

УДК 621.921

Влияние осевых деформаций на отклонение от плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника при шлифовании

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

ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», 404121, Волжский, Волгоградская обл., Российская Федерация, Энгельса ул., д. 42а

The Influence of Axial Deformations on the Flatness Deviation of the Bearing Race End Surface During Grinding

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

Volgogradsky State Technical University, 404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a



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



Кольца подшипников после термообработки приобретают отклонение от плоскостности и изогнутость торцевых поверхностей под действием остаточных температурных напряжений. При изогнутой торцевой поверхности существенно усложняется процесс шлифования, поскольку под действием магнитного поля стола станка кольца получают дополнительную деформацию. Исследовано плоское шлифование периферией круга образцов из стали ШХ15. Представлены алгоритмы и математические модели для определения осевой деформации при шлифовании колец крупногабаритных подшипников с начальными отклонениями от плоскостности торцов. Анализ формы торцевой поверхности нежестких колец выполнен на примере наружных колец конического однорядного роликоподшипника из стали ШХ15. Для вычисления максимальных осевых упругих деформаций при изгибе кольца использована теория стержней малой кривизны. Максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе найдена методом Мора. Статическая неопределимость кольца раскрыта методом сил. Определены условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: кольцо подшипника, осевая деформация, отклонение от плоскостности, шлифование.



Upon heat treatment, flatness deviation and curvature appear in the bearing race end surfaces due to the effect of the residual temperature stresses. The curvature of the end surfaces considerably complicates the grinding process because the race is additionally bent due to the magnetic field of the machine-tool table. Sample workpieces of the ShKh15 steel are submitted to flat grinding with the periphery of a straight wheel. Algorithms and mathematical models for the determination of the axial deformation when grinding large bearing races with initial flatness deviations of the end faces are presented. Outer races of a conical single-row ShKh15 steel roller bearing are used as an example to analyze the end surface shape of non-rigid races. The theory of small curvature bars is applied to determine the maximal axial elastic deformations when the race is bent. The maximal axial elastic deformation of the race is determined using the method of More. The statistical uncertainty of the race is

expanded through the method of forces. The conditions providing the required flatness tolerance of the end surface are determined for the bearing race. These conditions take into account the axial deformation of the race under the effect of the machine-tool magnetic field and the radial component of the grinding force.

Keywords: bearing race, axial deformation, flatness deviation, grinding.

Кольца подшипников после термообработки приобретают отклонение от плоскостности и изогнутость торцовых поверхностей под действием остаточных температурных напряжений. При термообработке в штампах изогнутость может быть систематической, кратной числу упоров, либо неопределенной при закалке и отпуске с вращением кольца в свободном состоянии или с укладкой на один из торцов. После термообработки для обеспечения заданных геометрических параметров торцовые поверхности подвергают шлифованию. Наличие изогнутости торцовой поверхности существенно усложняет процесс шлифования, поскольку под действием магнитного поля стола станка кольца получают дополнительную деформацию. Отшлифованные кольца сохраняют заданную форму торцовой поверхности под действием магнитного поля, после прекращения которого отклонение от плоскостности возвращается.

Для устранения изогнутости торцовых поверхностей используют различные технологические приемы: снимают небольшие припуски, многократно переворачивая кольцо; уменьшают напряженность магнитного поля, снижают режимы и повторяют первую операцию; шлифуют без закрепления магнитным полем, обкладывая кольцо упорами, и пр. [1]. Реализация перечисленных способов существенно увеличивает время обработки и стоимость операции.

Цель данных исследований заключалась в разработке нового способа шлифования торцов нежестких колец, в частности колец подшипников, с учетом осевых упругих деформаций, который обеспечил бы высокую производи-

тельность при заданном допуске плоскостности обработанной поверхности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: исследована неплоскостность торцовых поверхностей заготовок нежестких колец перед операцией шлифования; разработана математическая модель осевых деформаций кольца под действием магнитного поля стола станка и радиальной составляющей силы шлифования; определены условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцовой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания. Исследовано плоское шлифование периферией круга.

Анализ формы торцовой поверхности нежестких колец проведен на примере наружных колец конического однорядного роликоподшипника из стали ШХ15 (рис. 1, а) с размерами, представленными в таблице. Здесь D , D_1 , C — соответственно наружный, внутренний диаметры и ширина кольца; β — угол конусности; $r = D_0/2$ — соответственно радиус и диаметр центральной оси кольца, проходящей через центр тяжести поперечного сечения; I_{z_c} , I_{y_c} и I_z , I_y — осевые моменты инерции относительно центральных осей z_c , y_c поперечного сечения кольца и главные центральные моменты инерции (рис. 1, б); α_1 , α_2 — коэффициенты для оценки применимости теории стержней малой кривизны.

