

УДК 621.923.4

doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-30-39

Выбор оптимальных условий плоского шлифования направляющих линейных подшипников малой жесткости

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

Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Selecting Optimal Conditions for Flat Grinding Linear Bearings Guides of Low Rigidity

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

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Technical University"

Предложены алгоритм и методика определения оптимальных условий шлифования направляющих линейных подшипников малой жесткости, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности R_a , отсутствие шлифовочных прижогов, допуск плоскостности поверхности) при максимальной производительности процесса. Входные факторы (твердость шлифовального круга, радиальная подача, скорость подачи стола) 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 осуществляется из условия обеспечения максимальной производительности процесса. Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов ограничением значения максимальной упругой деформации. Варьируемыми параметрами являются силы резания, притяжения магнитного поля стола станка и жесткость заготовки при изгибе. Приведены математические модели для определения максимальной упругой деформации призматических заготовок при закреплении и механической обработке. Определены условия обеспечения заданного допуска плоскостности поверхности заготовки, учитывающие упругую деформацию призматической заготовки малой жесткости под действием магнитного поля станка и радиальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: плоское шлифование, упругие деформации, заготовка малой жесткости, качество обработанной поверхности, оптимизация процесса

The article discusses the proposed algorithm and method for determining the optimal grinding conditions for linear bearing guides of low rigidity, which ensure meeting the specified requirements for the quality of the processed surface (surface roughness parameter R_a , no grinding burns and surface flatness tolerance) at maximum process productivity. Input factors (grinding wheel hardness, radial feed, table feed speed) are parameters for optimizing the grinding process. Mathematical models of the output factors are designed to limit the range of acceptable values of the optimization parameters. Processing performance was chosen as the target function. Optimization of parameters within the range of permissible values is carried out on the basis of ensuring the maximum productivity of the process. The

required flatness tolerance is provided at the second stage of mode optimization by limiting the value of the maximum elastic deformation. The cutting forces, the magnetic field attraction of the machine table and the bending stiffness of the workpiece are the variable parameters. Mathematical models for determination of maximum elastic deformation of prismatic workpieces when fixing and machining are presented. The conditions for ensuring a given workpiece surface flatness tolerance are determined, taking into account the elastic deformation of a prismatic workpiece of low rigidity under the effects of the magnetic field of the machine tool and the radial component of the grinding force.

Keywords: flat grinding, elastic deformations, workpiece of low rigidity, machined surface quality, process optimization

Процесс усовершенствования конструкции направляющих качения на прецизионных обрабатывающих станках привел к появлению нового класса — рельсовых направляющих качения (РНК) или модульных направляющих качения, которые в настоящее время стали основным типом направляющих в машиностроении [1].

Рельсовые, V-образные роликовые и цилиндрические линейные направляющие используют в автоматизированных сборочных и обрабатывающих системах, медицинском и точном лабораторном оборудовании, научных приборах и установках [1]. РНК применяют и для модернизации оборудования, при этом радикально меняются скоростные и точностные характеристики машин и механизмов [1].

В конструкции РНК выделяют два элемента: подвижный (шариковую или роликовую каретку, роликовый, игольчатый или шариковый сепаратор) и неподвижный — направляющую, рельс [2] (рис. 1).

Длина РНК может достигать 6 м, формы поперечных сечений разнообразны [1, 2]. Заготовки направляющих на операции шлифования имеют призматическую форму. Высокие требования к качеству обработанной поверхности (ОП) боковых граней призматической РНК обеспечиваются плоским шлифованием.

Особенностью механической обработки и плоского шлифования деталей (в том числе малой жесткости) является их значительное упругое деформирование при закреплении и резании. Максимальные упругие деформации заготовок малой жесткости могут превышать допуски отклонения формы ОП, что усложняет обеспечение требуемого качества поверхности [3–7].

При шлифовании боковых граней призматических заготовок малой жесткости упругие деформации в направлении, перпендикулярном поверхности стола станка, усложняют получение требуемого качества, в частности допуска плоскостности ОП. Под нагрузкой при закреплении и шлифовании заготовки возникают упругие деформации, соизмеримые с допусками на геометрические параметры ОП.

После шлифования и снятия магнитного поля стола станка упругие деформации возвращают определенную величину отклонения геометрическим параметрам, которые могут превышать заданные требования. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции [3–7].

