

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.735.016.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ СТАТОРОВ (РОТОРОВ) КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ И ПОДЛОЖЕК ДЛЯ МИКРОСХЕМ НА СТАНКЕ МОДЕЛИ 3102А

Колодяжный Д.Ю.¹, Шабалин Д.Н.², Ларионов Е.О.², Козарь И.И.²

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

²Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы, возникающие при обработке керамических радиодеталей, так как к ним предъявляются высокие требования по точности размеров и формы, шероховатости и состоянию поверхностного слоя. Процессы шлифования технической керамики недостаточно полно описаны в литературе, сведений о режимах резания, свойствах абразивных кругов также крайне мало. В связи с этим и были проведены эксперименты по шлифованию деталей.

Ключевые слова: шлифование, керамика, точность размеров и формы

© Колодяжный Д.Ю., Шабалин Д.Н., Ларионов Е.О., Козарь И.И., 2026

Для цитирования

Экспериментальное исследование плоского алмазного шлифования статоров (роторов) конденсаторов переменной емкости и подложек для микросхем на станке модели 3102А / Колодяжный Д.Ю., Шабалин Д.Н., Ларионов Е.О., Козарь И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 164-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE DIAMOND GRINDING OF STATORS (ROTORS) OF ADJUSTABLE CAPACITORS AND MICROCHIP SUBSTRATES ON A MODEL Z102A GRINDING MACHINE

Kolodyazhnyi D.Yu.¹, Shabalin D.N.², Larionov E.O.², Kozar I.I.²

¹ Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

² Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper considers issues arising in the machining of ceramic radio components, which are subject to stringent requirements for dimensional and geometric accuracy, surface roughness, and surface-layer condition. The grinding processes of technical ceramics have not been sufficiently described in the literature, and there is very limited information on cutting parameters and the properties of abrasive wheels. Therefore, experiments have been conducted to investigate the grinding of these components.

Keywords: grinding, ceramics, dimensional and geometric accuracy

For citation

Kolodyazhnyi D.Yu., Shabalin D.N., Larionov E.O., Kozar I.I. Experimental Study of Surface Diamond Grinding of Stators (Rotors) of adjustable Capacitors and Microchip Substrates on a Model Z102A Grinding Machine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 164-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-164-170>

Введение

При механической обработке керамических радиодеталей наиболее трудоемкими являются роторы и статоры подстроечных и переменных конденсаторов и подложки микросхем. Данный вопрос давно не рассматривался в литературе в связи со спецификой обработки [6, 8–10]. Это объясняется тем, что к ним предъявляются высокие требования по точности размеров и формы, шероховатости и состоянию поверхностного слоя. Вместе с тем потребность народного хозяйства в этих типах керамических деталей значительна, поэтому работы в области рационализации их технологии изготовления являются актуальными [4].

Сравнительно миниатюрные размеры (по толщине) этих изделий, высокая точность обуславливают сложность их изготовления, а следовательно, и трудоемкость. Изготовление этих изделий в данное время производится в экспериментальных условиях на оборудовании и по технологии, не соответствующим требованиям массового производства. Так, трудоемкость механической обработки (шлифование, доводка, полирование) подложки размерами 20×16×0,5 мм и пластин статора составляет ~ 23% от штучного времени. Остальное время (77%) затрачивается на крепление, съем, контроль и прочие вспомогательные операции. Некоторые рекомендации приведены в [1]. Похожие вопросы в свое время рассматривались Филимоновым Л.Н. [7].

Технология изготовления керамических заготовок, очевидно, также нуждается в глубоком анализе, так как большие припуски на обработку (1,5–2 мм) из-за их деформированного состояния вызывают увеличение объема механической обработки.

В настоящее время в производстве используется большое количество масс керамики с различными физико-механическими свойствами, влияющими на обрабатываемость и на состояние поверхностного слоя шлифуемых изделий (сколы, вырывы, микротрещины и др.), что снижает качество выпускаемой продукции. Методика разрушения различных типов керамики рассмотрена в работе Никиткова Н.В. [4].

Очевидно, что в дальнейшем на основании накопленных экспериментальных данных об обрабатываемости потребуется ограничение числа марок масс.