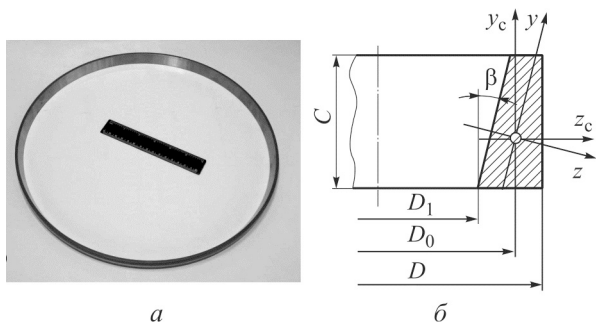


Рис. 1. Исследуемое кольцо (а) и его поперечное сечение (б)

| Параметры кольца | У-7866А.01 | 1077756.01 |
|-----------------------------|------------|------------|
| D , мм | 375 | 460 |
| D_1 , мм | 358 | 401 |
| C , мм | 18 | 62 |
| β , град | 15,0 | 12,7 |
| r , мм | 184,2 | 218,4 |
| I_{z_c} , мм ⁴ | 2 939 | 432 500 |
| I_z , мм ⁴ | 3 001 | 439 000 |
| I_{y_c} , мм ⁴ | 431 | 63 610 |
| α_1 | 64 | 22 |
| α_2 | 0,05 | 0,13 |

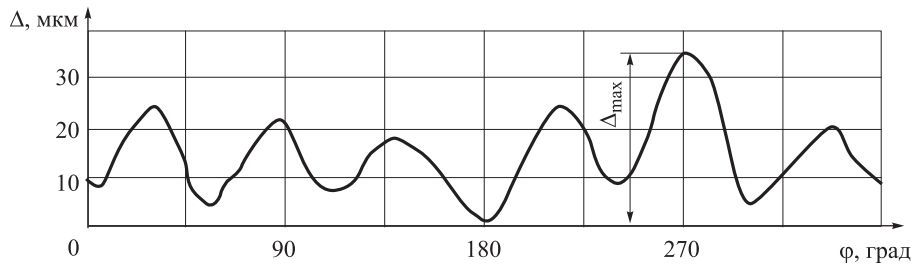


Рис. 2. Форма отклонений от плоскостности торцов кольца 1077756.01 после закалки

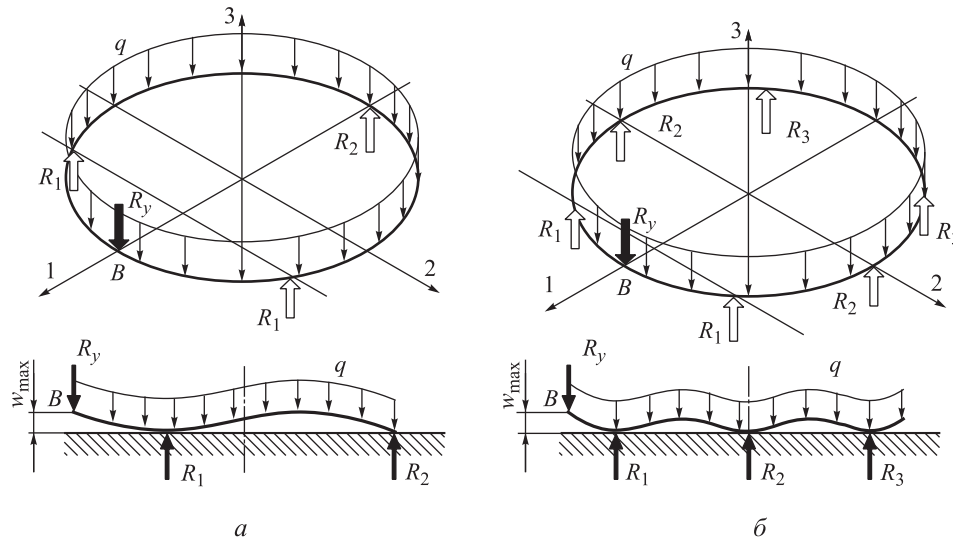


Рис. 3. Расчетные схемы для определения максимальной осевой деформации кольца w_{\max} при трех- (а) и шестиопорном (б) контакте со столом, R — реакция опоры

Термообработка колец выполнена в штампах. Исследования проведены на трехкоординатной измерительной машине Millenium. Три направляющие машины образуют декартову базовую систему координат XYZ, в которой перемещается щуповая головка. Конструкция машины порталная, с неподвижным измерительным столом и боковым приводом портала. Торцовую поверхность кольца исследовали по окружности среднего диаметра в микропроцессорном режиме.

