

УДК 621.923.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-8-255-42-46

*В. Н. Тышкевич, В. А. Носенко, А. В. Саразов, С. В. Орлов***УПРУГИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК
МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ****Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

E-mail: mechanic@post.volpi.ru

Исследуется плоское шлифование боковых граней призматических заготовок малой жесткости. Разработана математическая модель максимальной упругой деформации призматических заготовок при закреплении и механической обработке. Учитываются контактные деформации поверхностей заготовки и стола станка. Проведена экспериментальная проверка разработанной модели.

Ключевые слова: плоское шлифование, упругие деформации, призматическая заготовка, малая жесткость.

*V. N. Tyshkevich, V. A. Nosenko, A. V. Sarazov, S. V. Orlov***ELASTIC DEFORMATIONS DURING FLAT GRINDING
OF LOW-RIGIDITY PRISMATIC WORKPIECES****Volzhsky Polytechnical Institute (Branch)****Volgogradsky State Technical University**

The flat grinding of low-rigidity prismatic workpieces side surfaces is investigated. Mathematical models of the maximum elastic deformation of prismatic workpieces during fixing and machining have been developed. Contact deformations of the surfaces of the workpiece and the machine table are taken into account. An experimental verification of the developed models was carried out.

Keywords: flat grinding, elastic deformations, prismatic workpiece, low rigidity.

Рельсовые направляющие линейных подшипников качения, используемые для осуществления линейного перемещения подвижных узлов различных машин или устройств, являются одними из основных элементов конструкции, определяющими возможности и технический уровень оборудования [1]. Высокие требования к качеству обработанной поверхности боковых граней призматических направляющих обычно обеспечиваются плоским шлифованием. Упругие деформации в направлении перпендикулярном поверхности стола станка, возникающие при шлифовании боковых граней призматических заготовок малой жесткости, усложняют обеспечение требуемого допуска плоскостности обработанной поверхности. Величина максимальных упругих деформаций соизмерима с допуском плоскостности. После шлифования и снятия магнитного поля стола станка упругие деформации возвращают определенную величину отклонения от плоскостности, которое может превышать заданный допуск. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции [2, 3].

Цель исследований: разработка математической модели максимальной упругой дефор-

мации призматической заготовки малой жесткости при плоском шлифовании периферией круга с учетом силы резания, силы притяжения магнитного поля стола и изменения изгибной жесткости заготовки за счет использования компенсаторов; экспериментальная проверка разработанной модели.

Математическая модель максимальной упругой деформации заготовки при шлифовании определяется суммой деформаций:

$$W_{\max} = W_{qn} + W_{pn} + W_{kn}, \quad (1)$$

где W_{qn} , W_{pn} – составляющие максимального прогиба, от действия, соответственно, усилия притяжения магнитного поля стола станка и собственного веса заготовки, радиальной составляющей усилия резания в сечении максимального прогиба (с учетом соотношения жесткостей технологической системы c_n [3]); W_{kn} – контактная деформация в зависимости от числа пролетов.

Определение максимальных прогибов заготовок основано на теории изгиба балок, поэтому геометрические параметры заготовок должны удовлетворять ограничению: отношение длины заготовки к размеру поперечного сечения более 10. На основании экспериментальных

исследований показано, что заготовка получает изогнутость поверхности с выраженными волнами макроотклонений. Макроотклонение поверхности заготовки, соприкасающейся с поверхностью стола, моделируется цилиндрической поверхностью с направляющей в виде синусоиды с характерной длиной волны l (рис. 1, а) [3]. Удвоенная амплитуда синусоиды y_a принимается равной максимальной высоте волны макроотклонений (см. рис. 1, а). При закреплении заготовки магнитным полем стола на заготовку 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 от действия собственного веса заготовки. При шлифовании добавляется радиальная составляющая силы резания P_y в сечении, координата которого x_{maxn} определяется из условия максимального прогиба нера-

резной балки. Число пролетов балки $n = 1 + k$, где k – число компенсаторов, которые используются для повышения изгибной жесткости заготовки (рис. 1 б, в).

