/04, 2009, бюл. № 29. 3 с.

References

- [1] Korotkov B.I., Korotkov S.B., Tyshkevich V.N., Orlov S.V. *Issledovanie protsessov shlifovaniia vnutrennykh i naruzhnykh konusov detalei klassa kolets* [Research of processes of grinding the inner and outer parts of the cones class rings]. Volgograd, VolgSTU publ., 2007. 133 p.
- [2] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Svetlichnaya V.B. The determination of axial displacements during bearing end face grinding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, vol. 39, no. 2, pp. 157–160.
- [3] Kopetskii A.A., Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V. Vliianie uprugikh deformatsii na pogreshnost' formy pri zakreplenii i obrabotke kolets podshipnikov [Influence of elastic deformations on error of form at fixing and treatment of rings of bearings]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Technics and technology]. 2012, no. 2–3, pp. 103–107.
- [4] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Sarazov A.V. Ploskoe shlifovanie tortsov kolets krupnogabaritnykh podshipnikov s trebuемым kachestvom poverkhnosti [Flat grinding of big bearing races end with the demanded quality of a surface]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the SUSU. Series «Mechanical engineering industry»]. 2014, vol. 14, no. 4, pp. 67–78.
- [5] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Sarazov A.V. Optimal'nye usloviia shlifovaniia tortseyvykh poverkhnostei kolets krupnogabaritnykh podshipnikov [Determination of optimal grinding conditions of end surfaces of races of big bearings]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 4, pp. 60–66.
- [6] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V. Obespechenie trebuемого kachestva tortsovykh poverkhnostei kolets podshipnikov shlifovaniem [Providing the required quality of end surfaces bearing rings grinding]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making]. 2015, no. 3, pp. 31–35.
- [7] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. Obespechenie dopuska ploskostnosti pri shlifovanii tortsov nezhestkikh kolets podshipnikov [Providing flatness tolerance for grinding the ends of non-rigid bearing rings]. *Mekhaniki 21 veku* [Mechanical engineers to 21 century]. 2016, no. 15, pp. 173–179.
- [8] Soler Ia.I., Kazimirov D.Iu. Strategiiia ploskogo shlifovaniia detalei peremennoi zhestkosti [The strategy of the flat grinding to details of a variable rigidity]. *Metalloobrabotka* [Metalworking]. 2006, no. 1, pp. 2–7.
- [9] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ia* [Reference technologist-mechanical engineer]. V 2 vol. Vol. 1. Ed. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K., Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2001. 914 p.
- [10] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ia* [Reference technologist-mechanical engineer]. V 2 vol. Vol. 2. Ed. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K., Suslov A.G. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2003. 944 p.
- [11] Orlov S.V., Tyshkevich V.N., Korotkov B.I., Nosenko V.A. *Sposob ustraneniia izognutosti tortsov detalei klassa kolets shlifovaniem* [The solution to the bent ends of parts class rings grinding]. Patent RF no. 2370354 RF, 2009, 3 p.

Информация об авторах

НОСЕНКО Владимир Андреевич (Волжский) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: nosenko@volpi.ru).

ТЫШКЕВИЧ Владимир Николаевич (Волжский) — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Механика». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: tubem@mail.ru).

САРАЗОВ Александр Васильевич (Волжский) — старший преподаватель кафедры «Механика». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: mechanic@volpi.ru).

ОРЛОВ Сергей Васильевич (Волжский) — зав. лабораторией кафедры «Механика». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а, e-mail: mechanic@volpi.ru).

Information about the authors

NOSENKO Vladimir Andreevich (Volzhsky) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: nosenko@volpi.ru).

TYSHKEVICH Vladimir Nikolaevich (Volzhsky) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: tubem@mail.ru).

SARAZOV Aleksandr Vasilievich (Volzhsky) — Senior Lecturer, Department of Mechanics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: mechanic@volpi.ru).

ORLOV Sergey Vasilievich (Volzhsky) — Head of Laboratory, Department of Mechanics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: mechanic@volpi.ru).