

К. т. н. М. И. Шкарупа¹ (✉), В. Б. Дудаков¹, М. М. Лашнев¹, д. т. н. В. А. Рогов²

¹ АО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента «ВНИИАЛМАЗ», Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов «RUDN University», Москва, Россия

УДК 666.3:621.923.4:621.921.34

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Проведен сравнительный анализ результатов исследований, полученных различными научными школами, по абразивно-алмазной и нитридной обработке керамических и металлических материалов. Для измерения эффективности шлифования керамики предложен коэффициент комплексной эффективности шлифования $RcEfG$. Получены математические модели шероховатости поверхности по показателю Ra при плоском и круглом шлифовании кварцевой керамики на основе SiO_2 .

Ключевые слова: комплексная эффективность шлифования (КЭШ), абразивно-алмазная обработка керамики, математическая модель шероховатости поверхности керамики.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в современном машиностроении идет процесс постепенной замены металлических изделий на изделия из конструкционной и функциональной керамики, в том числе имеющих композитную структуру. Процесс механической обработки изделий из конструкционной и функциональной керамики, а также хрупких технических стекломатериалов представляет собой важное направление для прикладных научных исследований. Затраты на абразивную и отделочную обработку изделий из труднообрабатываемых неметаллических материалов порой достигают 40 % себестоимости готового изделия, поэтому проблема снижения себестоимости абразивной обработки и повышения производительности шлифовальных операций становится актуальной [1].

В мире существует несколько научных школ по изучению проблемы повышения эффективности абразивной алмазной обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе керамических и стеклокерамических. Следует отметить труды таких исследователей (рис. 1), как S. Malkin, Массачусетский технологический университет, США; I. Inasaki, Университет



Рис. 1. Ведущие исследователи и основатели научных школ в области абразивных процессов обработки керамических и композитных материалов

Кейо, Япония; F. Klocke, M. Duscha, C. Zeppenfeld, Рейнско-Вестфальский технический университет г. Аахена, Германия; D. Dornfeld и B. Linke, Калифорнийский университет в Дэйвисе, США; C. Guo, S. Wang и C. H. Li, Технологический университет Циндао, Китай; I. Marinescu, Университет г. Толедо, Испания; В. В. Гусев, Донецкий технический университет, Украина; W. V. Rowe, Ливерпульский университет Джона Мура, Великобритания [2]. В России научные школы в области абразивной обработки неметаллических материалов представляют исследователи: Н. В. Никитков, Санкт-Петербургский политехнический университет; Л. В. Худобин, Ульяновский технический университет; В. М. Шумячкер, Волгоградский архитектурно-строительный университет; В. В. Кузин, А. В. Ба-