Чтобы обеспечить требуемый допуск плоскостности ОП при плоском шлифовании заготовок малой жесткости, используют большое

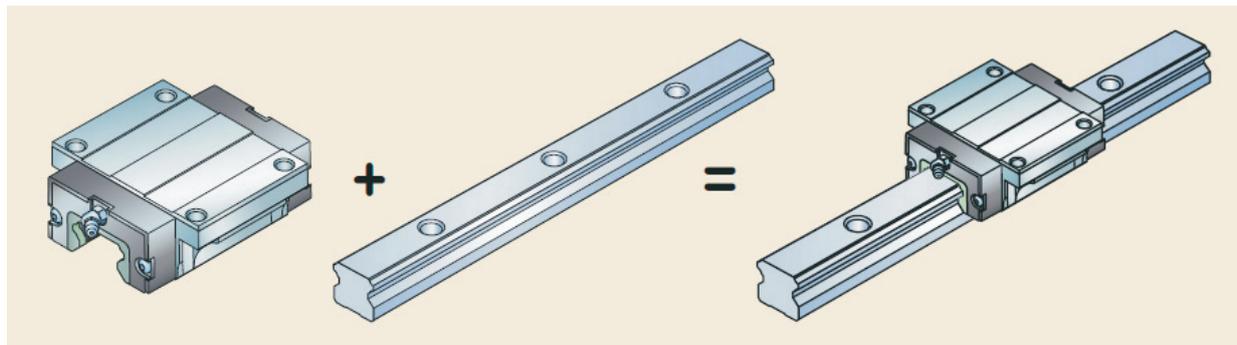


Рис. 1. Внешний вид РНК

число переходов и длительное выхаживание. Для ограничения максимальных упругих деформаций заготовок применяют подкладки или компенсаторы, увеличивающие их жесткость.

Цель работы — повышение эффективности процесса плоского шлифования заготовок малой жесткости направляющих линейных подшипников путем определения оптимальных условий обработки, обеспечивающих требуемое качество, в том числе допуск плоскостности ОП.

Методика исследования, алгоритм, математические модели. Предлагаемый алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования боковых граней призматических заготовок малой жесткости включает в себя два этапа оптимизации процесса.

На первом этапе (рис. 2) заготовку рассматривают как абсолютно жесткую, оптимизацию осуществляют из условия выполнения требований к таким параметрам, как шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др., за исключением допуска плоскостности.

Используя математические модели радиальной $P_y = P_y(x_1, x_2, \dots, x_k)$ и касательной $P_z = P_z(x_1, x_2, \dots, x_k)$ составляющих силы резания, параметра шероховатости $Ra = Ra(x_1, x_2, \dots, x_k)$ и др. (см. рис. 2) определяют области допустимых параметров характеристики абразивного инструмента и режимов x_1, x_2, \dots, x_k , обеспечивающих выполнение требований к качеству ОП.

Дальнейшую оптимизацию параметров в области допустимых значений проводят по критерию максимальной производительности процесса $Q_{\max}(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Эти оптимальные параметры определяют первый режим шлифования (режим 1).

На втором этапе требуемый допуск плоскостности обеспечивают ограничением максимальной упругой деформации заготовки при закреплении и обработке по алгоритму, приведенному на рис. 2. Варьируемыми параметрами являются силы резания и притяжения магнитного поля стола, жесткость заготовки при изгибе.

Условие обеспечения требуемого допуска плоскостности ОП ограничивает максимальную упругую деформацию w_{\max} под действием магнитного поля стола станка, веса заготовки,

усилия резания допустимой максимальной упругой деформацией $[\Delta]$ [4]:

$$w_{\max} \leq [\Delta] = \lambda \Delta - \Delta_T, \quad (1)$$

где λ — коэффициент точности при проектировании, принятый равным 0,75 [4]; Δ — допуск плоскостности поверхности на операции шлифования; Δ_T — достижимое отклонение от плоскостности ОП при шлифовании жесткой заготовки в рассматриваемых условиях из справочной литературы, например [8].

Для определения максимальных упругих деформаций при закреплении и шлифовании заготовки необходимы их математические модели, учитывающие контактные деформации поверхностей заготовки и стола, форму поперечного сечения и жесткость заготовки при изгибе.

Определение максимальных прогибов заготовок основано на теории изгиба балок, поэтому их геометрические параметры должны удовлетворять ограничению $l_3/h > 10$, где l_3 — длина заготовки, h — наибольший размер поперечного сечения.

