

УДК 621.923

**В. В. Гусев**, д-р техн. наук, проф., **А. Г. Мамолат**, магистр, **С. А. Поезд**, канд. техн. наук, доц.

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР, Россия

Тел.: +7 (949) 3086754; E-mail: [mismo@fimm.dgtu.donetsk.ru](mailto:mismo@fimm.dgtu.donetsk.ru)

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРАВКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ПРИ ОБРАБОТКЕ КЕРАМИКИ

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния скоростей шлифовального круга и притира на предельной режущей способности алмазного круга на металлической связке при правке его свободным абразивом. Эти параметры нелинейно влияют на скорость правки и достижения предельной режущей способности инструмента. При этом скорость круга при которой достигается максимальная режущая способность после правки значительно ниже скоростей, при которых производится обработка керамики. Измеряя значение силы резания или определяя объем удаленного кругом материала припуска возможно определение состояния шлифовального круга, при котором необходимо производить восстановление его режущей способности.*

**Ключевые слова:** алмазный шлифовальный круг, метод правки алмазного круга свободным абразивом, режимы правки.

V. V. Gusev, A.G. Mamolat, S.A. Poezd

## TO DETERMINE THE PARAMETERS FOR CONTROLLING THE PROCESS OF STRAIGHTENING A DIAMOND GRINDING WHEEL WITH A FREE ABRASIVE WHEN PROCESSING CERAMICS

*The article presents the results of an experimental study of the effect of the speeds of the grinding wheel and lapping on the ultimate cutting ability of a diamond wheel on a metal bundle when straightening it with a free abrasive. These parameters have a non-linear effect on the speed of editing and achieving the maximum cutting capacity of the tool. At the same time, the speed of the circle at which the maximum cutting capacity is achieved after editing is significantly lower than the speeds at which ceramics are processed. By measuring the value of the cutting force or determining the volume of the allowance material removed by the circle, it is possible to determine the condition of the grinding wheel, at which it is necessary to restore its cutting ability.*

**Keywords:** diamond wheel, the method of editing a diamond wheel with a free abrasive, editing modes.

### 1. Введение

В современных отраслях промышленности и машиностроения техническая керамика занимает ключевое место, представляя собой один из наиболее перспективных материалов для производства продукции высокого технологического уровня. Несмотря на значительные достижения в области технологий, процесс обработки керамических материалов и создание из них высококачественных изделий, в частности с использованием алмазных шлифовальных кругов, остается сложной технологической задачей из-за высокой прочности и хрупкости этих материалов. Одним из наиболее эффективных и распространенных методов обработки керамики является алмазное шлифование, которое обеспечивает высокую точность и качество керамических изделий.

При обработке такого твердого материала, как керамика, алмазный круг сравнительно быстро теряет свои режущие свойства. Это происходит в основном из-за затупления режущих элементов алмазных зёрен, находящихся на рабочей поверхности инструмента. Чем тверже керамика, тем ниже стойкость алмазного круга при её обработке. В процессе шлифования с износом алмазного шлифовального круга возрастает сила

в 1,7-2,5 раза резания, увеличение которой приводит к сколам и повышению трещиноватости обработанной поверхности, что приводит к снижению прочности технической керамики [1]. Для устранения этих проблем необходимо периодически проводить восстановление режущей способности алмазного круга. Наиболее используемым источником информации при определении предельного состояния инструмента является сила резания.

Методы правки кругов на металлической связке по характеру воздействия на РПК делятся на [2]: механические, химические, физические и комбинированные. Наиболее простым и эффективным управляющим воздействием является разновидность механического метода, к которому относится правка свободным абразивом [3, 4]. Этот метод отличается, по сравнению с другими механическими методами правки, более мягким воздействием на алмазные зерна круга и большей избирательностью воздействия на связку круга. Метод правки свободным абразивом разрабатывается на кафедре «Металлорежущие станки» ДонНТУ. К вращающемуся на рабочей скорости кругу подводят до касания притир. Притиру задают возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента. В зону контакта инструмента и притира подают свободный абразив, который путем шаржирования в притире и перекатывания по поверхности контакта в направлении вектора скорости вышлифовывает материал притира и связки инструмента. Удаление связки, а также наиболее слабо удерживаемых в связке алмазных зерен приводит к изменению числа алмазных зерен  $n$  ( $\tau$ ) на единице поверхности рабочей поверхности круга (РПК) и плотности распределения вершин зерен по высоте  $\Delta R(\tau)$ , которая также изменяется в процессе правки. Рекомендуемыми значениями величины скорости подачи абразива в зону контакта составляет 200 мкм/с при скорости подачи притира в 11,5 раз меньше 17,5 м/с [4]. При размере абразива сопоставимом с размером среднего зерна алмазного круга.

