

## СКОРОСТНОЕ АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ПЛОСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Сидоров Д.Е., Колесов А.Г.*

*Севастопольский государственный университет, Севастополь*

**Ключевые слова:** керамика, шлифование, скорость резания, абразивный материал.

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние скорости шлифования керамических изделий на качество получаемой поверхности. Проводились исследования скоростного алмазного шлифования алмазными чашечными кругами плоских керамических деталей на примере подложек микросхем толщиной 1 мм. Определили производительность шлифования, оценивая объемом снятого материала в единицу времени, эффективную мощность, удельную энергию для съема единицы объема материала, шероховатость полученной поверхности, стойкость и износ кругов. Экспериментально установлено, что процесс шлифования с постоянной силой прижима круга характеризуется снижением производительности, так как по мере затупления алмазные зерна все меньше внедряются в обрабатываемый материал, и наступает момент, когда резание прекращается. Зернистость шлифовального круга 100/80 является предельной в связи с тем, что более крупнозернистые круги образуют сколы по краям деталей. Исследования показали, что эффективность алмазного шлифования керамических деталей может быть значительно повышена за счет увеличения скорости резания.

## HIGH-SPEED DIAMOND GRINDING OF FLAT CERAMIC PARTS OF ELECTRONIC DEVICES

*Sidorov D.E., Kolesov A.G.*

*Sevastopol State University, Sevastopol*

**Keywords:** ceramics, grinding, cutting speed, abrasive material.

**Abstract.** The article discusses the influence of the speed of grinding ceramic products on the quality of the resulting surface. The studies of high-speed diamond grinding with diamond cup wheels of flat ceramic parts were carried out on the example of microcircuit substrates with a thickness of 1 mm. We determined the productivity of grinding, estimating the volume of material removed per unit of time, effective power, specific energy for removing a unit volume of material, the roughness of the resulting surface, durability and wear of the wheels. It has been experimentally established that the process of grinding with a constant wheel pressing force is characterized by a decrease in productivity, since as the diamond grains get blunted, they are less and less embedded in the material being processed, and there comes a moment when the cutting stops. The 100/80 grinding wheel grit is marginal due to the fact that coarser-grained wheels form chips along the edges of the parts. Studies have shown that the efficiency of diamond grinding of ceramic parts can be significantly improved by increasing the cutting speed.

### Введение

Применение в машиностроении керамических конструкционных материалов обусловлено их специфическими эксплуатационными свойствами, которые сложно реализовать при использовании традиционных металлических материалов ставит новые задачи, связанные с их обработкой. Детали из керамических материалов нашли свое применение не только в машиностроении, но и в приборостроении, медицине, радиотехнике и т.д. В тоже время следует отметить, что, обладая высокими эксплуатационными свойствами в условиях трения, повышенных температур, наличии агрессивных сред и т.п., они плохо работают в условиях изгибающих, растягивающих и ударных нагрузок [1]. Эти особенности необходимо учитывать не только при эксплуатации, но и при механической обработке. Из-за высокой твердости после спекания наиболее распространенными процессами механической обработки является шлифование керамики и ее доводка. При шлифовании керамики используются алмазные шлифовальные круги с различной зернистостью и связкой. Особенность алмазной обработки керамики состоит в малом износе и высокой стойкости

инструмента. Известно, что себестоимость обработки керамики превышает стоимость обработки конструкционных сталей [1-7].

Технология обработки деталей из керамики является одним из ключевых вопросов при механической обработке. Изделия из керамики сочетают в себе характеристики материала, такие как твердость, хрупкость и трещиностойкость. При обработке необходимо изучение влияния этих свойств на готовые изделия в зависимости от силовых и тепловых воздействий. Оценка качества обработки керамики - это шероховатость поверхности, представляющая собой последовательность выступов и впадин. Впадина из-за хрупкости керамики может стать началом зарождения новой трещины.