На основании экспериментальных исследований показано, что заготовка получает изогнутость поверхности с выраженными волнами макроотклонений. Макроотклонение поверхности заготовки, соприкасающейся с поверхностью стола, моделируют цилиндрической поверхностью с направляющей в виде синусоиды с характерной длиной волны l (рис. 3, а) [9]. Удвоенную амплитуду синусоиды y_a принимают равной максимальной высоте волны макроотклонений.

Для определения максимальных прогибов заготовку моделируют неразрезной балкой с числом пролетов n . Число пролетов балки $n = 1 + k$, где k — число компенсаторов, используемых для повышения изгибной жесткости заготовки (рис. 3, б, в).

При закреплении заготовки магнитным полем стола на нее действует равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q = q_c + q_m$, где q_c — интенсивность равномерно распределенной нагрузки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка; q_m — интенсивность равномерно распределенной нагрузки под действием веса заготовки.

При шлифовании добавляется радиальная составляющая силы резания P_y в сечении, координата которого x_{\max} определяется из условия максимального прогиба неразрезной балки.

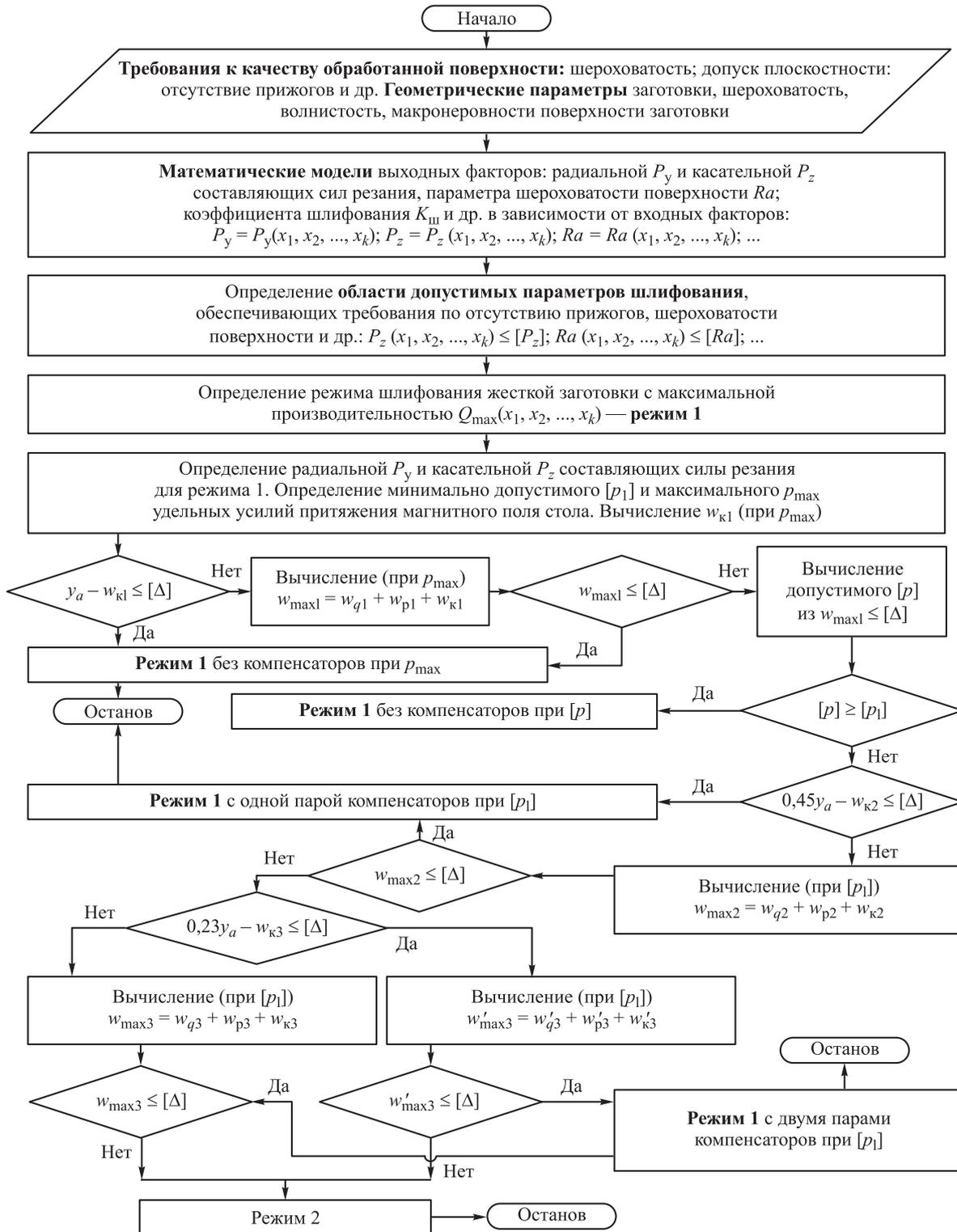


Рис. 2. Алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования, обеспечивающих требуемое качество, в том числе допуска плоскостности ОП