Анализ схемы резания на станке 3102А

В существующем исполнении станок 3102А выполнен с координатами $X \cong 220$ мм, $y \cong 130$ мм положения осей шпинделей относительно оси кассеты (рис. 1). При такой схеме станка при шлифовании осуществляется нелинейная нормальная подача (см. рис. 1, кривая 1), изменяющаяся от 3,3 мкм/с в начале обработки до 33 мкм/с в конце обработки. При расположении кругов относительно кассеты по схеме II обеспечивается линейная нормальная подача, равная ≈ 20 мкм/с. Как видно из графика (кривая 1), интенсивное нарастание нормальной подачи осуществляется примерно с середины зоны резания, начиная с 9-й секунды. Из теории шлифования известно, что для получения высокого качества поверхности в конце обработки необходимо предусматривать затухающую подачу и выхаживание. Этим условиям схема станка 3102А не удовлетворяет.

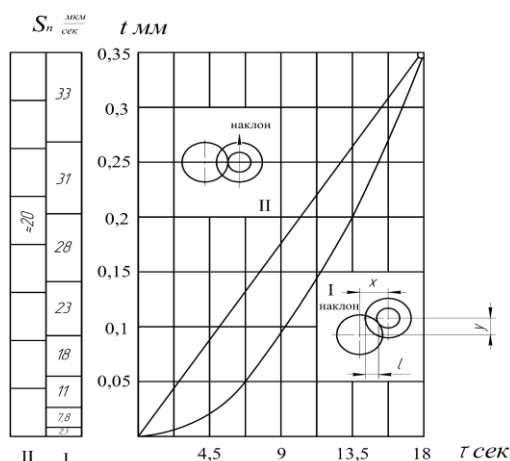
В используемой схеме настройки станка на величину снимаемого припуска на расстоянии l (см. рис. 1) устанавливаются концевые меры с перепадом раз-

меров, равным припуску, например 0,35 мм. При этом угол наклона шпинделя равен

$$\tan \alpha = \frac{t}{l} = \frac{0,35}{70} = 0,005 \alpha = 16'.$$

При шлифовании деталей из-за наклона шлифовального круга образуется клиновидность. Перепад размеров толщины деталей из-за клиновидности в пределах диаметра подложки 25 мм равен

$$\Delta = 25 \cdot \tan \alpha = 25 \cdot 0,005 = 0,125 \text{ мм.}$$



Условия эксперимента			
Режимы резания			Марка шлифов. круга
$n_{\text{об}}$	$v_{\text{ш}}$	t	
3000	0,6	0,35	АСП10М1

Рис. 1. Результаты эксперимента после настройки станка

Fig. 1. Experimental results after machine setup

В процессе исследований при условиях, указанных на рис. 1, установлено, что примерно в середине зоны резания осуществляется проворот подложки относительно своей оси. Он сопровождается характерным шумом. При повороте подложки на 180° относительно окружной подачи из-за вращения кассеты почти мгновенно добавляется величина $\Delta = 0,125$ мм. Естественно, это должно привести к возникновению сколов, трещин и ухудшению качества обрабатываемой поверхности.

Методика проведения исследований

Исследование процесса чернового шлифования производилось на станке 3102А, имеющем скорость резания 47 м/с при диаметре алмазного круга 300 мм. Были использованы образцы из керамики с различными физико-механическими свойствами: Т-150, ТЛ-75, И-65, Ф-58. Размеры образцов: диски $D \times d \times t_0 = 7,5 \times 2 \times 1,2$, пластины $B \times b \times t = 17 \times 17 \times 2, 24 \times 30 \times 2 \div 4, 30 \times 48 \times 2 \div 4$.

При проверке результатов работы применялась методика, приведенная в [2]. Обработка деталей на станке 3102А производилась при двух схемах крепления заготовок на металлической подложке: 1) при помощи клея; 2) силами резания. Наклеенные на под-

ложки детали предварительно шлифовались на станке ЗГ71М в один уровень.