По порядку решения [3], получим расчетные формулы для максимальных прогибов, координаты максимального прогиба x_{maxn} , расстояния между точками касания поверхностей заготовки и стола станка y_n в сечениях с максимальными прогибами при различном числе пролетов для расчетных схем рисунка 1 а, б, в в виде:

$$w_{q1} + w_{p1} = (13 ql^4 + 20,8 c_1 P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z);$$

$$x_{max1} = 0,5l; y_1 = y_a - w_{k1}; \quad (2)$$

$$w_{q2} + w_{p2} = (0,334 ql^4 + 1,89c_2 P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z);$$

$$x_{max2} = 0,235l; y_2 = 0,451y_a - w_{k2}; \quad (3)$$

$$w_{q3} + w_{p3} = (0,084ql^4 + 0,63c_3 P_y l^3) \times 10^{-3} / (EI_z);$$

$$x_{max3} = 0,16l; y_3 = 0,233y_a - w_{k3}. \quad (4)$$

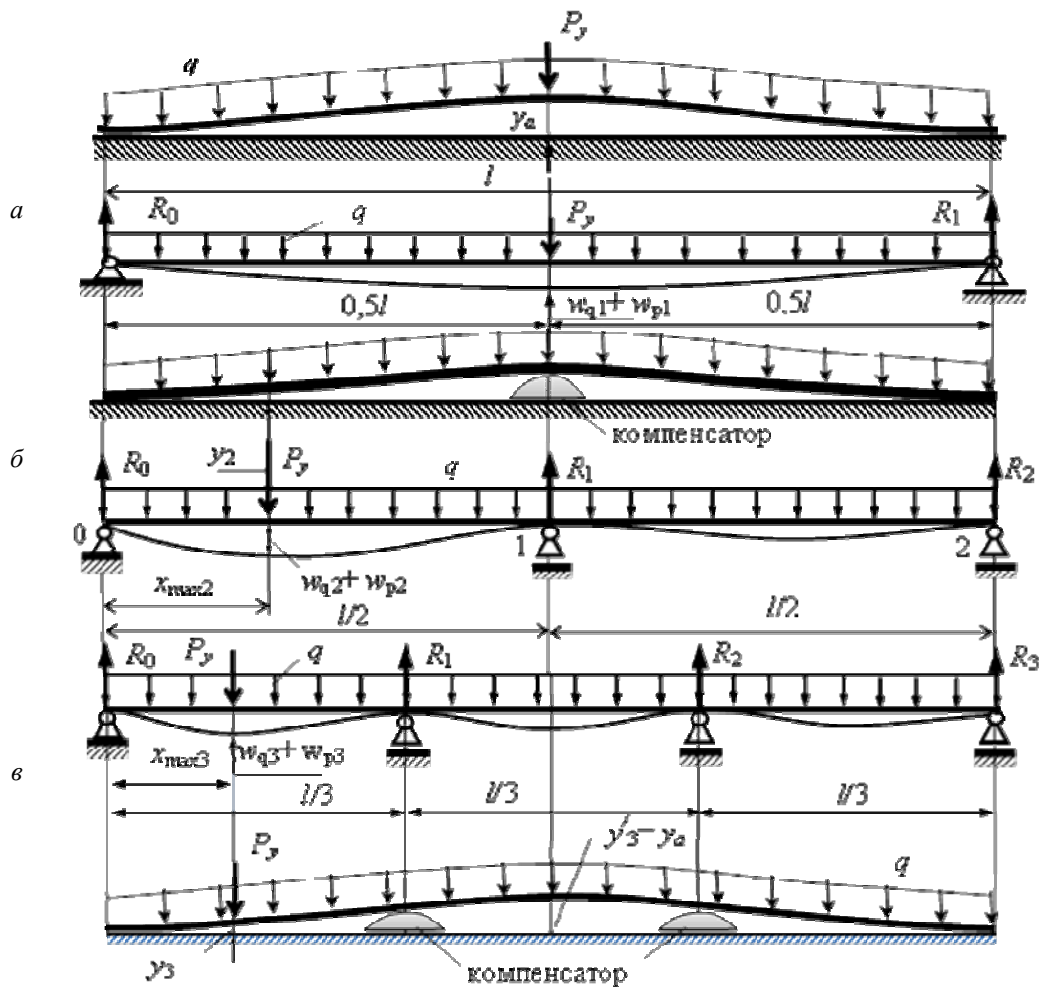


Рис. 1. Расчетные схемы заготовки при шлифовании с закреплением магнитным полем стола: а – без компенсаторов; б – с одним компенсатором; в – с двумя компенсаторами

