

УДК 621.923.4

Влияние остаточных напряжений на упругие деформации деталей малой жесткости при шлифовании

В.Н. Тышкевич¹, В.А. Носенко¹, А.В. Саразов¹, С.В. Орлов¹,
Е.С. Киселев², А.Н. Унянин²

¹ Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

² ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

The effect of residual stresses on elastic deformations of low-stiffness parts during grinding

V.N. Tyshkevich¹, V.A. Nosenko¹, A.V. Sarazov¹, S.V. Orlov¹,
E.S. Kiselev², A.N. Unyanin²

¹ Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University

Определены упругие деформации деталей малой жесткости типа кольца малой кривизны и призматического стержня, возникающие под действием остаточных напряжений при плоском шлифовании. Приведены результаты экспериментального определения остаточных напряжений после шлифования и закалки. Аналитически по методике Биргера и методом конечных элементов (в среде АРМ FEM КОМПАС-3D) вычислены максимальные прогибы, формируемые под действием остаточных напряжений, для направляющей роликового подшипника ЛРХ 6/350 и наружного кольца роликового конического подшипника У-7866А.01. Упругие деформации (максимальные прогибы) деталей малой жесткости типа кольца малой кривизны и призматического стержня, возникающие под действием остаточных напряжений при плоском шлифовании, найдены для оценки целесообразности их учета при определении оптимальных режимов и условий закрепления заготовок. Показано, что полученные максимальные прогибы для направляющей (1,29 мкм) и кольца (2,44 мкм) соизмеримы с достижимой точностью формы обработанной поверхности (неплоскостности) при шлифовании (3 мкм), и их нужно учитывать при нахождении оптимальных режимов и условий закрепления заготовок малой жесткости при плоском шлифовании.

EDN: FOOVND, <https://elibrary/foovnd>

Ключевые слова: упругие деформации, остаточные напряжения, малая жесткость, плоское шлифование

Elastic deformations of low-rigidity parts such as rings of small curvature and prismatic rods from the action of residual stresses during flat grinding are determined. The results of experimental determination of residual stresses after grinding and quenching are presented. Analytically by Birger's method and by the finite element method (application APM FEM COMPASS-3D) determined the maximum deflections of the guide roller bearing LRX 6/350 and the outer ring of the tapered roller bearing U-7866A.01 from the action of residual stresses. Elastic deformations (maximum deflections) of low-rigidity parts such as rings of small curvature and prismatic rods from the action of residual stresses during flat grinding

are determined to assess the feasibility of taking them into account when determining the optimal modes and conditions for fixing workpieces. The obtained values of the maximum deflections for the studied parts: 2.44 microns for the guide and 1.29 microns for the ring, are commensurate with the achievable accuracy of the shape of the treated surface (non-flatness) during grinding — 3 microns and must be taken into account when determining the optimal modes and conditions for fixing workpieces of low rigidity during flat grinding.

EDN: FOOVND, <https://elibrary/foovnd>

Keywords: elastic deformations, residual stress, small rigidity, flat grinding

Детали малой жесткости типа кольца малой кривизны и призматического стержня получили широкое применение в станко-, судо-, автомобиле- и самолетостроении. Детали данного типа, используемые в таких ответственных изделиях, как крупногабаритные роликовые конические подшипники качения и направляющие линейных подшипников линейного перемещения, должны удовлетворять высоким требованиям к качеству, точности размеров, формы и взаимного расположения исполнительных поверхностей [1–5].

Обеспечение требуемой точности размеров, формы и взаимного расположения исполнительных поверхностей маложестких деталей усложнено значительными упругими деформациями, возникающими при их механической обработке и закреплении [5, 6]. Упругие деформации уменьшают различными способами: применяют многопроходную обработку деталей на заниженных режимах, снижая усилия; устанавливают дополнительные опоры в виде люнетов при токарной обработке и в виде подкладок или компенсаторов при шлифовании, увеличивая жесткость заготовки; используют многоцикловую термообработку для выравнивания остаточных напряжений (ОН); при плоском шлифовании выполняют большее число переходов и длительное выхаживание и т. д. [5, 6].