С целью расширения технологических возможностей станка проведена модернизация, позволившая получить скорости резания 47, 35, 23,5 м/с при числе оборотов шпинделя соответственно 3000, 2250, 1500 об/мин. Режущий инструмент – алмазный круг АСП10М1-150, $300 \times 50 \times 200 \times 3$.

Шероховатость поверхности после шлифования измерялась на профилографе-профилометре «Калибр» и оценивалась по R_a точность размеров и формы индикатором с ценой деления 0,01 мм, а величина сколов – на микроскопе МБС-1 [3].

Результаты экспериментальных исследований

На первом этапе изучалось влияние скорости шлифования на шероховатость поверхности и на образование сколов в зависимости от физико-механических свойств керамики.

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие влияние числа оборотов (скорости резания) на шероховатость.

Выявлено, что увеличение скорости резания не приводит к заметному снижению шероховатости по R_a 0,4–3,2 мкм.

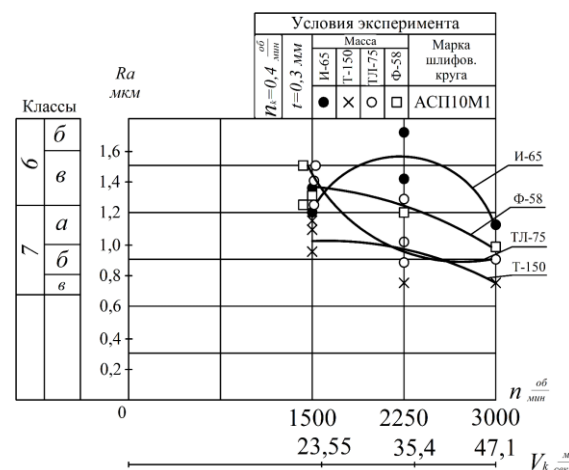


Рис. 2. Результаты по исследованию седловидности

Fig. 2. Results of the study of concavity

Рис. 3 иллюстрирует образование сколов на различных керамиках в зависимости от скорости шлифования. Оптимальной является скорость 35 м/с.

На рис. 4–6 приведены опытные (а) и теоретические (б) кривые нормального распределения размеров деталей с подложкой, характеризующие точность настройки станка. При существующем способе настройки на величину снимаемого припуска = 0,3 мм погрешность настройки.

Вариация размеров толщины деталей с подложкой 0,1 мкм. Погрешность обработки не превышает 0,03–0,05 мм. Точность размеров определялась в соответствии с [5].

Второй этап исследований посвящен выявлению влияния способов крепления деталей на образование сколов и точность формы обработанной поверхности.

При этом использовались оптимальные режимы резания, полученные в первом этапе исследований.

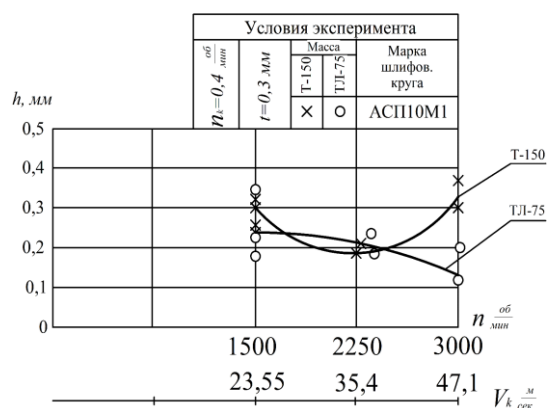


Рис. 3 Результаты по исследованию седловидности
Fig. 3. Results of the study of concavity

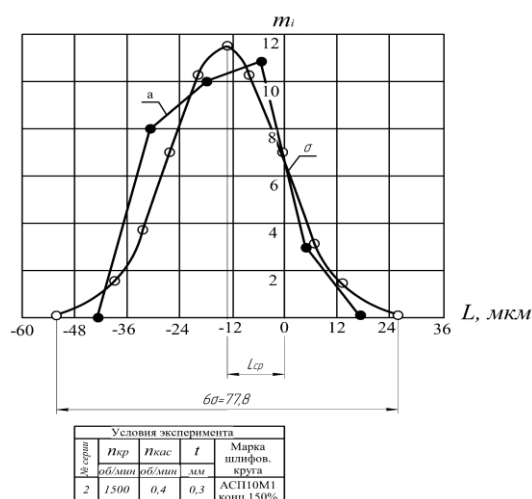


Рис. 4. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 4. Results of the study of concavity