При шлифовании на упругое перемещение заготовки под действием силы резания влияет отношение жесткости технологической системы (шпиндель станка — узлы его крепления) j_c к изгибной жесткости заготовки j_{3n} (зависящей

от числа пролетов моделируемой неразрезной балки n): $c_n = j_c / (j_{3n} + j_c)$.

Математическая модель максимальной упругой деформации заготовки при шлифовании имеет вид

$$w_{\max n} = w_{q n} + w_{p n} + w_{k n},$$

где $w_{q n}$ и $w_{p n}$ — составляющие максимального прогиба, возникающего под действием соответственно усилия притяжения магнитного поля стола станка и радиальной составляющей усилия резания в сечении максимального прогиба; $w_{k n}$ — контактная деформация, зависящая от числа пролетов n .

Расстояние между точками касания поверхностей заготовки и стола станка y_n в сечениях с максимальными прогибами с координатой $x_{\max n}$ (см. рис. 3, а–в) определяется уравнением [9]

$$y_n = 0,5y_a \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{x_{\max n}}{l} \right) \right] - w_{k n}.$$

При установке компенсаторов число пролетов $n > 1$, и балка будет статически неопределимой. Статическая неопределимость раскрывается методом сил. Максимальные прогибы ($w_{q n} + w_{p n}$) и координаты максимальных прогибов $x_{\max n}$ определяют методом начальных параметров, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки в первом пролете (см. рис. 3).

С учетом постоянных интегрирования (угла поворота сечения и прогиба на первой опоре)