При закреплении и плоском шлифовании заготовок малой жесткости упругие деформации (прогибы) по нормали к поверхности стола станка усложняют обеспечение требуемой точности формы обработанной поверхности (неплоскостности). При шлифовании заготовка деформируется (прогибается) по нормали к поверхности стола станка под действием силы притяжения его магнитного поля и радиальной составляющей силы резания. После шлифования и снятия магнитного поля в результате упругого деформирования заготовки отклонение от плоскостности изменяется на величину полученного прогиба [7–9].

Основную долю максимальных упругих деформаций составляют прогибы заготовки в зазорах между соприкасающимися поверхностями последней и стола станка под действием радиальной составляющей силы резания.

В работе [5] отмечена необходимость учета и контактной деформации соприкасающихся поверхностей заготовки и стола станка, она соизмерима с достижимой неплоскостностью при шлифовании, равной 3 мкм.

Причинами возникновения ОН в поверхностном слое заготовки при шлифовании являются силовое и температурное воздействия в зоне резания, а также структурные и фазовые превращения под действием тепловых полей [10, 11]. Различные экспериментальные методы определения ОН, в том числе и при шлифовании, детально описаны в публикациях [10, 12, 13].

Цель работы — определение максимального упругого прогиба кольца малой кривизны и призматического стержня под действием ОН при плоском шлифовании и оценка необходимости учета этих деформаций при нахождении оптимальных режимов и условий закрепления заготовок малой жесткости.

Методика исследования, математические модели, результаты и их обсуждение. Для экспериментального определения ОН при плоском врезном шлифовании периферией круга выбрана рельсовая направляющая однорядного роликового подшипника ЛРХ 6/350 (рис. 1) производства Филиала ОАО «ЕПК Самара» (г. Волжский). Направляющую изготавливали из стали 20Х (ГОСТ 4543–71) и подвергали цементации на глубину 0,4...0,8 мм.

Для измерения ОН первого рода использовали аппаратуру «СИТОН-АРМ» [12], позволяющую измерять ОН в поверхностном слое изделий из токопроводящих материалов на глубине до 800 мкм (для сталей — до 300 мкм) неразрушающим методом АФЧХ-тестирования с построением эпюр ОН по глубине слоя.