✉
М. И. Шкарупа
E-mail: shkarupamish@mail.ru

Таблица 1. Классификация видов конструкционной и функциональной керамики

Тип керамики	Основные свойства	Применение	Используемые соединения
Электрокерамика	Электропроводность, диэлектрические, пьезоэлектрические	Интегральные схемы, конденсаторы, нагреватели, термисторы, транзисторы, фильтры, солнечные батареи, твердые электролиты	BeO, MgO, Y ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, B ₄ C, TiC, CdS, титанаты, Si ₃ N ₄
Оптокерамика	Прозрачность, поляризация, флуоресценция	Лампы высокого давления, инфракрасно-прозрачные окна, лазерные материалы, световоды, элементы оптической памяти, экраны модуляторов	Al ₂ O ₃ , MgO, Y ₂ O ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂ , Y ₂ O ₃ , ThO ₂ , ZnS, CdS, CeS, TiB ₂ , ZrB ₂
Хемокерамика	Абсорбционная и адсорбционная способность	Сорбенты, катализаторы и их носители, электроды топливных элементов, датчики влажности газов, элементы химических реакторов	ZnO, Fe ₂ O ₃ , SnO, SiO ₂ , MgO, BaS, Al ₂ O ₃ , SiC, титаниды
Биокерамика	Биологическая совместимость, стойкость к биокоррозии	Протезы зубов, суставов	Системы оксидов, Al ₂ O ₃
Термокерамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, ТКЛР, теплоемкость, радиопрозрачность	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка высокотемпературных реакторов, электроды для металлургии, теплообменники, теплозащита, защитные чехлы для термодатчиков, обтекатели ракет	SiC, TiC, B ₄ C, TiB ₂ , ZrB ₂ , Si ₃ N ₄ , SiO ₂ , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , ситаллокерамика
Механокерамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, коэффициент термического расширения, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная, антифрикционная и фрикционная, режущий инструмент, пресс-инструмент, направляющие и другие износостойкие детали: сепараторы подшипников, тормозные диски	Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , SiC, TiB ₂ , TiC, TiN, WC, B ₄ C, Al ₂ O ₃ , BN
Ядерная керамика	Радиационная стойкость, жаропрочность, жаростойкость, сечение захвата нейтронов, огнеупорность, радиоактивность	Ядерное горючее (таблетки для твэлов), футеровка реакторов, экранирующие материалы, поглотители излучения, поглотители нейтронов	UO ₂ , UO ₂ -PuO ₂ , UC, US, ThS, SiC, B ₄ C, Al ₂ O ₃ , BeO
Сверхпроводящая керамика	Электропроводность	Линии электропередач, накопители энергии, интегральные схемы, железнодорожный транспорт на магнитной подвеске, электромобили	Оксидные системы: La-Ba-Cu-O, La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-O

льков, Московский технологический университет «Станкин»; А. Г. Суслов, Брянский технический университет; В. Ф. Безъязычный, Рыбинский авиационный технический университет; А. М. Ханов, Пермский технический университет [3].

Проблема абразивной обработки керамических, стеклокерамических и керамокомпозитных конструкционных материалов заключается в отсутствии общей математической модели, учитывающей все наиболее значимые технологические и физико-механические факторы. Такая модель позволяет выбрать необходимые характеристики инструмента и спрогнозировать наиболее рациональные режимы шлифования. Керамические заготовки, получаемые в основном шликерным литьем, подвержены деформациям при испарении влаги во время обжига в печи. В связи с этим в размер заготовки инженером-конструктором закладывается припуск на механическую обработку с учетом коэффициента усадки материала (отклонения от геометрической формы), составляющего для некоторых типов керамики от 1,5 до 5 % [4]. Аддитивные методы спекания и формования керамических деталей являются весьма дорогостоящими и не позволяют получить требуемое качество поверхности без механической доводки, поэтому в любом случае при проектировании деталей из керамики конструктором закладывается припуск на механическую обработку. В табл. 1 по-

казаны основные типы конструкционной и функциональной керамики, изделия из которой требуют последующей механической обработки при соответствующих технических условиях.

Российские исследователи в своих работах уделяют особое внимание производительности абразивной обработки, как основного критерия эффективности процесса шлифования различных металлических и неметаллических материалов. Например, А. А. Маталин и Ю. М. Зубарев проводили шлифование быстрорежущей стали эльборными кругами (из кубического нитрида бора) и получили математическую модель для круглого шлифования, в которой показано влияние различных факторов на производительность шлифования Q_{spec} , г/мм² [5]:

$$Q_{spec} = 9,2 \cdot 10^{-4} \cdot a_z \cdot N_{cut} \cdot v_{wh} \cdot \sqrt{\frac{D_{wh} \cdot D_{det} \cdot r_{abr}}{D_{wh} \pm D_{det}}}, \quad (1)$$

где a_z — толщина среза материала одной вершиной абразивного зерна, мкм; N_{cut} — число режущих кромок на единице рабочей поверхности круга, мм²; v_{wh} — скорость вращения шлифовального круга, м/с; D_{wh} — диаметр шлифовального круга, мм; D_{det} — диаметр обрабатываемой детали, мм; r_{abr} — средний радиус округления вершин «активных» режущих кромок круга, мкм.