Исследования, посвященные выявлению доминирующего фактора, вызывающего трещины в поверхностном слое шлифуемых заготовок из твердых хрупких материалов описаны в работе [7]. Показано, что они были реализованы путем сопоставления различных процессов шлифования установлен главный фактор образования поверхностных трещин на заготовках из керамики термический или силовой [8].

Обеспечению эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики посвящены исследования [8]. Автор исследует методы обеспечения эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики путем управления процессами в зоне обработки. Изучает влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при обработке высокотвердой керамики.

Для определения оптимальных режимов обработки применяют два метода: нормативный и расчетно-аналитический. В работе [9] использованы оба этих варианта при разработке режимов резания при шлифовании.

Методика назначения оптимальных режимов шлифования на основе области допустимых решений предполагает принимать максимальную производительность [10, 11]. При этом необходимо учитывать предельную шероховатость, требуемую точность обработки, максимальную температуру и максимальную глубину прижога.

В работе [12] предложена методика назначения режимов резания из условий эксплуатации, предъявляемых к изделиям, обеспечение прочности и параметров микрорельефа поверхностного слоя.

Тюрин А.Н. [13] предлагает назначать режимы шлифования кругами из сверхтвердых синтетических материалов с учетом оптимальных значений величины линейного износа зерен до момента их объемного полного разрушения или выпадения из связки.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение: на силу шлифования и допустимую скорость движения подачи инструмента влияют глубина резания, средний коэффициент трения между зерном и заготовкой, угол заделки зерна и прочность связки, прочность обрабатываемого материала, увеличение радиуса режущей кромки зерна по мере его затупления.

### **Материалы и методы исследований**

Состояние рабочей поверхности алмазных шлифовальных кругов определяется геометрической формой вершин зерен, их расположением и плотностью их распределения по глубине рабочего слоя инструмента. Износ зерен при шлифовании керамических изделий сопровождается значительным ростом сил резания, которые могут возрасти в 2-4 раза по сравнению с работой алмазных шлифовальных кругов (АШК) после правки. При увеличении сил шлифования увеличивается вероятность дефектности поверхностного слоя обрабатываемой детали. Таким образом, при достижении максимальной силы резания, которая определяется из условий обеспечения требуемых параметров качества изделия, необходимо осуществлять управляющие воздействия на рабочую поверхность инструмента, восстанавливая его режущую способность, т.е. производить правку АШК.

В лаборатории Политехнического института СевГУ проводились исследования скоростного алмазного шлифования кругами АЧК плоских керамических деталей. Экспериментальная установка создана на базе станка с круглым вращающимся столом и

вертикальной осью шпинделя модели ЛШ-381Ф2 (рис. 1). Используется схема шлифования с постоянной силой прижима круга к детали.

Для получения высоких скоростей шлифования применен электрошпиндель Ш-24/5, вращающийся со скоростью 24000 об/мин при номинальной частоте питающего напряжения 400 Гц и развивающейся мощностью до 5,5 кВт.

Окружная скорость алмазного круга диаметром 75 мм при частоте питания 390 Гц составляла 92 м/с. Регулирование скорости шлифования до 68 м/с производилось изменением частоты питающего напряжения. Заменой шпинделя на тип Ш-9/2 получали скорость 34 и 17 м/с.

Обрабатываемые детали – подложки микросхем размерами 63x50 мм (рис. 2) наклеиваются на стол станка диаметром 260 мм, образуя кольцеобразную поверхность. Титаносодержащая керамика имеет микротвердость 10 ГПа, высокоглиноземистая – 25 ГПа.

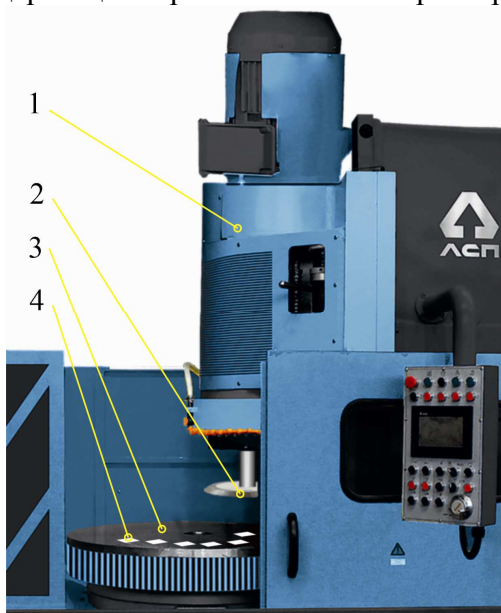


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – станок плоскошлифовальный; 2 – алмазный чашечный круг; 3 – круглый стол; 4 – обрабатываемые детали (подложки микросхем)