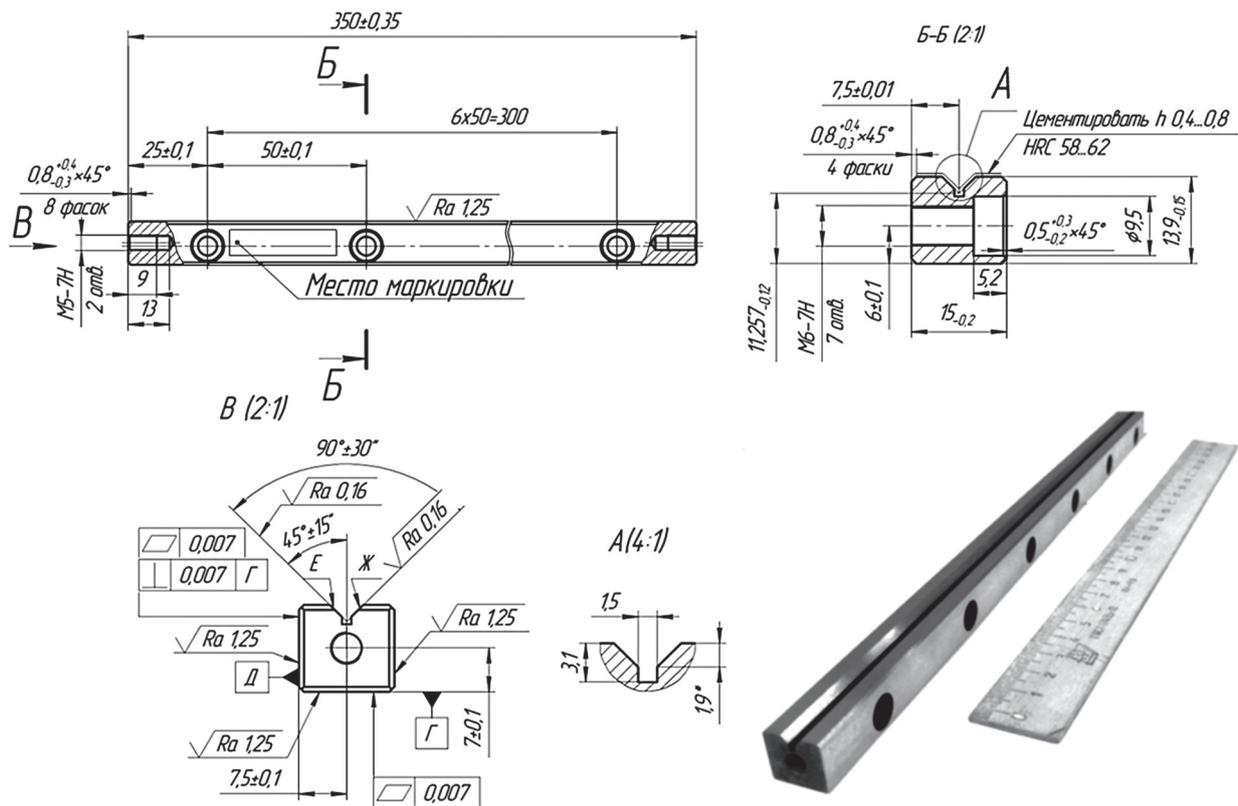


Рис. 1. Схема направляющей однорядного роликового подшипника ЛРХ 6/350

Эпюры ОН строились в полуавтоматическом режиме на компьютере в реальном времени при сканировании удельной электропроводности поверхностного слоя детали на шестнадцати глубинах: для сталей ферритного класса — в диапазоне 3...300 мкм; для сталей аустенитного класса — 5...400 мкм; для титановых сплавов — 10...500 мкм [12].

Боковые грани испытываемых образцов шлифовали кругами прямого профиля на керамической связке 1250×16×76 25AF70K7V и 1250×16×76 25AF70L7V. Режимы плоского шлифования периферией круга: радиальная подача $S_p = 0,01$ мм/ход; скорость подачи стола $v_s = 11$ м/мин; смазочно-охлаждающая жидкость — 5%-ный эмульсионный раствор «Авазол».

Значения ОН на разной глубине поверхностного слоя образца

h , мкм	σ , МПа						
3	59	20	-15	50	-6	150	5
5	48	25	-14	60	-3	200	6
10	4	30	-11	80	1	250	6
15	-11	40	-9	100	4	300	7

По результатам испытаний пяти образцов получены значения ОН σ на разной глубине поверхностного слоя h в образце из стали 20Х при термомеханическом воздействии (шлифовании и закалке), приведенные в таблице и на рис. 2.

Максимальный прогиб вычисляли по формулам методики Биргера для расчета ОН удалением слоев призматического образца [14]. Изгибающие моменты, возникающие на концах шарнирно закрепленного стержня прямоугольного поперечного сечения шириной $b = 15$ мм,

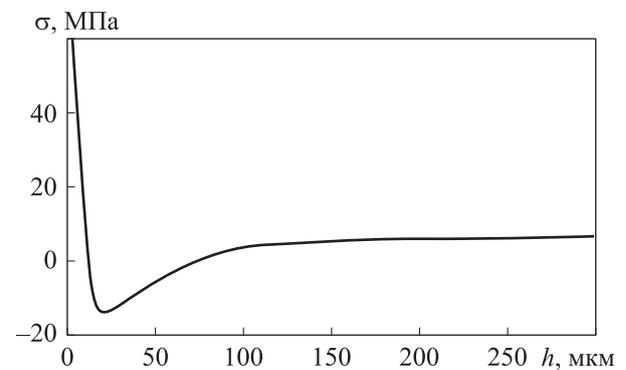


Рис. 2. Распределение ОН σ по глубине поверхностного слоя h в образце из стали 20Х

высотой $h = 14$ мм с глубиной поверхностного слоя $a = 0,3$ мм, определяли по выражению [14]

$$M = \int_0^a \sigma(y) \left[\frac{1}{2}(h+a) - y \right] b dy =$$

$$= \int_0^{0,3} \sigma(y) \left[\frac{1}{2}(14+0,3) - y \right] \cdot 15 dy =$$

$$= 0,923 \left[\frac{1}{2}(14+0,3) - 0,232 \right] \cdot 15 = 95,8 \text{ Н} \cdot \text{мм},$$

где y — главная центральная вертикальная ось поперечного сечения образца.