На рис. 2 приведены результаты исследования одного из колец. Отклонение от плоскостности имеет шесть выраженных волн.

Обработка данных показала, что при первоначальном трехопорном контакте поверхностей стола и торца кольца среднее значение углов между точками касания с вероятностью 0,95 составляет $120 \pm 16^\circ$. Исходя из этого, в расчетной схеме (рис. 3, а) принято, что кольцо касается стола в трех точках, расположенных на равных расстояниях по периметру кольца. Кольцо нагружено сосредоточенной силой R_y (от действия шлифовального круга) и равномерно распределенной нагрузкой $q = q_c + q_m$ (от

действия магнитного поля стола станка q_c и массы кольца q_m), которые перпендикулярны плоскости кольца.

Трехопорный контакт кольца с поверхностью стола характерен для первоначального момента нагружения. При возрастании нагрузки число опорных контактов кольца с поверхностью стола увеличивается до шести (рис. 3, б).

На рис. 4 показано распределение вершин макроотклонений торцовых поверхностей колец по высоте профиля.

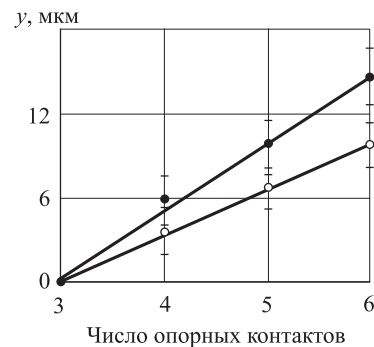


Рис. 4. Распределение вершин макроотклонений по высоте профиля:

○ — кольцо 1077756.01; ● — кольцо Y-7866A.01

Максимальная осевая деформация при закреплении заготовки кольца магнитным полем стола

$$w_q = w_m + w_{q\max} + w_{q\kappa},$$

где w_m , $w_{q\max}$ — максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе соответственно под действием массы заготовки и магнитного поля стола; $w_{q\kappa}$ — контактная деформация торцевой поверхности кольца с плоскостью стола.

При шлифовании торца к осевой деформации добавляется максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе $w_{p\max}$ под действием радиальной составляющей силы резания, приложенной в центре пролета между опорами, и контактная деформация торцевой поверхности кольца с плоскостью стола $w_{p\kappa}$:

$$w_p = w_{p\max} + w_{p\kappa}.$$

Контактную деформацию гладкой поверхности стола и шероховатой волнистой торцевой поверхности заготовки кольца определяли методом Н.Б. Дёмкина. Проведенная оценка величины контактных деформаций позволяет сделать вывод, что для исследуемых колец при наибольших нагрузках она не превышает 3% допуска плоскостности. В связи с этим в дальнейших расчетах влияние контактных деформаций не учитывали.

Из данных таблицы следует, что для рассматриваемых колец $\alpha_1 = 2\pi r/C > 10$, $\alpha_2 = 0,5(D - D_1)/r < 0,2$. Выполнение указанных условий позволяет использовать для определения $w_{p\max}$ и $w_{q\max}$ теорию стержней малой кривизны.

Максимальные осевые упругие деформации кольца при изгибе $w_{p\max}$ и $w_{q\max}$ вычисляются методом Мора. Статическую неопределимость кольца раскрываем методом сил [2–4].

В общем случае главные центральные оси z и y поперечного сечения кольца могут быть наклонены по отношению к плоскости кольца (см. рис. 1, б). Для облегчения дальнейших вычислений целесообразно ввести вспомогательные коэффициенты:

$$\eta_y = I_{yz}/I_{zc}; \quad \eta_{zy} = I_{ycz}/I_{zc}; \quad \eta_\kappa = EI_y I_z / (GI_{zc} I_\kappa),$$

где I_{yc} , I_{zc} , I_y , I_z , I_{ycz} — осевые и центробежный моменты инерции; E , G — модули нормальной упругости и сдвига материала кольца; I_κ — момент инерции сечения при кручении.