Методика и расчетные формулы для вычисления контактных деформаций описаны в [3, 4]. Для исследования упругих деформаций, возникающих при закреплении и шлифовании заготовки, выбрана направляющая роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350, изготавливаемая на ОАО «ЕПК Самара» из стали 20Х (ГОСТ 4543 – 71) (рис. 2). Параметры макроотклонений, волнистости и шероховатости поверхности боковых граней определяли перед операцией чистового шлифования [3, 4]. Исследование отклонений от плоскостности выполняли на поверхности грани *A* (см. рис. 2), которая в дальнейшем используется как базовая. Исследовали отклонения грани *A* на пяти заготовках. Измерения выполняли индикаторной головкой со шкалой деления 1 мкм (ГОСТ 9696–82) при продольном перемещении стола станка, шаг измерений – 25 мм.

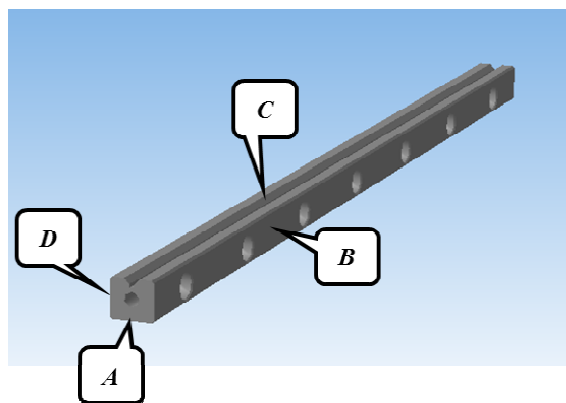


Рис. 2. Обозначение граней направляющей подшипника ЛРХ 6/350

При дальнейших исследованиях заготовку положили на поверхность стола станка гранью *A*, при этом заготовка касается поверхности стола наиболее выступающими поверхностями (рис. 3).

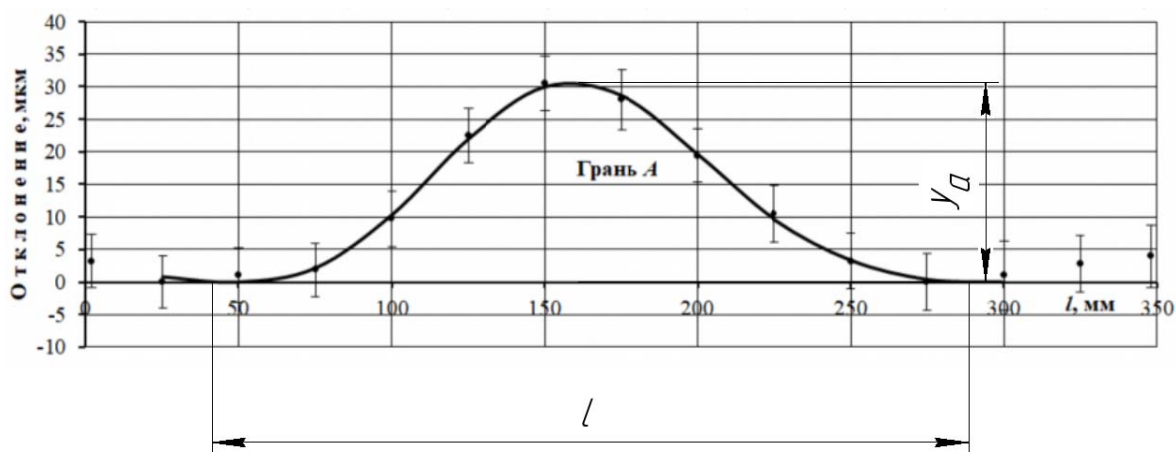


Рис. 3. Параметры синусоиды

Количество параллельных измерений – 3 (по ширине заготовки), количество опытов для одной заготовки – 15. Направляющая цилиндрической поверхности, которой моделируется поверхность грани *A*, контактирующей с поверхностью стола, близка к синусоиде. После

аппроксимации фактической кривой усредненной заготовки методом наименьших квадратов получим синусоиду, представленную на рис. 3. Результаты измерений амплитуды и характерной длины волны для пяти заготовок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений параметров синусоиды