С учетом знака площадь под эпюрой ОН (см. рис. 2)

$$S = \int_0^a \sigma(y) dy = 0,923 \text{ Н/мм}.$$

Координата центра тяжести этой площади (точки приложения равнодействующей растягивающей нагрузки под действием ОН), отсчитываемая от верхней поверхности образца, $a_c = 0,232$ мм.

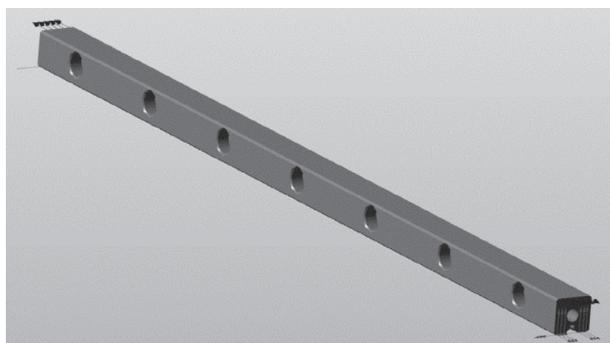
Максимальный прогиб шарнирно опертого стержня под действием сосредоточенных изгибающих моментов [14]

$$f = \frac{Ml^2}{8EI_z} = \frac{95,8 \cdot 350^2}{8 \cdot 2,16 \cdot 10^5 \cdot 3430} =$$

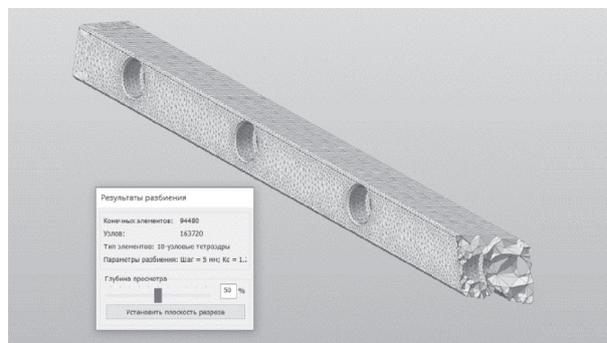
$$= 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 1,98 \text{ мкм},$$

где l — длина направляющей, $l = 350$ мм (см. рис. 1); E — модуль упругости стали 20Х, $E = 2,16 \cdot 10^5$ МПа; I_z — главный центральный момент инерции поперечного сечения, $I_z = 3430 \text{ мм}^4$.

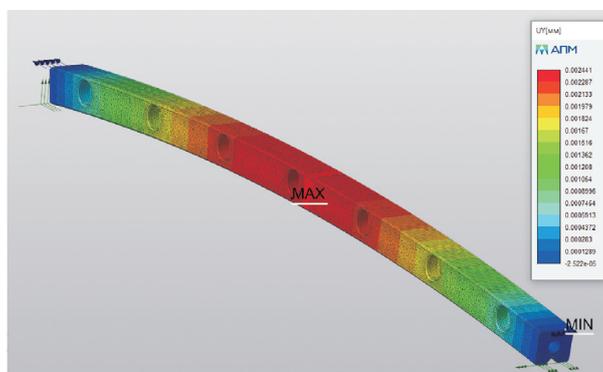
Для вычисления максимального прогиба направляющей использовали приложение APM FEM КОМПАС-3D, расчет проводили по 3D-модели со всеми конструктивными особенностями формы поперечного сечения, проточками и отверстиями (см. рис. 1). Максимальный прогиб направляющей под действием ОН определяли при моделировании шарнирно неподвижного опирания по нижнему ребру левого торца направляющей и шарнирно подвижного опирания по нижнему ребру правого торца (рис. 3, в) с приложением линейно распределенной растягивающей нагрузки по верхним ребрам торцов, соответствующей расчетному изгибающему моменту $M = 95,8 \text{ Н} \cdot \text{мм}$