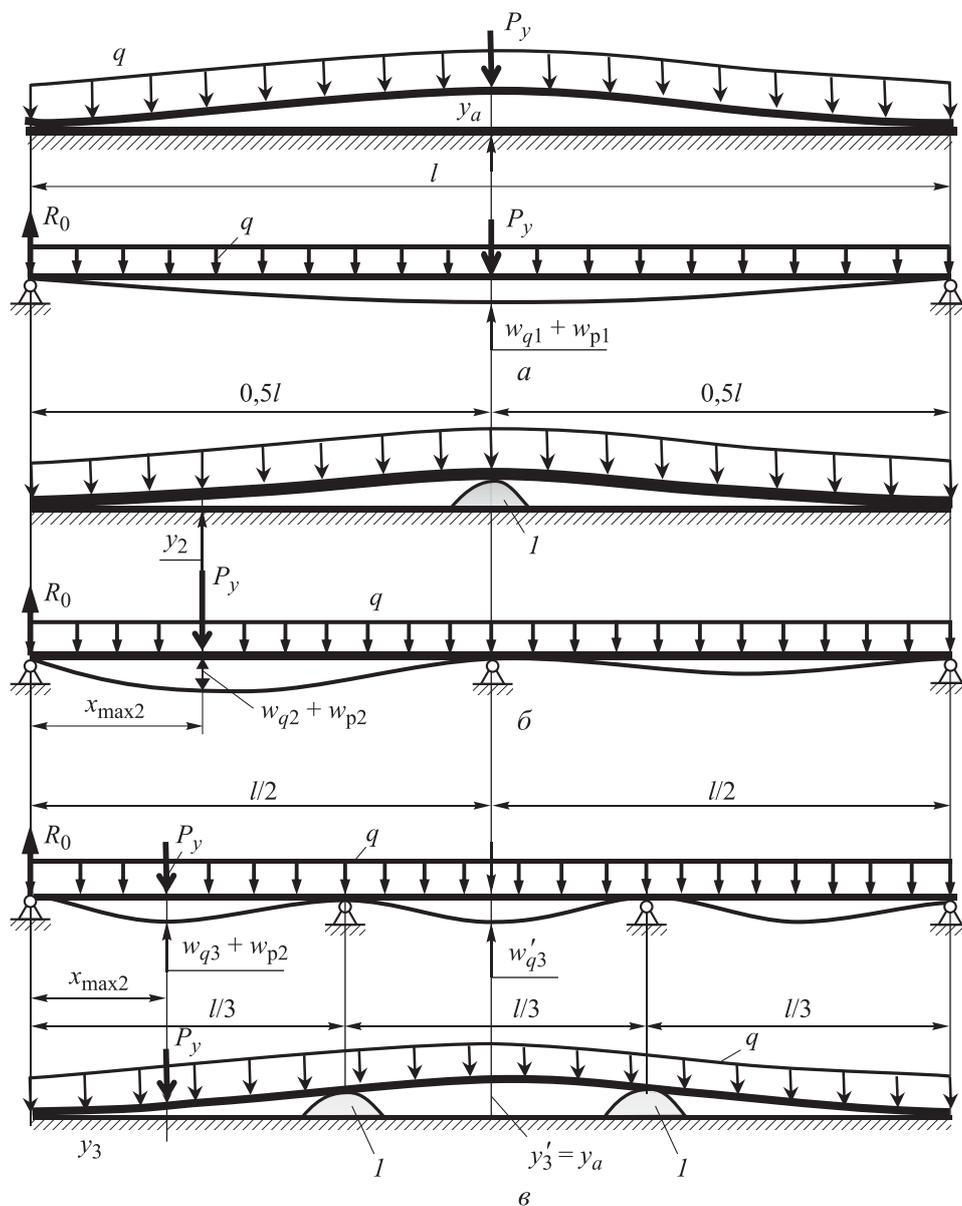


Рис. 3. Расчетные схемы заготовки при шлифовании с закреплением магнитным полем стола:
а — без компенсаторов; б — с одним компенсатором I ; в — с двумя компенсаторами I

угол поворота θ и прогиб w произвольного сечения первого пролета балки имеют следующий вид:

$$\theta(x) = \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_0}{2} \left(x^2 - \frac{l^2}{3n^2} \right) - \frac{P_y}{2} \left[(x-a)^2 - \frac{n}{6l} \left(\frac{l}{n} - b \right)^3 \right] - \frac{q}{6} \left(x^3 - \frac{l^3}{4n^3} \right) \right\}; \quad (2)$$

$$w(x) = \frac{1}{EI_z} \left\{ \frac{R_0}{6} \left(x^3 - \frac{l^2 x}{n^2} \right) - \frac{P_y}{6} \left[(x-b)^3 - \left(\frac{l}{n} - b \right)^3 \right] - \frac{q}{24} \left(x^4 - \frac{l^3 x}{n^3} \right) \right\}, \quad (3)$$

где E — модуль продольной упругости материала заготовки; I_z — осевой момент инерции поперечного сечения заготовки относительно центральной оси z , расположенной перпендикулярно плоскости изгиба; R_0 — реакция на левой опоре; b — координата точки приложения радиальной составляющей силы резания P_y .

Координату сечения с максимальным прогибом балки x_{\max} определяют из условия равенства нулю угла поворота сечения (2), решая кубическое уравнение. Численный подбор координаты b точки приложения радиальной составляющей силы резания P_y , обеспечивающей максимальный прогиб, реализуют в Mathcad.

Подставляя координаты x_{\max} в выражение (3), получают расчетные формулы для максимальных прогибов, расстояния между точками касания поверхностей заготовки и стола станка y_n в сечениях с максимальными прогибами при разном числе пролетов для расчетных схем (рис. 3, а-в):

- при $n = 1$

$$x_{\max 1} = 0,5l;$$

$$w_{q1} + w_{p1} = \frac{13ql^4 + 20,8c_1 P_y l^3}{1000EI_z};$$

$$y_1 = y_a - w_{k1};$$

- при $n = 2$

$$x_{\max 2} = 0,235l;$$

$$w_{q2} + w_{p2} = \frac{0,334ql^4 + 1,890c_2 P_y l^3}{1000EI_z};$$

$$y_2 = 0,451y_a - w_{k2};$$

- при $n = 3$

$$x_{\max 3} = 0,160l;$$

$$w_{q3} + w_{p3} = \frac{0,084ql^4 + 0,63c_3 P_y l^3}{1000EI_z};$$

$$y_3 = 0,233y_a - w_{k3}.$$

Контактная деформация w_{kn} гладкой поверхности стола и шероховатой волнистой поверхности заготовки, имеющей макроотклонения от плоскостности, складывается из контактных деформаций вследствие деформации микронеровностей и волнистости. Методика и расчетные формулы для вычисления контактных деформаций описаны в работах [9, 10].