До настоящего времени не выявлено влияние скорости шлифовального круга на процесс правки свободным абразивом, что может быть использовано для выбора ее параметров системы управления. При этом эффективность процесса правки обычно оценивается временем правки и режущей способностью круга ( $W$ ) после правки.

Цель работы в определении влияния скорости алмазного шлифовального круга на процесс управления его режущей способностью при обработке керамики.

## 2. Основное содержание и результаты работы

На базе заточного станка модели 3672 был создан стенд, который был оснащен: устройством для правки свободным абразивом, устройством для частотного регулирования вращения асинхронного электродвигателя двигателя главного движения ДАН-ФОСС VLT MICRO DRIVE FC51, оборудованием для записи профиля алмазного ШК и трехкомпонентным динамометрическим столом. Тарирование системы частотного регулирования производилось с помощью мультиметра DT – 5807. Частоту вращения алмазного шлифовального круга определяли с помощью тахометра ИО-11.

Условие проведения экспериментальных исследований. Обрабатываемый материал  $Al_2O_3$  (ГП). Плоское встречное врезное шлифование кругом 1A1 200x75x6x3 AC32 – 250/200 – 4 – M2-01 использовалось для затупления круга. Режимы резания: скорость резания  $V_k = 33$  м/с, продольная скорость стола  $S = 0,1$  м/с, глубина резания  $t = 1,3$  мм. СОТС – вода с добавкой 0,3% кальцинированной соды (расход – 5л/мин). Обработку керамики выполняли до достижения кругом режущей способности  $10 \pm 5$  мм<sup>3</sup>/с.

При правке свободным абразивом в качестве притира был использован серый чугуи СЧ10 ГОСТ 1412-70, который обеспечивает наилучшие условия по шаржирова-

нию абразива в поверхность притира [3]. Абразивная смесь изготавливалась в виде бруска, состоящего из 30% гипса (связующего) ГОСТ 4.204-79 и 70% абразивного порошка – карбида кремния зеленого (ГОСТ 3647-59) размером 200 (F70 ISO 8486-1,2) мкм. Скорость подачи абразивного бруска при правке составляла 200 мкм/с.

Измерение режущей ( $W$ , мм<sup>3</sup>/с) способности ШК проводилось по упругой схеме резания путем поджатия материала образца размером 10x15x15 мм из ситалла АС-370 ( $HV = 8 \cdot 10^9$  Па,  $K_{1c} = 2,1 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>) к поверхности ШК с постоянным усилием в 41,5 Н, что обеспечивало постоянное среднее контурное давление в зоне контакта 0,28 МПа. Такое давление поджатия не вносит изменения в результаты процесса правки. Время измерения режущей способности фиксировалось электронным хронографом с ценой деления 0,01 с. Погрешность измерения режущей способности составила не более 0,1 мм<sup>3</sup>/с. Процесс правки прекращали при достижении предельной режущей способности для принятых условий правки [4].

На рисунке 1 представлены экспериментальные результаты исследования влияния скорости алмазного шлифовального круга при правке на его режущую способность. Как видно из графиков, предельная режущая способность от скорости ШК имеет нелинейный экстремальный характер. При этом время правки было наименьшим для режима правки обеспечивающего достижения максимальной режущей способности.