а



б



в

Рис. 3. Результаты моделирования максимального прогиба направляющей, возникающего под действием ОН при плоском шлифовании ее граней:
 а — расчетная схема направляющей; б — разбиение на конечные элементы;
 в — распределение максимального прогиба по направляющей

(рис. 3, а). Интенсивность этой равномерно распределенной нагрузки

$$q = \frac{M}{0,5hb} = \frac{95,8}{0,5 \cdot 15 \cdot 14} = 0,912 \text{ Н/мм.}$$

Разбиение на конечные элементы (10-узловые тетраэдры) и полученное распределение максимального прогиба по направляющей приведены на рис. 3, б и в. Максимальный прогиб направлен нормально поверхности стола станка вертикально вверх и равен 2,44 мкм (см. рис. 3, в). Расхождение с данными аналитического расчета составило 18,8 % из-за снижения изгибной жесткости направляющей при учете конструктивных особенностей формы поперечного сечения, проточек и отверстий.

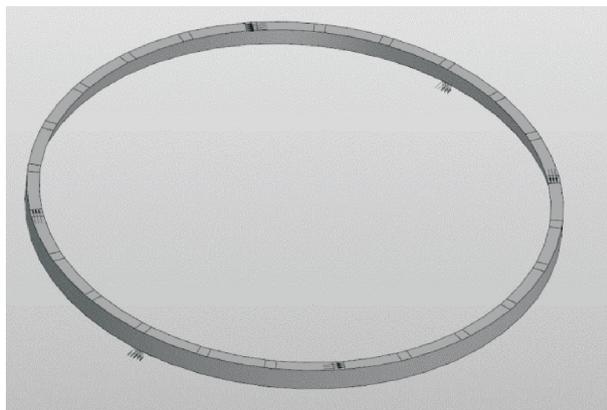
Максимальные прогибы, возникающие под действием ОН при шлифовании торцовых поверхностей заготовки типа кольца малой кривизны, исследовали на примере наружного кольца конического роликового подшипника У-7866А.01 производства Филиала ОАО «ЕПК Самара» (рис. 4, а) [5]. Геометрические размеры кольца: ширина $C = 18$ мм; наружный диаметр

$D = 375$ мм; внутренний диаметр $D_1 = 357,5$ мм; угол конусности $\beta = 15^\circ$. Форма поперечного сечения кольца — трапециевидальная: толщина верхнего торца $b_v = 8,8$ мм, толщина нижнего торца $b_n = 3,9$ мм, главный центральный осевой момент инерции $I_z = 3001 \text{ мм}^4$, координата центра тяжести от верхнего обрабатываемого торца $y_c = 7,86$ мм.

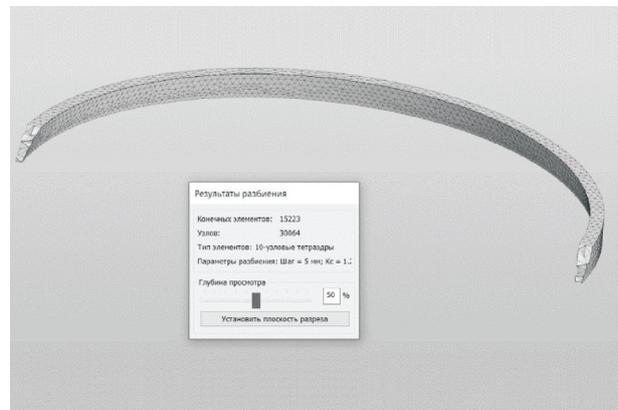
Изгибающий момент, возникающий под действием ОН в поверхностном слое глубиной $a = 0,3$ мм относительно главной центральной оси поперечного сечения z , определяли (пренебрегая малой кривизной оси кольца) по формуле

$$M = \int_0^a \sigma(y)(y_c - y)bdy = \int_0^{0,3} \sigma(y)(7,86 - y) \cdot 8,8 dy = 0,923(7,86 - 0,232) \cdot 8,8 = 61,96 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