Д. Б. Ваксер, Н. В. Никитков, В. А. Иванов и В. Б. Рабинович получили ряд функций, пока-

зывают влияние управляемых факторов при плоском шлифовании деталей соответственно из кварцевой, высокоглиноземистой и титаносодержащей керамики на производительность Q , см³/мин [6]:

$$Q = 0,17 \cdot v_{wh}^{0,84} \cdot T_{gr}^{-0,2}, \quad (2)$$

$$Q = 10^3 \cdot v_{wh}^{1,8} \cdot \bar{d}_{wh}^{-3,6} \cdot P, \quad (3)$$

$$Q = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot v_{wh}^{0,33} \cdot (HV_{cer})^{0,55} \cdot P^{0,6}, \quad (4)$$

где T_{gr} — машинное время шлифования одной заготовки, мин; \bar{d}_{wh} — среднее значение зернистости круга, мкм; P — давление прижима круга к обрабатываемой заготовке, Па; HV_{cer} — микротвердость обрабатываемой керамики, кг/мм².

Шероховатость Ra обработанной поверхности деталей из стеклокерамики на основе диоксида кремния при круглом шлифовании зависит от скорости вращения заготовки v_{wor} , м/с, и алмазного круга v_{wh} , а также среднего значения зернистости круга. В. В. Гусев выразил эту зависимость в виде регрессионных уравнений:

$$Ra = 0,21 \cdot \left(\frac{v_{wor}}{v_{wh}} \right)^{0,3} \cdot \bar{d}_{wh}^{0,4}, \quad (5)$$

$$Rz = 0,8 \cdot \left(\frac{v_{wor}}{v_{wh}} \right)^{0,24} \cdot \bar{d}_{wh}^{0,3}. \quad (6)$$

Б. Я. Розовский и В. Н. Абдулов определили зависимость между шероховатостью, нижним пределом зернистости алмазного круга d_{wh} и его скоростью вращения. Эта зависимость справедлива для плоского скоростного шлифования керметов (при $v_{wh} = 40 \div 100$ м/с) [7]:

$$Ra = 0,0163 + 0,00135 \cdot d_{wh} - 0,00008 \cdot v_{wh} - 0,000006 \cdot d_{wh} \cdot v_{wh}. \quad (7)$$

Эти математические модели имеют смысл для применения в основном при чистовых операциях абразивной обработки, когда значение шероховатости поверхности обрабатываемой детали является конкретным числом, которое задано в конструкторской документации. Соотношение между припусками на чистовую и черновую операции шлифования является одним из критериев комплексной эффективности абразивной обработки керамических материалов. Классические методы размерного анализа технологических процессов по методикам И. Г. Фридлендера и В. В. Матвеева в основном ориентированы на расчет припусков при обработке металлических заготовок и не позволяют получить оптимальное соотношение операционных припусков из-за отсутствия некоторых справочных табличных данных по конструкционной керамике. Поэтому технологи, работающие на производственных предприятиях, назначают припуски на черновую и чистовую абразивную обработку керамики, исходя из собственных представлений о свойствах того или иного материала. Высота дефектного слоя и шероховатость поверхности при шлифова-

нии хрупких неметаллических материалов является основным условием для расчета или назначения межоперационных припусков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Для построения математических моделей, отражающих комплексную эффективность абразивной обработки керамических материалов, авторами настоящей статьи выбраны технологические и физико-механические управляемые факторы, которые влияют на выходные параметры обработки. Комплексная эффективность механической обработки материалов — это совокупность различных параметров, каждый из которых задан в виде функции от технологических и физико-технических факторов и при этом является экстремумом для данной функции. Комплексную эффективность шлифования (КЭШ) материалов было принято оценивать в виде коэффициента КЭШ (обозначается аббревиатурой RcEfG — complex efficiency of grinding ratio) в процентах от максимальной (оптимальной) комплексной эффективности абразивной обработки. В табл. 2 показаны необходимые условия (конструкторские требования) для поиска и назначения наиболее рациональных показателей абразивной обработки керамики. От этих условий зависит выбор наиболее подходящего абразивного инструмента и режимов резания.