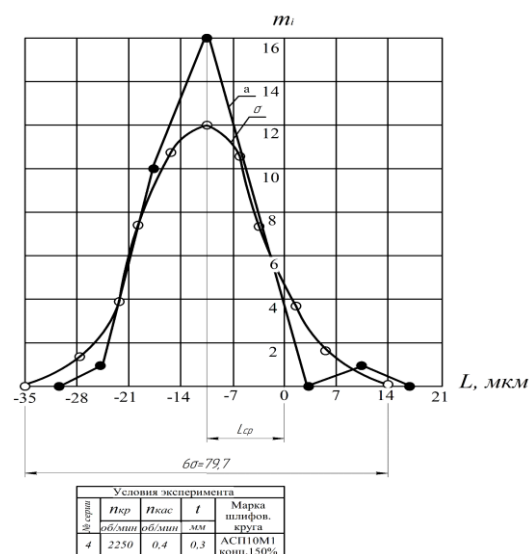


Рис. 5. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 5. Results of the study of concavity

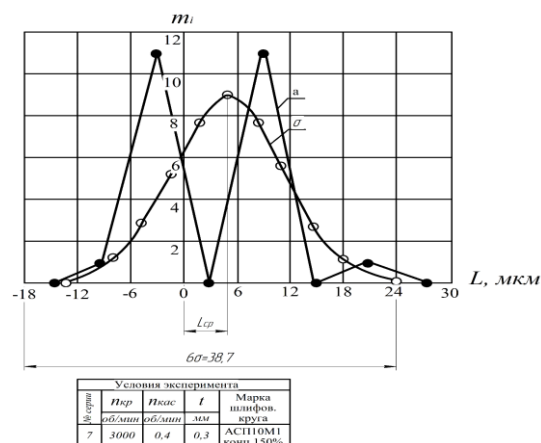


Рис. 6. Результаты по исследованию седловидности
Fig. 6. Results of the study of concavity

На рис. 7–9 представлены различные схемы крепления подложек с деталями, где 1 – кассета, 2 – шлифовальный круг, 3 – стол, 4 – подложка с заготовками. Исследования влияния способов крепления на образование сколов показали, что наилучшим является схема расположения грибовой подложки на кассете, скользящей по столу нижнего шпинделя. При этом достигается шероховатость Ra 0,2–0,8 мкм. Кроме того, величина сколов зависит от физико-механических свойств керамики. С увеличением σ_n сколы уменьшаются.

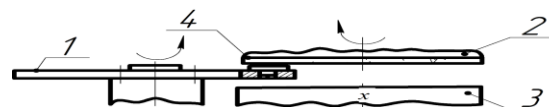


Рис. 7. Упругое крепление грибовой подложки
Fig. 7. Elastic mounting of the mushroom-shaped substrate

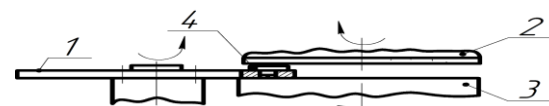


Рис. 8. Жесткое замыкание кассеты со столом
Fig. 8. Rigid clamping of the cassette to the bench

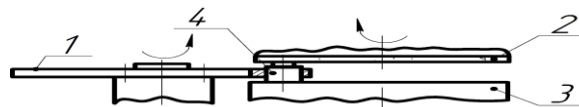


Рис. 9. Жесткое замыкание обычной подложки со столом
Fig. 9. Rigid clamping of the conventional substrate to the bench

С целью уменьшения погрешности формы были исследованы две схемы шлифования:

- 1) снятие припуска за один проход и три прохода выжигивания каждый раз с поворотом детали на 90° ;
- 2) снятие припуска за четыре прохода с постепенным уменьшением глубины резания.

Полученные результаты по исследованию седловидности приведены на рис. 2–6 и в таблице.