При раскрытии статической неопределимости методом сил разрез кольца располагаем в плоскости симметрии, в точке B (см. рис. 3), что позволяет использовать свойства симметрии.

В этом случае достаточно определить один неизвестный изгибающий момент [2, 3].

При действии указанной нагрузки максимальная осевая деформация (прогиб) w кольца возникает в точке B (см. рис. 3). Используя метод Мора, в полярной системе координат получим [2, 3]

$$w = \frac{rI_{zc}}{EI_z I_y} \sum_{i=1}^n \int (\eta_y M_{zci} M'_{zci} + \eta_\kappa M_{\kappa i} M'_{\kappa i}) d\varphi_i,$$

где M'_{z_c} , M'_{κ} — моменты от действия единичной силы; M_{z_c} , M_{κ} — моменты в эквивалентной системе.

Окончательные выражения для максимальной осевой деформации кольца при трех-, четырех-, пяти- и шестиопорном контакте его торцевой поверхности с поверхностью стола имеют следующий вид:

$$w_{q3} = w_{q\max3} + w_{m3} = Ar(63\eta_y + 7\eta_\kappa)(q_c + q_m); \quad (1)$$

$$w_{p\max3} = ArP_y(96\eta_y + 16\eta_\kappa); \quad (2)$$

$$w_{q4} = w_{q\max4} + w_{m4} = Ar(18\eta_y + 1,1\eta_\kappa)(q_c + q_m); \quad (3)$$

$$w_{p\max4} = ArP_y(46\eta_y + 6\eta_\kappa); \quad (4)$$

$$w_{q5} = w_{q\max5} + w_{m5} = Ar(7\eta_y + 0,28\eta_\kappa)(q_c + q_m); \quad (5)$$

$$w_{p\max5} = ArP_y(26\eta_y + 3,2\eta_\kappa); \quad (6)$$

$$w_{q6} = w_{q\max6} + w_{m6} = Ar(3,3\eta_y + 0,1\eta_\kappa)(q_c + q_m); \quad (7)$$

$$w_{p\max6} = ArP_y(16\eta_y + 2\eta_\kappa), \quad (8)$$

где $A = r^3 I_{zc} / (EI_z I_y \cdot 10^3)$.

С учетом изменения количества опор при закреплении кольца магнитным полем стола станка осевая упругая деформация

$$w_q = y_i + w_{qi}, \quad (9)$$

где y_i — уровень макроотклонений, соответствующий количеству опор i (y_3 принимаем равным нулю), мкм (см. рис. 4); w_{qi} — осевая деформация при i опорах, $3 \leq i \leq 6$.

Алгоритм вычисления максимальной осевой упругой деформации кольца под действием магнитного поля стола и массы кольца по формуле (9) приведен на рис. 5.

Максимальная осевая упругая деформация при закреплении кольца магнитным полем стола станка и действии радиальной составляющей силы резания с учетом изменения количества опорных контактов

$$w_{\max} = y_i + w_{qi} + w_{pi}. \quad (10)$$

Для расчета допустимой осевой упругой деформации кольца предложена следующая формула:

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

где λ — коэффициент запаса точности; Δ — допуск плоскостности торцевой поверхности на операции шлифования; Δ_m — допуск плоскостности при шлифовании жесткой заготовки, определяемый по справочной литературе.

Для исследуемых колец принято $\lambda = 0,75$; $\Delta = 25$ мкм. Для кольца У-7866А.01 $\Delta_m = 7,5$ мкм; для кольца 1077756.01 $\Delta_m = 9$ мкм.

Применимость магнитного поля стола для закрепления заготовки кольца определяется условием

$$w_q \leq [\Delta]. \quad (11)$$

При $w_q > [\Delta]$ кольцо на столе станка закрепляют с помощью упоров.

Как показывает практика, требуемую шероховатость торцевой поверхности кольца подшипника можно получить без использования выхаживания. Выхаживание применяют для обеспечения допуска плоскостности. Основное время обработки возрастает при этом в среднем на 40 %.