В табл. 3 приведены основные управляемые качественные и количественные факторы, влияющие на комплексную эффективность абразивной обработки керамических заготовок. Факторы закодированы и, взаимодействуя между собой, влияют на параметры, определяющие комплексную эффективность механической обработки. Комплексная эффективность обработки для операции чернового шлифования может быть выражена в виде системы нелинейных функций в следующем виде:

$$\begin{cases} f(Q_{rough}) = [X_{(n,c,g)}, Y_n, Z_n] \rightarrow \max, \\ f(T_{rough}) = [X_{(n,c,g)}, Y_n, Z_n] \rightarrow \max, \\ f(D_{rough}) = [X_{(n,c,g)}, Y_n, Z_n] \rightarrow \min. \end{cases} \quad (8)$$

Комплексная эффективность для операции чистового шлифования также представляет собой систему нелинейных функций, каждая из которых стремится к определенному экстремуму при определенной комбинации управляемых факторов. Например, при черновой обработке производительность Q_{rough} , см³/мин, и период стойкости инструмента T_{rough} , мин, всегда должны стремиться к максимальным значениям, а брак D_{rough} , %, образующийся в процессе обработки, должен стремиться к минимальному значению; шероховатость поверхности заготовки при этом значения не имеет. Во время чистовой обработки необходимо, чтобы при определенной комбинации управляемых факторов шерохова-

Таблица 2. Необходимые условия для выбора показателей абразивно-алмазной обработки

№ п/п	Условие	Состав условия, размерность	Обозначение
1	Качество поверхности обработанного материала (в соответствии с ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики»)	Среднеарифметическое отклонение профиля, мкм	Ra
		Высота неровности профиля по десяти точкам, мкм	Rz
		Наибольшая высота профиля, мкм	R_{max}
		Средний шаг неровностей, мкм	Sm
		Средний шаг местных выступов профиля, мкм	S
		Относительная опорная длина профиля (p — значение уровня сечения профиля), мкм	t_p
2	Физико-механические свойства обрабатываемого материала	Пористость, %	Por
		Твердость, МПа	HV
		Модуль Юнга, ГПа	E
		Прочность на изгиб, МПа	σ
		Вязкость разрушения, Па·м ^{1/2}	K_{Ic}
		Температура плавления, К	T_{mel}
		Теплопроводность, Вт/(м·К)	λ
3	Точность механической обработки	Квалитет	0,1; 0; 1; 2; 3; ... 8
		Поле допуска, вал/отверстие	h/H
		Допуски формы и расположения поверхностей, мм	В соответствии со стандартом

Таблица 3. Факторы, влияющие на комплексную эффективность алмазно-абразивной обработки керамики

№ п/п	Группа факторов	Управляемые факторы	Код
1	Вид абразивной обработки при шлифовании плоской поверхности X_n	Плоское шлифование периферией круга	X_{n1}
		Плоское шлифование торцом круга по прямой траектории	X_{n2}
		Плоское шлифование торцом круга по сложной траектории	X_{n3}
2	Вид абразивной обработки при шлифовании цилиндрической или сферической поверхности X_c	Круглое шлифование с параллельными осями заготовки и круга	X_{c1}
		Круглое шлифование бесцентровое	X_{c2}
		Круглое шлифование торцевое двухобластное (для цилиндрических заготовок)	X_{c3}
		Круглое шлифование опоясывающее сплошное (для сферических заготовок)	X_{c4}
3	Вид абразивной обработки при шлифовании сложной геометрической поверхности X_g	Одноточечное шлифование сферическим инструментом	X_{g1}
		Ленточное шлифование	X_{g2}
4	Характеристика инструмента Y_n	Зернистость круга, определяемая по основной фракции (нижнему пределу), мкм	Y_1
		Связка шлифовального круга	Y_2
		Материал абразивных зерен	Y_3
		Концентрация алмазов в шлифовальном круге (по объему), %	Y_4
		Вид покрытия на абразивных зернах	Y_5
		Толщина покрытия на абразивных зернах, мкм	Y_6
		Форма круга (в соответствии со стандартом)	Y_7
		Площадь зоны обработки, мм ²	Z_1
5	Режимы механической обработки Z_n	Линейная скорость шлифования, м/с	Z_2
		Скорость вращения заготовки, м/с	Z_3
		Глубина резания, мм	Z_4
		Продольная подача, мм/ход (мм/об)	Z_5
		Поперечная подача, мм/ход	Z_6
		Угол поворота круга относительно оси вращения заготовки (при круглом шлифовании), град	Z_7
		Давление смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС), МПа	Z_8
		Состав СОТС	Z_9
		Активная правка круга во время обработки	Z_{10}
		Наложение УЗ-колебаний на инструмент, кГц	Z_{11}