Таблица. Результаты по исследованию седловидности
Table. Results of the study of concavity

Рекомендуемая технологическая схема операции предварительного шлифования на станке модели 3102А		РТМ-1
Элементы	Ротор-статор	Подложки для микросхем
Предварительная операция	Сортировка по размерам	Шлифования в один уровень на станке 3Г71М
Припуск на обработку, мм	0,6	1,0
Способ крепления заготовки	Наклейка на подложку по 4 шт.	Наклейка на подложку по 1 шт.
Характеристика и размеры шлифовального круга	АСР10М1-150	300×50×200×3 мм
Настройка на размер за счет поворота шпиндельной бабки	По мерным плиткам	
Режимы шлифования:		
– число оборотов круга, об/мин		2250
– окружная скорость круга, м/с		35,4
Число оборотов кассеты, об/мин		0,4
Глубина шлифования, мм		0,3–0,35 *
Достижимая точность, мм		0,03–0,05
Погрешность формы (седловидность), мм		
– после 4-х проходов с поворотом детали		0,02–0,025
– после 4-х проходов с постепенным уменьшением глубины резания		0,02–0,025
Шероховатость поверхности, класс чистоты		8–9

* Для масс И-65; Ф-58; ТМ-14; ЦМ-4, $t = 0,5–0,7$ мм.

Влияние способов крепления на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 10**.

Результаты влияния размеров детали на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 11**.

Результаты экспериментов по влиянию глубины резания на точность формы (седловидность) приведены на **рис. 12**.

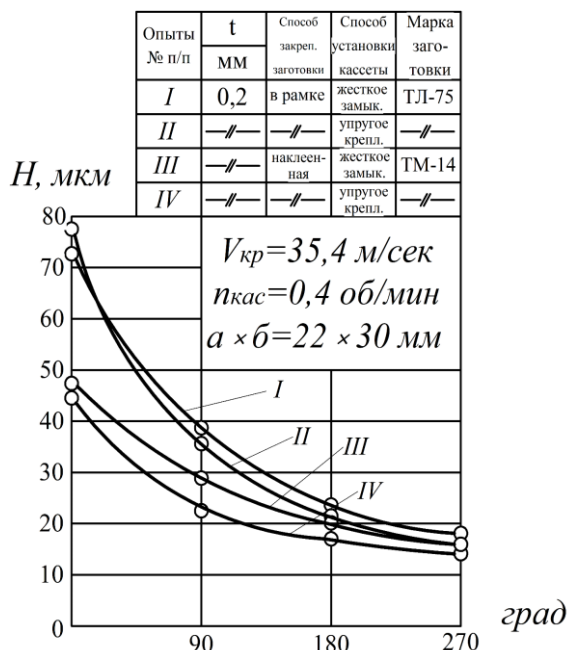


Рис. 10. Влияние способов крепления на точность формы (седловидность)
Fig. 10. Effect of mounting methods on form accuracy (concavity)

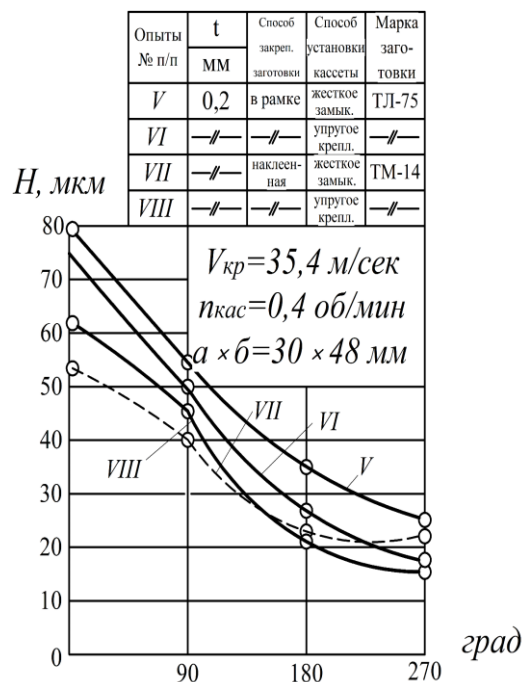


Рис. 11. Влияние размеров детали на точность формы (седловидность)
Fig. 11. Effect of component dimensions on form accuracy (concavity)

Результаты экспериментов по влиянию глубины резания на точность формы (седловидность) при постоянной круговой подаче приведены на **рис. 13**.