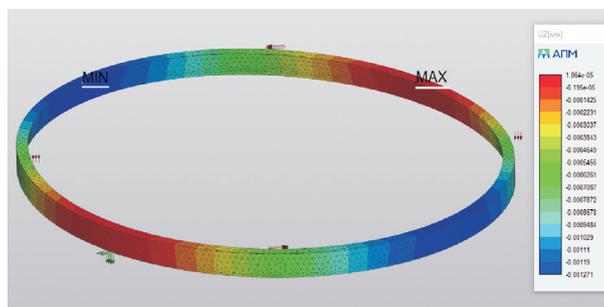
Для вычисления максимального прогиба кольца использовали приложение АРМ FEM КОМПАС-3D, расчет проводили по 3D-модели со всеми конструктивными особенностями формы кольца (см. рис. 4, а). Расчетная схема нагружения: закрепление по нижней поверхности



а



б



в

Рис. 4. Результаты моделирования максимального прогиба кольца, возникающего под действием ОН при плоском шлифовании его торцов:

а — расчетная схема кольца; б — разбиение кольца на конечные элементы; в — распределение прогиба по кольцу

сти в двух диаметрально расположенных линейных зонах (одна зона контакта — жесткая заделка по толщине нижней поверхности, другая — подвижная опора с ограничением только вертикальных перемещений); нагрузка на верхней поверхности в четырех зонах под углом 45° от опорных закреплений, линейно распределенная по толщине верхнего торца b_v и тангенциально направленная, соответствующая расчетному изгибающему моменту $M = 61,96$ Н·мм. Интенсивность этой равномерно распределенной нагрузки

$$q = \frac{M}{y_c b} = \frac{61,96}{7,86 \cdot 8,8} = 0,896 \text{ Н/мм.}$$

Разбиение на конечные элементы (10-узловые тетраэдры) кольца показано на рис. 4, б. Максимальный прогиб (осевое перемещение, нормальное поверхности стола станка) кольца под действием ОН при плоском шлифовании торцов составил 1,29 мкм (рис. 4, в).

Экспериментальные измерения отклонения плоскостности кольца цифровым индикатором часового типа ИЧЦ10-0,001 (ГОСТ 577-68 [15]) на магнитной стойке подтвердили полученный результат с относительной погрешностью 9,8 %.

Максимальные прогибы деталей малой жесткости, возникающие под действием ОН при плоском шлифовании, определяли для оценки целесообразности их учета при нахождении оптимальных режимов и условий за-

крепления заготовок с целью обеспечения требуемой неплоскостности [5, 9]. Требуемый допуск плоскостности обработанной поверхности направляющей роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350 равен 7 мкм (см. рис. 1). Полученный максимальный прогиб направляющей под действием ОН (2,44 мкм) соизмерим с допуском и должен учитываться при выборе режимов обработки и условий закрепления заготовки.

Определенный путем моделирования максимальный прогиб образцов кольца (1,29 мкм) оказался соизмеримым с достижимой неплоскостностью при шлифовании (3 мкм).

Выводы

1. Показано, что расчетные максимальные прогибы направляющей (2,44 мкм) и кольца (1,29 мкм) соизмеримы с достижимой неплоскостностью при плоском шлифовании (3 мкм), и их необходимо учитывать при определении оптимальных режимов и условий закрепления заготовок малой жесткости.

2. В условии обеспечения требуемой неплоскостности обработанной поверхности величина максимального прогиба заготовки, возникающего под действием ОН при плоском шлифовании, должна быть добавлена к его допускаемому значению [9].