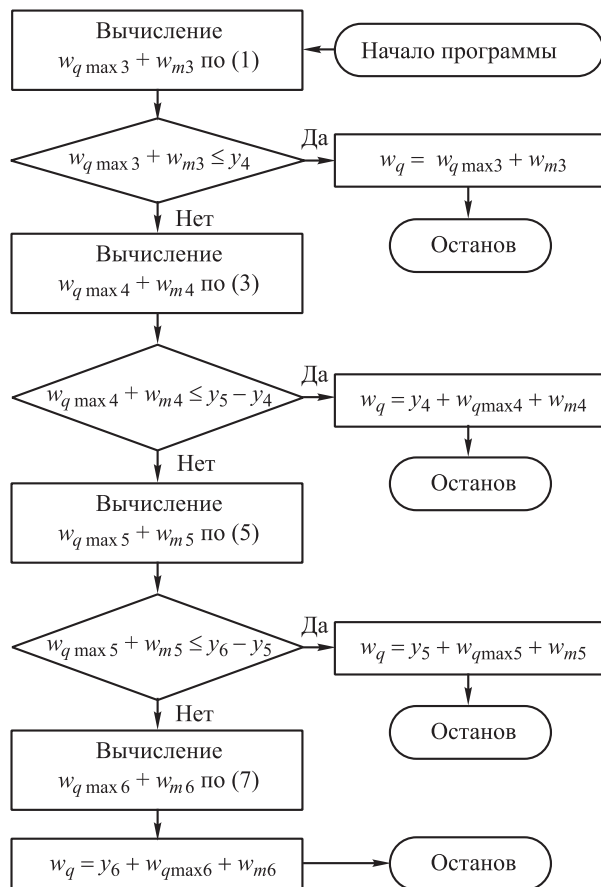


Рис. 5. Алгоритм вычисления максимальной осевой упругой деформации кольца под действием магнитного поля стола станка и массы кольца

Возможность шлифования без выхаживания при закреплении заготовки кольца магнитным полем стола определена неравенством

$$w_q + w_p \leq [\Delta], \quad (12)$$

а при использовании упоров — неравенством

$$w_p + w_m \leq [\Delta]. \quad (13)$$

В условиях (11)–(13) применяют математические модели упругих осевых деформаций кольца (1)–(8).

Для стандартных плит на основе магнитотвердых ферритов (ГОСТ 16528) и электромагнитных плит (ГОСТ 30273) класса точности А удельная сила притяжения p должна быть не менее 0,16 МПа [5]. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки q_c от действия магнитного поля стола на кольцо

$$q = pb = 0,16b,$$

где $b = (D - D_1)/2$ — ширина базового торца заготовки кольца (см. рис. 1, б).

Исходя из результатов проведенных исследований, разработан способ устранения изогнутости торцов колец шлифованием, при котором шлифование первого торца осуществляется без действия магнитного поля стола с радиальной составляющей силы резания P_y , обеспечивающей осевую деформацию (максимальный прогиб) меньше допуска плоскостности торцов [6].

Приведенная к ширине торцевой поверхности сила p_y принята равной 16,2 Н/мм. Это значение получено из условия обеспечения отсутствия шлифовочных прижогов и параметра шероховатости $Ra \leq 2,5$ мкм при максимальной производительности процесса.

Проверим условие применимости магнитного поля стола (11) для кольца У-7866А.01:

$$w_{q3} = w_{q\max 3} + w_{m3} = 317 + 2 = 319 \text{ мкм} > y_4 = 5,8 \text{ мкм};$$

$$w_{q\max 4} + w_{m4} = 75 + 0,5 = 75,5 \text{ мкм} > y_5 - y_4 = 9,6 - 5,8 = 3,8 \text{ мкм};$$

$$w_{q\max 5} + w_{m5} = 26 + 0,2 = 26,2 \text{ мкм} > y_6 - y_5 = 14,8 - 9,6 = 5,2 \text{ мкм};$$

$$y_6 = 14,8 > [\Delta] = 11,3 \text{ мкм}.$$

Условие (11) не выполняется. Для закрепления кольца на столе станка необходимо использовать упоры.

Проверим выполнение условия шлифования без выхаживания (13):

$$\begin{aligned}w_{p\max 5} + w_{m5} &= 34 + 0,2 = 34,2 \text{ мкм} > y_6 - y_5 = \\ &= 14,8 - 9,6 = 5,2 \text{ мкм}; \\ y_6 &= 14,8 > [\Delta] = 11,3 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Условие (13) не выполняется. Для кольца рекомендуется шлифование с выхаживанием.