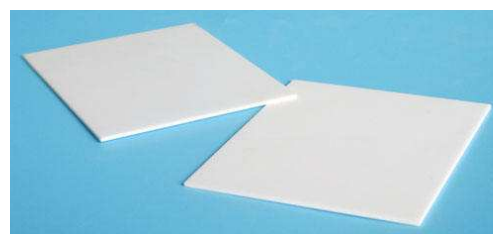


Рис. 2. Подложки микросхем

Весьма важным является выбор скорости вращения стола с деталями. Скорости 1-15 м/мин, характерные для обычных плоскошлифовальных станков, оказываются непригодными. Тангенциальные силы из-за глубокого врезания круга в детали при таких скоростях достигают больших значения, что приводит к вырывам на обрабатываемой поверхности деталей или к срыву деталей со стола. Эксперименты проводились при скоростях стола 2 м/с. Повышение скорости стола до 4 м/с вызывало появление заметных вибраций.

В экспериментах использовались круги АЧК 75x(3 и 5)x3 зернистостью от 40/28 до 100/80 на металлических связках М1 и М08 с концентрацией алмазов – 100%.

В качестве СОТС использовалась вода, подаваемая во внутреннюю поверхность круга через отверстия, просверленные во фланце. При таком способе подачи СОТС воздушный поток, создаваемый кругом, не препятствовал попаданию жидкости в зону шлифования. Однако, с увеличением скорости круга возрастает и доля мощности электрошпинделя, затрачиваемая на разбрызгивание СОТС. Так, на скорости 92 м/с при расходе воды 2 л/мин на это требовалось более 0,5 кВт.

В процессе исследований определялись производительность шлифования ( $Q$ ), оцениваемая объемом снятого материала в единицу времени ( $\text{см}^3/\text{мин}$ ), эффективная мощность ( $N$ ) в кВт и удельная энергия для съема единицы объема материала ( $\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{см}^3$ ), шероховатость поверхности ( $Ra$ ), стойкость и износ кругов.

Исследования проводились по факторному плану с аппроксимацией зависимостей степенными выражениями. Для уточнения уровней варьирования и для предварительной оценки характера зависимостей проводились однофакторные эксперименты. В плановых экспериментах повторяемость опытов трехкратная.

Приводим результаты такого эксперимента вида  $2^4$  с титаносодержащей керамикой ТЛ-75. Постоянные факторы: керамические образцы одной партии с общей площадью обработки  $220 \text{ см}^2$ , скорость стола – 2 м/с, связка кругов – металлическая М1, ширина кругов – 3мм. Переменные факторы: зернистость кругов  $d$ , определяемая нижним пределом основной фракции (у кругов 100/80 и 40/28 – соответственно 80 и 28), давление круга на деталь  $q$ , скорость круга  $V$ , время шлифования  $\tau$ . Опыты проведены при варьировании факторов на следующих уровнях (табл. 1).