При использовании двух компенсаторов (см. рис. 3, в) закрытие зазора между поверхностями заготовки и стола станка (касание поверхностей при деформации изгиба) будет происходить последовательно при перемещении силы резания от первого пролета к среднему. Если максимальная деформация в первом пролете балки будет равна зазору между поверхностями (точками касания) заготовки и стола:

$$w_{\max 3} = w_{q3} + w_{p3} + w_{k3} = y_3,$$

а зазор будет меньше либо равен допустимой максимальной упругой деформации заготовки $[\Delta]$:

$$y_3 \leq [\Delta],$$

то расчет максимального прогиба для проверки условия (1) необходимо продолжать в среднем пролете балки при приложении радиальной составляющей усилия резания в середине пролета

$$w'_{\max 3} = w'_{q3} + w'_{p3} + w_{k3} = \frac{0,000643ql^4 + 0,428c_3 P_y l^3}{1000EI_z} + w_{k3}.$$

С помощью соотношения (1) для конкретных расчетных схем (см. рис. 1) по предложенному алгоритму проверяют следующие условия обеспечения требуемого допуска плоскостности ОП заготовки в режиме 1:

$$y_a - w_{k1} \leq [\Delta]; \quad w_{\max 1} \leq [\Delta],$$

реализуется шлифование в режиме 1 при максимальном удельном усилии притяжения магнитного поля стола p_{\max} ;

$$[p] \geq [p_1],$$

осуществляется шлифование в режиме 1 при допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола $p_{\max} > [p] \geq [p_1]$, определяемом из условия $w_{\max 1} \leq [\Delta]$;

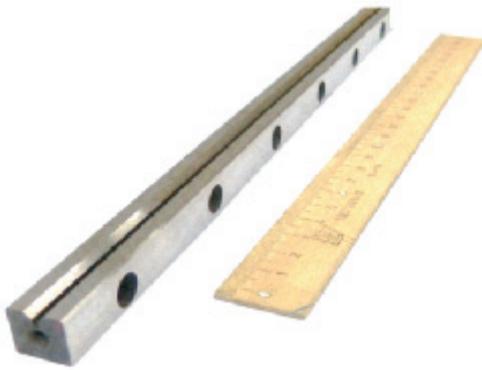


Рис. 4. Внешний вид направляющей линейного подшипника ЛРХ 6/350

$$0,45y_a - w_{к2} \leq [\Delta]; \quad w_{\max 2} \leq [\Delta], \text{ расчет при } [p_1],$$

проводится шлифование в режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола $[p_1]$ с одним компенсатором;

$$\begin{aligned} 0,23y_a - w_{к3} &\leq [\Delta]; \\ w_{\max 3} &\leq [\Delta]; \\ w'_{\max 3} &\leq [\Delta], \end{aligned} \quad \text{расчет при } [p_1], \quad (4)$$

реализуется шлифование в режиме 1 при минимально допустимом удельном усилии притяжения магнитного поля стола $[p_1]$ с двумя компенсаторами.

Если условия (4) не выполняются, то реализуется режим 2 — шлифование с дополнительными переходами. Параметры процесса шлифования соответствуют режиму 1, но время шлифования возрастает в среднем на 40 %.

Для направляющей линейного подшипника ЛРХ 6/350 из цементированной стали 20Х (рис. 4) выполнено моделирование выходных факторов: приведенных к ширине образца составляющих силы резания p_y и p_z , параметра шероховатости Ra методом полного факторного эксперимента типа 2^m , где $m = 3$ — число факторов.

С учетом производственного опыта выбраны следующие диапазоны варьирования входных факторов: твердость шлифовального кру-

га $c_1 (x_1)$, определяемая звуковым методом по приведенной скорости распространения акустических волн (ГОСТ Р 52710–2007) — от 4500 (К) до 4900 м/с (L); радиальная подача $S_p (x_2)$ — от 0,01 до 0,02 мм/ход; скорость подачи стола $v_s (x_3)$ — от 10 до 20 м/мин. Параметры x_1, x_2, x_3 , указанные в скобках, являются условными обозначениями кодированных значений факторов. Зернистость шлифовального круга — F70 (ГОСТ Р 52381–2005).

После обработки экспериментальных данных и проверки на значимость коэффициентов полиномов получены математические модели выходных факторов при шлифовании кругами зернистостью F70 (см. таблицу).