Проверим условие применимости магнитного поля стола (11) для кольца 1077756.01:

$$\begin{aligned}w_{q3} &= w_{q\max 3} + w_{m3} = 14 + 0,3 = \\ &= 14,3 \text{ мкм} > y_4 = 3,6 \text{ мкм}; \\ w_{q\max 4} + w_{m4} &= 3,3 + 0,1 = 3,4 \text{ мкм} > \\ &> y_5 - y_4 = 6,7 - 3,6 = 3,1 \text{ мкм}; \\ w_{q\max 5} + w_{m5} &= 1,2 + 0,03 = 12,03 \text{ мкм} < \\ &< y_6 - y_5 = 9,7 - 6,7 = 3,0 \text{ мкм}; \\ w_q &= y_5 + w_{q\max 5} + w_{m5} = 6,7 + 1,2 + 0,03 = \\ &= 7,93 \text{ мкм} < [\Delta] = 9,7 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Условие (11) выполняется. Для закрепления кольца на столе станка применимо магнитное поле станка.

Проверим выполнение условия шлифования без выхаживания (12):

$$\begin{aligned}w_{q\max 5} + w_{m5} + w_{p\max 5} &= 1,2 + 0,03 + 1,5 = \\ &= 2,73 \text{ мкм} < y_6 - y_5 = 9,7 - 6,7 = 3 \text{ мкм};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_{q\max 5} + w_{m5} + w_{p\max 5} + y_5 &= 1,2 + 0,03 + 1,5 + 6,7 = \\ &= 9,43 \text{ мкм} < [\Delta] = 9,7 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Условие шлифования без выхаживания выполняется. При этом кольцо от действия магнитного поля стола и радиальной составляющей силы резания опускается и имеет пять опорных контактов с поверхностью стола.

Кольцо 1077756.01 рекомендуется шлифовать с закреплением магнитным полем стола без выхаживания.

Выводы

1. Разработаны математические модели и алгоритмы для определения осевой деформации при шлифовании колец крупногабаритных подшипников с начальными отклонениями от плоскостности торцов.

2. Получены условия обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности кольца подшипника, учитывающие осевую деформацию кольца под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания.

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] Биргер И.А., Пановко Я.Г., ред. *Прочность, устойчивость, колебания*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 1968. 832 с.
- [3] 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, iss. 2, pp. 157–160.
- [4] Kopetskii A.A., Nosenko V.A., Tyshkevich V.N. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 55–59.
- [5] Дальский А.М., ред. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. Москва, Машиностроение-1, 2003. 944 с.
- [6] Орлов С.В., Тышкевич В.Н., Коротков Б.И., Носенко В.А. *Способ устранения изогнутости торцов деталей класса колец шлифованием*. Патент 2370354 РФ, МПК В 24 В7/04, 2009.

References

- [1] Korotkov B.I., Korotkov S.B., Tyshkevich V. N., Orlov S.V. *Issledovanie protsessov shlifovaniya vnutrennikh i naruzhnykh konusov detalei klassa kolets* [Investigation of the processes of internal and external grinding cones detail class rings]. Volgograd, VolgSTU publ., 2007. 133 p.

- [2] *Prochnost', ustoiichivost', kolebaniia* [Strength, stability, vibrations]. Vol. 1. Ed. Birger I.A., Panovko Ia.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 1968. 832 p.
- [3] 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, iss. 2, pp. 157–160.
- [4] Kopetskii A.A, Nosenko V.A., Tyshkevich V.N. Influence of Shift of Clamping Forces on Elastic Deformations of the Bearing Ring in a Jaw Gripper. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 55–59.
- [5] *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia* [Directory technologist-Machinist]. Vol. 2. Dal'skii A.M. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2003. 944 p.
- [6] Orlov S.V., Tyshkevich V.N., Korotkov B.I., Nosenko V.A. *Sposob ustraneniia izognutosti tortsov detalei klassa kolets shlifovaniem* [Remedy curvature of the ends of parts of class rings grinding]. Patent RF no. 2370354 RF, MPK B 24 B7/04, 2009.

Статья поступила в редакцию 02.07.2015

Информация об авторах

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

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

САРАЗОВ Александр Васильевич (Волжский) — старший преподаватель кафедры Механики. Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «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, Deputy Director for Teaching and Learning, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky 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 Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: tubem@mail.ru).

ORLOV Sergey Vasilievich (Volzhsky) — Head of Laboratory, Department of Mechanics. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: mechanic@volpi.ru).

SARAZOV Aleksandr Vasilievich (Volzhsky) — Senior Lecturer, Department of Mechanics. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: mechanic@volpi.ru).