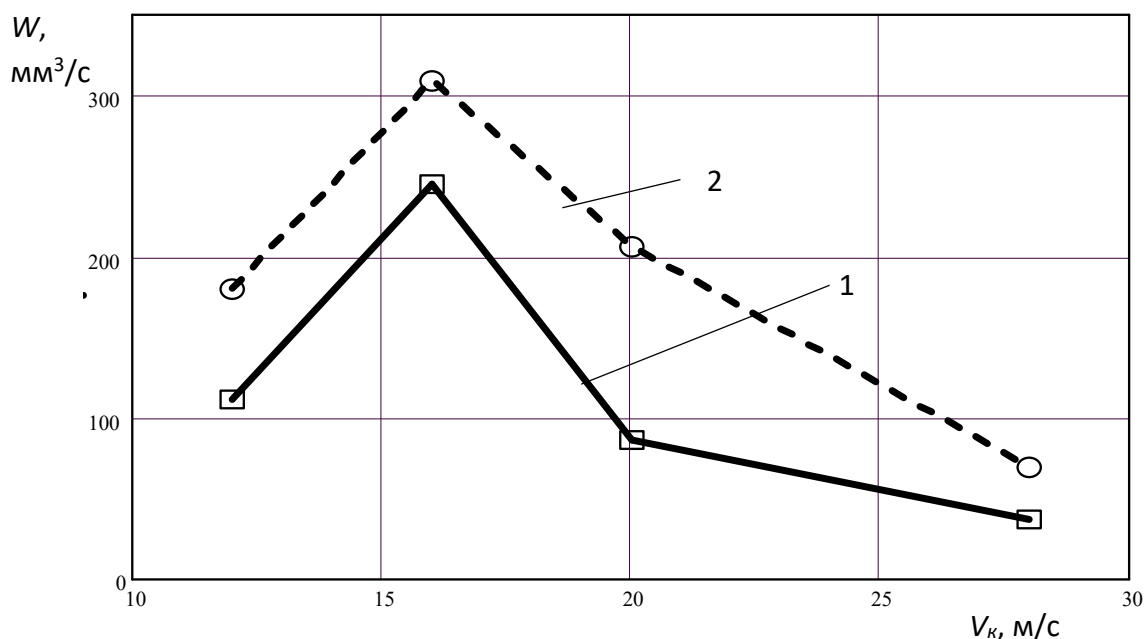


Рисунок 1. Влияние скорости шлифовального круга на производительность процесса восстановления режущей способности алмазного шлифовального круга свободным абразивом при скорости подачи притира: 1- 9 мкм/с, 2 – 15 мкм/с

В связи с тем, что искомая зависимость может быть описана лишь квадратичной зависимостью необходимо применить для ее экспериментального описания планирование эксперимента ортогональный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов. Уровни факторов и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 1.

Экспериментальные результаты предельной режущей способности ШК после правки при реализации ортогональный центральный композиционный план второго порядка приведены в таблице 2.

Таблица 1. Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	Обозначения	Скорость круга $V_k$ м/с ( $x_1$ )	Скорость подачи притира $V_{пр}$ мкм/с ( $x_2$ )
Основной	0	16	15
Интервал варьирования	$\Delta x$	4	6
Верхний	+1	20	21
Нижний	-1	12	9

Таблица 2. Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований

№	$x_1$	$x_2$	$W$ , мм <sup>3</sup> /с	$W_p$ , мм <sup>3</sup> /с
1	+1	+1	63	66
2	+1	-1	86	90
3	-1	+1	95	87
4	-1	-1	112	111
5	+1	0	185	172
6	-1	0	190	193
7	0	+1	200	209
8	0	-1	245	238
9	0	0	310	320

Дисперсия экспериментальных значений была определена в центре плана по четырем экспериментам значениям и составила  $S_y^2 = 78$ . При проверке статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента была установлена незначимость коэффициента регрессии при парном взаимодействии скоростей круга и притира.

После обработки экспериментальных данных была получена следующая регрессионная зависимость

$$W_p = 263 V_k - 8,3 V_k^2 + 76 V_{пр} - 2,6 V_{пр}^2 - 2323. \quad (1)$$

Данная регрессионная зависимость была проверена на адекватность с помощью критерия Фишера. При 5%-ном уровне значимости, табличное значение критерия  $F_T$  составило 4,34, а расчетное значения критерия Фишера равно 0,94, что меньше табличного значения. Таким образом, полученная модель адекватна при 5%-ом уровне значимости. Максимального значения режущая способность круга достигается в центре плана. При этих значениях время достижения предельной режущей способности минимально.

При малых скоростях круга по всей видимости важную роль играет затупление зерен, который протекает быстрее, чем вышлифовывание связки зернами абразива, шаржированными в поверхность притира. Поэтому восстановление режущей способности происходит медленнее и величина режущей способности ниже, чем при больших скоростях. При скоростях круга больше 16 м/с усилие на зерна круга от притира возрастают, что также приводит к интенсификации их разрушения при правке. Эти два противоположных процесса и приводят к появлению экстремальной зависимости пре-

дельной режущей способности от скорости шлифовального круга при правке свободным абразивом.

Не менее важным является определение начала правки при обработке керамики.

Основным параметром, определяющим эксплуатационные свойства технической керамики, является прочность, которая кроме дефектов структуры зависит и от дефектов обработки [1, 6, 7]. Плотность распределения дефектов обработки по размерам (полудлиной обработочных дефектов в поверхностном слое  $l_o$ ) может быть описана упрощенным бета-распределением [7]

$$f(l_c) = \frac{r_o+1}{l_{o\max}} \left(1 - \frac{l_o}{l_{o\max}}\right)^{r_o} \quad r_o \geq 0, \quad 0 \leq l_o \leq l_{o\max}, \quad (2)$$

где  $r_o$  – параметр трещиноватости дефектов обработки,  $l_{o\max}$  – максимальный размер полудлины трещин обработки.

Чем больше  $r_o$  тем, вероятность формирования малых трещин выше.