Результаты экспериментов по влиянию круговой подачи на точность формы (седловидность) с изменением глубины резания приведены на **рис. 14**.

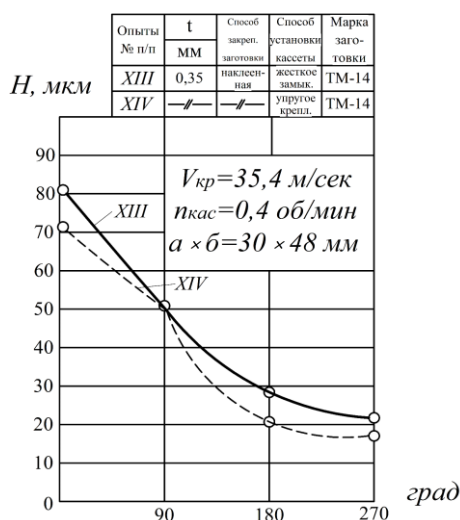


Рис. 12. Влияние глубины резания на точность формы (седловидность)

Fig. 12. Effect of grinding depth on form accuracy (concavity)

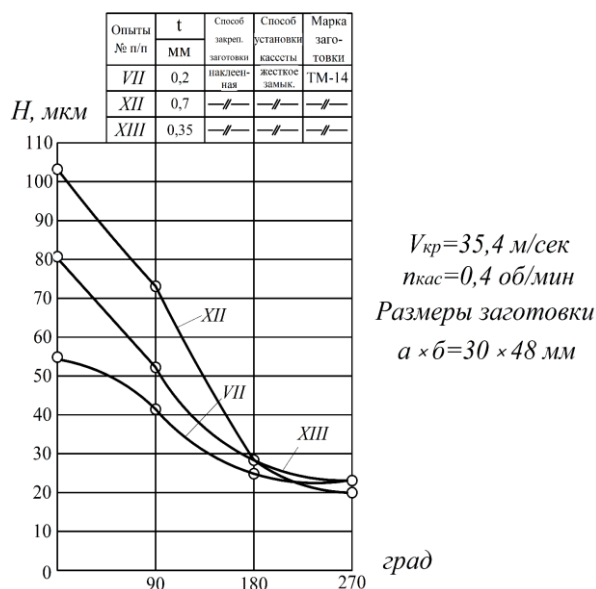


Рис. 13. Влияние глубины резания на точность формы (седловидность) при постоянной круговой подаче

Fig. 13. Effect of grinding depth on form accuracy (concavity) at a constant peripheral feed rate

Выводы

Как видно из графиков, шлифование по первой схеме приводит к седловидности не более 19 мкм, по второй схеме 20–23 мкм. С этой точки зрения обе схемы примерно равноценны. Кроме того, величина седловидности зависит от габаритов шлифуемых деталей (см. рис. 11).

По результатам исследований составлены руководящие технические материалы (РТМ-1) по шлифованию деталей на станке 3102А.

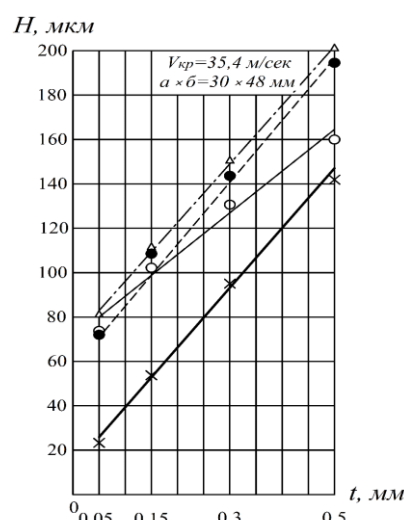


Рис. 14. Влияние круговой подачи на точность формы (седловидность) с изменением глубины резания

Fig. 14. Effect of peripheral feed rate on form accuracy (concavity) with varying grinding depth