Литература

- [1] Chen W., Sun Y. Design of precision linear drives. In: Precision machines. Springer, 2020, pp. 131–154, doi: http://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_4
- [2] Акулов П.А., Петрешин Д.И. Обоснование выбора направляющих для автоматизированного испытательного оборудования. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2019, № 3, с. 1–10.
- [3] Лурье А.М. *Рельсовые направляющие качения*. Москва, Сервотехника, 2006. 50 с.
- [4] Бушуев В.В., ред. *Металлорежущие станки*. Т. 1. Москва, Машиностроение, 2023. 608 с.
- [5] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Sarazov A.V. Optimization of conditions for non-rigid workpieces flat grinding by elastic deformations controlling. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 206, pp. 1173–1178, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.613>
- [6] Chigirinskiy J.L., Nesterenko P.S., Smirnova E.N. 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: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.212>
- [7] Суслов А.Г., ред. *Справочник технолога*. Москва, Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
- [8] Cai Y., Zhang Z., Xi X. et al. A deformation control method in thin-walled parts machining based on force and stiffness matching via cutter orientation optimization. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2023, vol. 145, no. 3, pp. 1–22, doi: <http://doi.org/10.1115/1.4056073>

- [9] Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. Algorithm of determination of optimal conditions for low-rigidity prismatic workpieces flat grinding. *Key Eng. Mater.*, 2022, vol. 910, pp. 138–143, doi: <https://doi.org/10.4028/p-9542bg>
- [10] Андрюкова Е.А., Буркин С.П., Шимов Г.В. *Остаточные напряжения в металлопродукции*. Москва, Юрайт, 2025. 247 с.
- [11] Носов Н.В., Сысолятин В.Ю., Сальников И.Н. Исследование остаточных напряжений при плоском шлифовании прерывистым абразивным кругом. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2023, т. 25, № 4–2, с. 258–261, doi: [https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4\(2\)-258-261](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-258-261)
- [12] Валетов В.А. Аппаратура СИТОН неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния в металлах и сплавах и ее эффективное применение. *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, 2005, № 4, с. 265–269
- [13] Зайдес С.А., ред. *Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования*. Т. 2. Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2022. 584 с.
- [14] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. *Расчет на прочность деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1993. 639 с.
- [15] Индикаторы ИЧЦ 10 — 25 ГОСТ. *wikselen.ru: веб-сайт*. URL: <https://www.wikselen.ru/shop/indikatory-tsifrovyye-indikator-i-electro-otechestvennie/?ysclid=maqhi8ii2959362802> (дата обращения: 20.05.2025).

References

- [1] Chen W., Sun Y. Design of precision linear drives. In: *Precision machines*. Springer, 2020, pp. 131–154, doi: http://doi.org/10.1007/978-981-13-0381-4_4
- [2] Akulov P.A., Petreshin D.I. Justification of the selection of guides for automated test equipment. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2019, no. 3, pp. 1–10. (In Russ.).
- [3] Lurye A.M. *Relsovye napravlyayushchie kacheniya* [Rolling rail guides]. Moscow, Servotekhnika Publ., 2006. 50 p. (In Russ.).
- [4] Bushuev V.V., ed. *Metallorazhushchye stanki*. Т. 1 [Metal cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2023. 608 p. (In Russ.).
- [5] Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Sarazov A.V. Optimization of conditions for non-rigid workpieces flat grinding by elastic deformations controlling. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 206, pp. 1173–1178, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.613>
- [6] Chigirinskiy J.L., Nesterenko P.S., Smirnova E.N. 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: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.973.212>
- [7] Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [Technologist's handbook]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p. (In Russ.).
- [8] Cai Y., Zhang Z., Xi X. et al. A deformation control method in thin-walled parts machining based on force and stiffness matching via cutter orientation optimization. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2023, vol. 145, no. 3, pp. 1–22, doi: <http://doi.org/10.1115/1.4056073>
- [9] Tyshkevich V.N., Sarazov A.V., Orlov S.V. Algorithm of determination of optimal conditions for low-rigidity prismatic workpieces flat grinding. *Key Eng. Mater.*, 2022, vol. 910, pp. 138–143, doi: <https://doi.org/10.4028/p-9542bg>
- [10] Andryukova E.A., Burkin S.P., Shimov G.V. *Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii* [Residual stresses in metal products]. Moscow, Yurayt Publ., 2025. 247 p. (In Russ.).
- [11] Nosov N.V., Sysolyatin V.Yu., Salnikov I.N. Investigation of residual stresses during flat grinding with an intermittent abrasive wheel. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2023, vol. 25, no. 4–2, pp. 258–261, doi: [https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4\(2\)-258-261](https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-258-261) (in Russ.).
- [12] Valetov V.A. Аппаратура СИТОН неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния в металлах и сплавах и ее эффективное применение. *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО* [Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.], 2005, no. 4, pp. 265–269. (In Russ.).