Требования к качеству боковой поверхности на операции шлифования: отсутствие шлифовочных прижогов; шероховатость поверхности $Ra = 1,25$ мкм; допуск плоскостности $\Delta = 7$ мкм. В результате исследований установлено, что шлифовочные прижоги образуются при $p_z > 6$ Н/мм. Для заготовок из стали 20Х определена область значений входных факторов, обеспечивающих допустимые значения с учетом запаса точности $[Ra] \leq 1,25 \cdot 0,75 = 0,94$ мкм и $[p_z] \leq 6 \cdot 0,75 = 4,5$ Н/мм:

$$p_z \leq 4,5 \text{ Н/мм}; \quad (5)$$

$$Ra \leq 0,94 \text{ мкм}. \quad (6)$$

Ограничения по отсутствию прижогов (5) и параметру шероховатости (6) обеспечиваются только для круга нижнего диапазона твердости $c_1 = 4500$ м/с.

Область допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству ОП: $c_1 = 4500$ м/с; $v_s \leq 12$ м/мин; $S_p \leq 0,012$ мм/ход.

С использованием целевой функции определены оптимальные режимы шлифования, обеспечивающие наибольшую приведенную режущую способность (максимальную производительность) $Q_{\max} = 121$ мм²/мин; $S_{p \text{ opt}} = 0,011$ мм/ход; $v_{s \text{ opt}} = 11$ м/мин. Приведенные

Математические модели выходных факторов при шлифовании кругами зернистостью F70

Параметр	Модель
p_z , Н/мм	$7,78 + 1,58x_1 + 0,88x_3 - 0,59x_1x_2 + 0,54x_1x_3 - 0,64x_2x_3 + 0,92x_1x_2x_3$
p_y , Н/мм	$22,1 + 1,35x_1 - 2,29x_2 + 1,21x_3 - 1,12x_1x_2 - 3,01x_2x_3 + 1,52x_1x_2x_3$
Ra , мкм	$1,46 - 0,25x_1 + 0,30x_2 + 0,30x_3 - 0,17x_1x_2 - 0,20x_1x_3$

значения составляющих силы резания на оптимальных режимах шлифования: $p_y = 17,8$ Н/мм, $p_z = 4,45$ Н/мм, для круга, находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости K (измеряемой скоростью звука $c_1 = 4500$ м/с).

Для исследуемой заготовки направляющей экспериментально определены параметры шероховатости, волнистости, макронеровности ОП. Вычислены максимальные упругие деформации. Проведена экспериментальная проверка математической модели максимальной деформации заготовки под действием магнитного поля стола станка при ее двухопорном контакте [9].

Ограничениями (4) установлены условия достижения требуемого допуска плоскостности ОП, определяющие процесс шлифования по режиму 1 с двумя компенсаторами, обеспечивающие требуемый допуск плоскостности $\Delta = 7$ мкм.

Исследование обработанной заготовки показало соответствие требуемому параметру шероховатости ОП Ra и отсутствие шлифовочных прижогов. С двумя компенсаторами обрабатывалась одна из двух противоположных боковых граней заготовки. При обработке второй про-

тивоположной боковой грани упругие деформации уже не будут превышать допустимых значений, поэтому шлифование осуществляется без компенсаторов с параметрами режима 1.

Проведенная оптимизация режимов плоского шлифования боковых граней призматических направляющих линейного подшипника ЛРХ 6/350 позволила сократить основное время операции шлифования направляющей на 30 %.

Выводы

1. Разработаны алгоритм выбора оптимальных условий плоского шлифования периферией круга на станках с магнитным столом призматических заготовок малой жесткости, а также условия достижения требуемого допуска плоскостности ОП.

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

3. Требуемый допуск плоскостности поверхности призматической заготовки малой жесткости достигается ограничением максимальной упругой деформации заготовки.

Литература

- [1] Лурье А.М. *Рельсовые направляющие качения. Характеристики продукции разных производителей. Рекомендации по применению*. Москва, ЗАО «Сервотехника», 2006. 50 с.
- [2] Профильные рельсовые направляющие серии LLT SKF. *technobearing.ru: веб-сайт*. URL: <https://technobearing.ru/d/877366/d/profilnyyerelsovyenapravlyayushchiyelltd> (дата обращения: 12.05.2021).
- [3] Свинин В.М., Пешкова Е.А., Лобанов Д.В. и др. Исследование регенеративных колебаний при токарной обработке нежестких валов. *Системы. Методы. Технологии*, 2016, № 3, с. 47–52.
- [4] Тышкевич В.Н., Носенко В.А., Саразов А.В. Повышение эффективности плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жесткости. *Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*, 2017, № 9, с. 105–108.
- [5] Унянин А.Н. Повышение точности маложестких деталей за счет компенсации упругих деформаций заготовок в процессе обработки. *Вестник современных технологий*, 2016, № 2, с. 75–79.
- [6] Nesterenko P.S., Tchigirinsky J.L., Nesterenko E.N. Analysis of influence of strains of technological system elements on machining accuracy under turning of non-rigid shafts based between centers. *Proc. 5th ICIE*. Springer, 2020. pp. 1193–1201.
- [7] Suslov A., Lysak V., Chigirinskiy J.L., et al. Inspecting the quality of a surface layer in non-rigid shafts turning by adaptive control over the process of cutting. *Mater. Sci. Forum*, 2019, vol. 973, pp. 212–218, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.212>
- [8] Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога*. Москва, Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