Табл. 1. Матрица планирования эксперимента

Уровни варьирования	Зернистость кругов $d$ , мкм	Давление $q$ , кгс/см <sup>2</sup>	Скорость круга $V$ , м/с	Время шлифования $\tau$ , мин
Верхний	80	10	68	6
Нижний	28	6	34	3

После обработки матриц планового эксперимента получены зависимости:

$$Q = 4,2 \cdot 10^{-4} d^{0,9} q^{0,8} V \tau^{-0,4}; \quad (1)$$

$$N = 6,7 \cdot 10^{-3} d^{0,1} q V^{0,8} \tau^{-0,03}; \quad (2)$$

$$R_a = 1,7 \cdot 10^{-2} d^{0,8}. \quad (3)$$

Выражение для удельной энергии, расходуемой для снятия  $1 \text{ см}^3$  обрабатываемого материала, имеет вид:

$$P = 0,27 d^{-0,8} q^{0,2} V^{-0,2} \tau^{-0,37}. \quad (4)$$

Анализ зависимости (1) показывает, что производительность шлифования керамики ТЛ-75 в исследованных диапазонах почти пропорционально возрастает с увеличением зернистости кругов и давления и прямо пропорционально скорости круга. С течением времени производительность падает.

Практически для данной керамики зернистость 100/80 является предельной, т.к. более крупнозернистые круги образуют сколы по краям деталей. Назначение давления при шлифовании необходимо связывать с глубиной врезания алмазных зерен в обрабатываемый материал. Чрезмерной давление при обработке тонких керамических пластин может приводить к их растрескиванию. Так, при обработке пластин толщиной 1 мм из керамики ТЛ-75 предельным было давление 1,2 МПа.

Процесс шлифования с постоянной силой прижима круга характеризуется снижающейся во времени производительностью. По мере затупления алмазные зерна все меньше внедряются в обрабатываемый материал, и наступает момент, когда резание прекращается – круг лишь скользит по поверхности деталей. Это происходит тем быстрее, чем ниже давление на круг и чем тверже обрабатываемая керамика. Например, названный круг при обработке очень твердой керамики И-71 с давлением 0,6 МПа имел стойкость 1 минуту.

Таким образом, можно считать установленными четкие ограничения производительности по зернистости кругов и давлению. Для третьего члена выражения (1) – скорости шлифования, предела установить пока не удалось. Повышение скорости с 68 до 92 м/с увеличивало производительность процесса. На этой скорости кругом АЧК 75x5x3 АСМ 40/28М1-100% при шлифовании керамики ТЛ-75 с давлением 0,51 МПа была достигнута средняя производительность  $9 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Подготавливаются эксперименты по исследованию шлифования со скоростью 120 м/с.

Скоростное шлифования требует повышенной мощности привода вращения круга (см. формулу 2). В приведенном примере производительность могла бы быть еще выше за счет

увеличения давления, но вступило ограничение по мощности привода – 5,5 кВт. Высокооборотные электрические шпиндели большей мощности не изготавливаются.

### **Результаты**

Шероховатость поверхности керамических деталей слабо зависит от режимов обработки и, в частности, от скорости шлифования. Определяющим здесь являются характеристики круга.

При шлифовании высокоглиноземистой керамики были получены зависимости, сходные с приведенными. Однако, для шлифования очень твердой керамики требуются высокие давления. Эффективность процесса значительно возросла, если алмазный круг совершал осевые колебания или работал с самозатачиванием.

Таким образом, результаты исследований показали, что эффективность алмазного шлифования керамических деталей может быть значительно повышена за счет увеличения скорости резания. Для применения в производстве могут быть рекомендованы апробированные скорости алмазных кругов, равные 60-90м/с.