Список источников

1. Шлифовальные и режущие инструменты на основе алмаза и нитрида бора в машиностроении: учеб. пособие / А.П. Гаршин, Т.М. Связкина, С.М. Федотова, А.С. Вольфсон, Н.А. Молчанов; под общ. ред. проф. А.П. Гаршина. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 311 с.
2. Шабалин Д.Н., Никитков Н.В., Ковеленов Н.Ю. Математическое моделирование в машиностроении: учеб. пособие. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 218 с.
3. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Текстура поверхности и её измерения. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 265 с.
4. Никитков Н.В. Решение проблемы изготовления высококачественных плоскостных деталей из конструкционной керамики: дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1984.
5. Технические измерения в машиностроительном производстве. Лабораторный практикум: учеб. пособие / И.И. Козарь Т.А. Ларионова, С.А. Любомудров и др. СПб.: Политех-Пресс, 2024. 178 с.
6. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. СПб.: Политех-Пресс, 2022. 188 с.
7. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / под ред. В.И. Муцянка. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 109 с.
8. Наерман М.С. Справочник молодого шлифовщика. М.: Высшая школа, 1985. 207 с.
9. Кашук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.

10. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.

References

1. Garshin A.P., Svyazkina T.M., Fedotova S.M., Volfson A.S., Molchanov N.A. *Shlifovalnye i rezhushchie instrumenty na osnove almaza i nitrída bora v mashinostroenii: ucheb. posobie* [Diamond and boron nitride based grinding and cutting tools in mechanical engineering: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2020, 311 p. (In Russ.)
2. Shabalin D.N., Nikitkov N.V., Kovelonov N.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie v mashinostroenii: ucheb. posobie* [Mathematical modeling in mechanical engineering: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2020, 218 p. (In Russ.)
3. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. *Tekstura poverkhnosti i ee izmereniya. Sherokhovatost, volnistost, profil, topografiya* [Surface texture and its measurement. Roughness, waviness, profile, topography]. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2018, 265 p. (In Russ.)
4. Nikitkov N.V. *Reshenie problemy izgotovleniya vysokokachestvennykh ploskostnykh detalei iz konstruksionnoi keramiki* [Solving the problem of manufacturing high-quality flat parts from structural ceramics. Doctoral dissertation]. Leningrad, 1984.
5. Kozar I.I., Larionova T.A., Lyubomudrov S.A., et al. *Tekhnicheskie izmereniya v mashinostroitel'nom proizvodstve. Laboratornyi praktikum: ucheb. posobie* [Technical measurements in mechanical engineering production. Laboratory workshop: Textbook]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2024, 178 p. (In Russ.)
6. Kremen Z.I., Yurev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg: Politekh-Press, 2022, 188 p. (In Russ.)
7. Filimonov L.N. *Ploskoe shlifovanie* [Surface grinding]. 3rd ed., revised and supplemented. Edited by V.I. Mutsyanko. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1985, 109 p. (In Russ.)
8. Naerman M.S. *Spravochnik mladogo shlifovshchika* [Young grinder's handbook]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 207 p. (In Russ.)
9. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.B. *Spravochnik shlifovshchika* [Grinder's handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 480 p. (In Russ.)
10. Orlov P.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detalei metodami dovodki* [Technological quality assurance of parts by finishing methods]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 384 p. (In Russ.)

Поступила 02.03.2026; принята к публикации 01.09.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 02/03/2026; revised 01/09/2026; published 30/09/2026

Колодяжный Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, проректор по научной деятельности, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: kolod@mail.ru

Шабалин Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: shadmit@yandex.ru

Ларионов Евгений Олегович – старший преподаватель Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: beg3mot91@gmail.com

Козарь Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения, Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: kii49@yandex.ru

Dmitry O. Kolodyazhnyi – DrSc (Eng.), Vice-Rector for Research, Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russia.
Email: kolod@mail.ru

Dmitry N. Shabalin – PhD (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: shadmit@yandex.ru

Evgeny O. Larionov – Senior Lecturer of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: beg3mot91@gmail.com

Ivan I. Kozar – PhD (Eng.), Associate Professor of the Higher School of Mechanical Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.
Email: kii49@yandex.ru