- [9] Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. Simulation of maximum elastic deformations during flat grinding of low-rigidity prismatic workpieces. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 971, art. 022048, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022048>
- [10] Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Саразов А.В. и др. Определение контактных деформаций при плоском шлифовании торцов колец крупногабаритных подшипников. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2016, № 6, с. 50–54.

References

- [1] Lur'ye A.M. *Rel'sovye napravlyayushchie kacheniya. Kharakteristiki produktsii raznykh proizvoditeley. Rekomendatsii po primeneniyu* [Rail roller ways. Characteristics of different manufacturers products. Recommendations on application]. Moscow, ЗАО «Servotekhnika» Publ., 2006. 50 p.
- [2] Profil'nye rel'sovye napravlyayushchie serii LLT SKF [Profile rail roller ways of LLT SKF series]. *technobearing.ru: website*. URL: <https://technobearing.ru/d/877366/d/profilnyyerelsovyenappravlyayushchiyellt.pdf> (accessed: 12.05.2021).
- [3] Svinin V.M., Peshkova E.A., Lobanov D.V., et al. Examination of regenerative oscillations when turning non-rigid shafts. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 3, pp. 47–52 (in Russ.).
- [4] Tyshkevich V.N., Nosenko V.A., Sarazov A.V. Raising efficiency of end flat grinding of slender prismatic workpieces. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Izvestia Volgograd State Technical University. Ser. Advanced Technology in Machine Building], 2017, no. 9, pp. 105–108 (in Russ.).
- [5] Unyanin A.N. Improving the accuracy of low-rigid parts by compensating the elastic deformation during treatment of blanks. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy* [Journal of Modern Technologies], 2016, no. 2, pp. 75–79 (in Russ.).
- [6] Nesterenko P.S., Tchigirinsky J.L., Nesterenko E.N. Analysis of influence of strains of technological system elements on machining accuracy under turning of non-rigid shafts based between centers. *Proc. 5th ICIE*. Springer, 2020. pp. 1193–1201.
- [7] Suslov A., Lysak V., Chigirinskiy J.L., et al. Inspecting the quality of a surface layer in non-rigid shafts turning by adaptive control over the process of cutting. *Mater. Sci. Forum*, 2019, vol. 973, pp. 212–218, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.212>
- [8] Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Handbook of technologist]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p.
- [9] Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. Simulation of maximum elastic deformations during flat grinding of low-rigidity prismatic workpieces. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 971, art. 022048, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022048>
- [10] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., et al. Determination of contact deformations at surface grinding end faces of big bearings rings. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2016, no. 6, pp. 50–54 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.05.2021

Информация об авторах

ТЫШКЕВИЧ Владимир Николаевич — 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).

НОСЕНКО Владимир Андреевич — 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: vladim.nosenko2014@yandex.ru).

САРАЗОВ Александр Васильевич — 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@post.volpi.ru).

ОРЛОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук, доцент, 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@post.volpi.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тышкевич В.Н., Носенко В.А., Саразов А.В., Орлов С.В. Выбор оптимальных условий плоского шлифования направляющих линейных подшипников малой жесткости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 7, с. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-30-39

Please cite this article in English as:

Tyshkevich V.N., Nosenko V.A., Sarazov A.V., Orlov S.V. Selecting Optimal Conditions for Flat Grinding Linear Bearings Guides of Low Rigidity. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 7, pp. 30–39, doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-30-39

Information about the authors

TYSHKEVICH Vladimir Nikolaevich — 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).

NOSENKO Vladimir Andreevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries. Volzhsky Polytechnical Institute (Branch), Volgogradsky State Technical University (404121, Volzhsky, Volgogradskaya Obl., Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, email: vladim.nosenko2014@yandex.ru).

SARAZOV Aleksandr Vasilievich — 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@post.volpi.ru).

ORLOV Sergey Vasilievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, 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@post.volpi.ru).