### **Список литературы**

1. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Belousov S.V. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls // CIS Iron and Steel Review. 2021, vol. 22, pp. 26-31. doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.05.
2. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes // Materials Science Forum. 2021, vol. 1037 MSF, pp. 384-389. doi.org: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.
3. Roshchupkin S.I., Sidorov D.E., Kolesov A.G. Assessment of the actual depth of cutting with cylindrical external grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019. 2020, p. 022010. doi.org: 10.1088/1757-899X/709/2/022010.
4. Богущкий В.Б., Шрон Л.Б. Изменение характеристик рабочей поверхности шлифовального круга за период его стойкости // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2019. – Т. 19, №2. – С. 66-74. – doi.org/10.14529/engin190206.
5. Гаршин А.П., Гронянов В.М., Логунов Ю.В. Абразивные материалы. – Л.: Машиностроение, 1983. – 230 с.
6. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 310 с.
7. Никитков Н.В., Дорофеев П.А. Выявление доминирующего фактора, вызывающего трещины в поверхностном слое шлифуемых заготовок из твердых хрупких материалов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – №4(159). – С. 162-167.
8. Душко О.В. Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при обработке высокотвердой керамики // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – №40. – С. 155-165.
9. Назарьева В.А., Васин А.Н., Бочкарев П.Ю. Разработка программного обеспечения для определения режимов резания при шлифовании // Вестник СГТУ. – 2006. – Т. 2., № 1. – С. 49-56.
10. Бахарев В.П., Верещака А.С., Яковчик Е.В. Обеспечение качества поверхности и производительности обработки изделий из керамических материалов на операциях доводки фиксированным абразивом // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 2. – С. 56-60.
11. Бахтиаров Ш.А. Повышение эффективности плоского торцового алмазного шлифования // Вестник машиностроения. – 2006. – № 11. – С. 49-51.
12. Гусев В.В. Назначение режимов резания при алмазном шлифовании конструкционной керамики // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2006. – С. 6-16.
13. Тюрин А.Н. Определение энергии резания единичным абразивным зерном // Технология машиностроения. – 2008. – №6. – С. 16-22.

### **References**

1. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Belousov S.V. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls // CIS Iron and Steel Review. 2021, vol. 22, pp. 26-31. doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.05.
2. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Chasovitina A. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes // Materials Science Forum. 2021, vol. 1037 MSF, pp. 384-389. doi.org: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384.
3. Roshchupkin S.I., Sidorov D.E., Kolesov A.G. Assessment of the actual depth of cutting with cylindrical external grinding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends

in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019. 2020, p. 022010. doi.org: 10.1088/1757-899X/709/2/022010.

4. Bogutsky V.B., Shron L.B. Change in the Characteristics of the grinding wheel face during its redress life // Bulletin of the South-Ural state university. Ser. Mechanical engineering industry. 2019, vol. 19, no. 2, pp. 66-74. doi.org/10.14529/engin190206.
5. Garshin A.P., Gronyanov V.M., Logunov Yu.V. Abrasive materials. – L.: Mechanical Engineering, 1983. – 230 p.
6. Yakimov A.V. Abrasive-diamond processing of shaped surfaces. – M.: Mechanical Engineering, 1984. – 310 p.
7. Nikitkov N.V., Dorofeev P.A. Identification of the dominant factor causing cracks in the surface layer of polished blanks made of hard brittle materials // Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. 2012, no. 4(159), pp. 162-167.
8. Dushko O.V. Influence of thermal force loads on the formation of cracks in the processing of high-hard ceramics // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2015, no. 40. pp. 155-165.
9. Nazar'yeva V.A., Vasin A.N., Bochkarev P.U. Development of software for determining cutting conditions during grinding // Bulletin of SSTU. 2006, vol. 2, no. № 1, pp. 49-56.
10. Bakharev V.P., Vereshchaka A.S., Yakovchik Ye.V. Ensuring the surface quality and productivity of processing products from ceramic materials in the operations of finishing with a fixed abrasive // Bulletin of MSTU Stankin. 2011, no. 2, pp. 56-60.
11. Bakhtiarov SH. A. Improving the efficiency of flat face diamond grinding // Bulletin of Mechanical Engineering. 2006, no. 11, pp. 49-51.
12. Gusev V.V. Appointment of cutting modes in diamond grinding of structural ceramics // Naukovi Pratsi of Donetsk National Technical University. Series: Machine learning and machine science. 2006, pp. 6-16.
13. Tyurin A.N. Determination of cutting energy by a single abrasive grain // Engineering Technology. 2008, no. 6, pp. 16-22.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Сидоров Денис Евгеньевич</b> – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Технологии машиностроения	<b>Sidorov Denis Evgenievich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mechanical engineering technology
<b>Колесов Александр Геннадьевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры Технологии машиностроения	<b>Kolesov Alexander Gennadievich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mechanical engineering technology
Sidorov-sntu@yandex.ru	

Получена 13.03.2023