- [13] Zaydes S.A., ed. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya*. T. 2 [Handbook of surface plastic deformation processes. Vol. 2]. Irkutsk, Izd-vo IRNITU Publ., 2022. 584 p. (In Russ.).
- [14] Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost detaley mashin* [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 639 p. (In Russ.).
- [15] Indikatory IChTs 10 — 25 GOST [Indicators ICHTS 10 - 25 GOST]. *wikselen.ru: website*. URL: <https://www.wikselen.ru/shop/indikatory-tsifrovyye-indikatoro-electro-otchestvennie/?ysclid=maqhi8ii2959362802> (accessed: 20.05.2025). (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.06.2025

Информация об авторах

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

НОСЕНКО Владимир Андреевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Российская Федерация, ул. Энгельса, д. 42а, e-mail: vladimir.nosenko2014@yandex.ru).

САРАЗОВ Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Механики, физики и математики». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Российская Федерация, ул. Энгельса, д. 42а, e-mail: sarazov_av@mail.ru).

ОРЛОВ Сергей Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механики, физики и математики». Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (404121, Волжский, Российская Федерация, ул. Энгельса, д. 42а, e-mail: seregy.orlov@mail.ru).

Information about the authors

TYSHKEVICH Vladimir Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanics, Physics and Mathematics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, 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 Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: vladimir.nosenko2014@yandex.ru).

SARAZOV Alexander Vasilyevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Physics and Mathematics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: sarazov_av@mail.ru).

ORLOV Sergey Vasilyevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Physics and Mathematics. Volzhsky Polytechnic Institute (Branch), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University (404121, Volzhsky, Russian Federation, Engels St., Bldg. 42a, e-mail: seregy.orlov@mail.ru).

КИСЕЛЕВ Евгений Степанович — доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии в машиностроении». ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела. Департамент научных исследований (432027, Ульяновск, Российская Федерация, ул. Северный Венец, д. 32, e-mail: kec.ulstu@mail.ru).

KISELEV Evgeny Stepanovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University; Leading Researcher, Research Department. Department of Scientific Research (432027, Ulyanovsk, Russian Federation, Severny Venets St., Bldg. 32, e-mail: kec.ulstu@mail.ru).

УНЯНИН Александр Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры Инновационные технологии в машиностроении. ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (432027, Ульяновск, Российская Федерация, ул. Северный Венец, д. 32, e-mail: a_un@mail.ru).

UNYANIN Alexander Nikolayevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Technical University (432027, Ulyanovsk, Russian Federation, Severny Venets St., Bldg. 32, e-mail: a_un@mail.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Тышкевич В.Н., Носенко В.А., Саразов А.В., Орлов С.В., Киселев Е.С., Унянин А.Н. Влияние остаточных напряжений на упругие деформации деталей малой жесткости при шлифовании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 1, с. 26–34.

Please cite this article in English as:

Tyshkevich V.N., Nosenko V.A., Sarazov A.V., Orlov S.V., Kiselev E.S., Unyanin A.N. The effect of residual stresses on elastic deformations of low-stiffness parts during grinding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 1, pp. 26–34.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Точение. Стругание.
Долбление. Протягивание»**

Автор Д.В. Виноградов

Описаны виды обработки резанием: точение, строгание, долбление и протягивание. Рассмотрены разновидности способов обработки и их особенности, преимущества и недостатки. Приведены краткие сведения о станках, технологических и инструментальных приспособлениях, а также используемых режущих инструментах. Даны формулы для расчета основного технологического времени обработки. Представлена информация для проектирования операций обработки резанием — определения формообразующих движений, выполнения схемы обработки, выбора металлорежущего оборудования, приспособлений и режущих инструментов.

Для студентов направлений подготовки специалистов 15.05.01/02 «Проектирование технологических машин и комплексов — Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении», а также для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02/04 «Технологические машины и оборудование — Процессы и технологии механической и физико-технической обработки».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>