№ заготовки	y_a , мкм	Погрешность измерений, δ , мкм	l , мм	Погрешность измерений, δ , мм
1	31	3,75	247	5,7
2	32	3,75	248	5,7
3	26	3,75	239	5,7
4	28	3,75	242	5,7
5	33	3,75	250	5,7
Среднее	30	3,75	245	5,7

Адекватность замены реальной поверхно-сти цилиндрической с направляющей в виде синусоиды проверена по критерию Фишера, дисперсии адекватности и воспроизводимости однородны. Экспериментально проверяли максимальную деформацию заготовки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка. Заготовку кладем на стол гранью А. Устанавливаем индикаторную головку на грань С в сечении, соответствующем середине характерной длины волны синусоиды (см. рис. 1, а, рис. 3). В соответствии с результатами измерения пяти заготовок, представленными в табл. 1 минимальный размер зазора между поверхностью заготовки и стола станка равен 26 мкм. Величина удельного усилия притяжения маг-

нитного поля стола станка, определена из условия не превышения величины максимальной деформации 26 мкм и равна $p = 0,02$ МПа. Расчет максимальной упругой деформации w^p_{max1} производили в соответствии с математической моделью (1, 2), учитывая интенсивность равномерно распределенной нагрузки от действия магнитного поля и контактную деформацию. Экспериментальное значение максимальной деформации w^3_{max1} определяли по показаниям индикаторной головки. Результаты сведены в табл. 2. Экспериментально измеренные максимальные перемещения исследованных заготовок имеют относительные погрешности от теоретических не превышающие 17 %. Средняя относительная погрешность составляет 11 %.

Таблица 2

Максимальная деформация заготовки от действия усилия притяжения магнитного поля стола станка ($p = 0,02$ МПа)

№ заготовки	Экспериментальная максимальная деформация w^p_{max1} , МКМ	Погрешность измерений, δ , МКМ	Рассчитанная величина максимальной деформации w^p_{max1} , МКМ	Относительная погрешность δ , %
1	20	1,5	22	10
2	19	1,5	23	17
3	18	1,5	20	10
4	19	1,5	21	14,3
5	23	1,5	24	4,3
Среднее	19,8	1,5	22	11

Проверяем адекватность математической модели по критерию Фишера при 5% уровне значимости. Дисперсия адекватности, зависящая от разности между значениями параметра, определенными по математической модели, и экспериментальными результатами определения параметра, по численным значениям таблицы 2 [5]: $S^2_{ад} = 29/5 = 3,7$. В качестве дисперсии воспроизводимости берем дисперсию ряда экспериментально определенных максимальных деформаций пяти заготовок с числом степеней свободы $f_{воспр} = 5$: $S^2_{воспр} = 3,7$. Расчетный коэффициент Фишера: $F = 5,8/3,7 = 1,57$. Полученное отношение сравниваем с табличным: $F_{1-p}(f_1, f_2)$, где уровень значимости $p = 0,95$; число степеней свободы дисперсии адекватности $f_1 = 5$; число степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_2 = 5$. Таким образом, $F_{табл} = 5,05$ [5].

Выполнено условие $F < F_{табл}$, следовательно, дисперсии адекватности и воспроизводи-

мости однородны, математическая модель адекватна.

Выводы

Разработана математическая модель максимальной упругой деформации призматической заготовки малой жесткости при плоском шлифовании с учетом силы резания, силы притяжения магнитного поля стола и изменения жесткости заготовки при использовании компенсаторов. Экспериментальная проверка подтверждает адекватность разработанной модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лурье, А. М. Рельсовые направляющие качения. Характеристики продукции разных производителей. Рекомендации по применению : обзор. исслед. / А. М. Лурье ; ОАО «ЭНИМС», ЗАО «Сервотехника». – 2006. – 50 с.
2. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Суслова. – Москва : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
3. Тышкевич, В. Н. Simulation of maximum elastic deformations during flat grinding of low-rigidity prismatic workpieces / В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов, С. В. Орлов //

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 971 022048: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020 (ICMTME 2020) (Sevastopol, 7-11 September, 2020). – [IOP Publishing], 2020. – 8 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/971/2/022048/pdf>.

4. Определение контактных деформаций при плоском

шлифовании торцов колец крупногабаритных подшипников / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов, С. В. Орлов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2016. – № 6 (320). – С. 50–54.

5. *Спиридонов, А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.