Параметр трещиноватости дефектов обработки определяется значением нормальной составляющей силы резания при алмазном плоском продольном врезном шлифовании керамики приведенной к единице высоты круга ( $F_{ny}$ ) и индексом хрупкости обрабатываемого материала ( $HV/K_{1c}$ ) [1].

$$r_o = 6,9 \cdot F_{ny}^{-0,5+0,07 \cdot (HV/K_{1c})} \quad (3)$$

С ростом радиальной нагрузки при шлифовании параметр трещиноватости снижается, а доля дефектов с большими размерами возрастает.

Зависимость максимальной величины полудлины обработочных дефектов в поверхностном слое керамики линейна от критической величины медианной трещины при индентировании (при которой она развивается устойчиво). Величина критической медианной трещины обратно пропорциональна квадрату индекса хрупкости керамики  $(K_{1c}/HV)^2$ . Таким образом, чем меньше индекс хрупкости материала, тем больше значение полудлины максимальной обработочной трещины в поверхностном слое.

Величина радиальной составляющей силы резания зависит от характеристики ШК, физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания и состояния рабочей поверхности круга. Изменение нормальной составляющей силы резания при алмазном плоском продольном врезном шлифовании керамики приведенной к единице высоты круга с учетом их физико-механических свойств материала можно записать [5].

$$F_{ny} = A \left(\frac{k_\phi \cdot K_{1c}^4}{HV^3}\right)^{1,18} \cdot (b - \exp(-c \cdot Q)) \cdot V_d^{0,34} \cdot V_k^{-0,41} \cdot t^{0,71}. \quad (4)$$

где  $k_\phi$  – постоянный коэффициент, зависящий от формы зерна;  $Q$  – объем удаленного материала, в  $см^3$ ;  $V_d, V_k, t$  – режимы резания;  $A, b, c$  – постоянные коэффициенты учитывающие изменение состояние РПК и определяемые экспериментально.

Регламентируя радиальную составляющую силы резания можно управлять состоянием дефектного слоя, т.е. определять такую эксплуатационную характеристику, как прочность изделия из керамики. Значение радиальной составляющей силы резания можно непосредственно ее измеряя в процессе обработки или определяя объем удален-

ного кругом материала припуска, что позволяет определять начало восстановления режущей способности круга.

### 3. Заключение

При алмазном шлифовании технической керамики в результате износа шлифовального круга возрастает сила резания и как следствие повышается уровень дефектности поверхностного слоя керамики, что вызывает снижение прочности изделия. Изменяя значение силы резания или определяя объем удаленного кругом материала припуска возможно определение состояния шлифовального круга, при котором необходимо производить восстановление его режущей способности.

Одним из наиболее эффективных способов восстановления режущей способности алмазного круга на металлической связке является способ правки свободным абразивом. Экспериментально установлено, что скорости алмазного круга на металлической связке и подачи притира нелинейно влияют на скорость правки и достижения предельной режущей способности инструмента. При этом скорость круга при которой достигается максимальная режущая способность после правки значительно ниже скоростей, при которых производится обработка керамики.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гусев, В. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных требований к изделиям из конструкционной керамики / В. В. Гусев // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2007. – Вып. 73. – С.55-62.
2. Гусев, В. В. Выбор параметров управления режущей способностью алмазного шлифовального круга свободным абразивом / В. В. Гусев, Д. С. Лазарев, Д. А. Моисеев // Вестник современных технологий, сборник научных трудов ФГАОУ ВО «Северо-польский государственный университет», 2018, №4 (12) С. 20-25.
3. Бурмистров, В. В. Способ правки алмазно-абразивного инструмента // А.с. 967784 СССР МКИ В24В 53/00 – 4с.
4. Медведев, А. Л. Обеспечение режущей способности алмазного шлифовального круга при шлифовании технической керамики за счет формирования его рабочей поверхности: автореферат дис. канд. техн. наук. – Донецк, 2014. – 16 с.
5. Гусев, В. В. Технические ограничения при алмазном шлифовании керамики / В. В. Гусев, Д. А. Моисеев // Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. - Вып. № 2 (53)', 2016. С. 35-42.
6. Ковеленов, Н. Ю. Трещиноватый поверхностный слой при шлифовании высокопрочных керамик / Н. Ю. Ковеленов, А. Ю. Колодяжный, Н. В. Никитков // Обработка материалов резанием. – Вып. №3(15), 2001. – С. 2-7.
7. Витвицкий, П. М. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел / П. М. Витвицкий, С. Ю. Пожена. – Киев: Наукова думка, 1980. – 187с.

Поступила в редколлегию .15.01.2024 г.