тость поверхности керамики соответствовала конструкторскому значению Ra_{dv} , мкм:

$$\begin{cases} f(Q_{fin}) = [X_n, Y_n, Z_n] \rightarrow \max, \\ f(T_{fin}) = [X_n, Y_n, Z_n] \rightarrow \max, \\ f(D_{fin}) = [X_n, Y_n, Z_n] \rightarrow \min, \\ f(Ra) = [X_n, Y_n, Z_n] \rightarrow Ra_{dv}, \end{cases} \quad (9)$$

где Q_{fin} — производительность шлифования при чистовой обработке, см³/мин; T_{fin} — период стой-

кости инструмента при чистовой обработке, мин; D_{fin} — брак, образующийся в процессе чистовой обработки, %.

Коэффициент КЭШ можно выразить в виде среднего арифметического значения коэффициентов, показывающих эффективность каждого параметра, влияющего на КЭШ:

$$RcEfG_{rough} = \frac{Q}{Q_{max}} + \frac{T}{T_{max}} + \frac{D_{min}}{D}, \quad (10)$$

$$RcEfG_{fin} = \frac{Q}{Q_{max}} + \frac{T}{T_{max}} + \frac{D_{min}}{D} \quad (11)$$

Общий коэффициент КЭШ принято обозначать в виде среднеарифметического значения коэффициентов комплексной эффективности при черновой и чистовой обработке:

$$RcEfG = \frac{RcEfG_{rough} + RcEfG_{fin}}{2} \quad (12)$$

Одним из основных критериев для оценки комплексной эффективности абразивной обработки является достижение заданного конструкторского значения шероховатости поверхности Ra керамического изделия при чистовой обработке. Для выявления зависимостей шероховатости обрабатываемой керамики от технологических факторов, которые представляют собой основные показатели режимов резания, был проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) с построением ортогонального плана 2^4 для серии из 16 опытов при различном комбинировании режимов резания. Для экспериментов был использован плоскошлифовальный станок модели ЗЛ722В (рис. 2) с уста-



Рис. 2. Плоско- (а) и круглошлифовальный станок (б)

Таблица 4. Пределы технологических факторов при резании

Уровень	Скорость резания v_{wh} , м/с	Глубина обработки t , мм	Скорость продольной подачи алмазного круга v_{LF} , м/мин	Поперечная подача алмазного круга s_{CF} , мм/ход
Верхний	58	0,128	18	2
Нижний	26	0,001	3	0,5

новленным на нем алмазным шлифовальным кругом типа 1А1 диаметром 500 мм и зернистостью 250/200 мкм на металлической связке М2-01. Для проведения эксперимента использовали образцы в виде пластин размерами 90×40×10 мм из кварцевой керамики. Ограничивающие условия при задании режимов резания показаны в табл. 4.

В программе MatLab была рассчитана регрессионная модель оценки шероховатости поверхности керамических образцов, которая показывает зависимость качества поверхности от режимов резания при чистовом шлифовании и имеет степенной вид:

$$Ra = 42,3 \cdot v_{wh}^{-0,05 \cdot \ln t - 0,88} \cdot t^{0,36 - 0,03 \cdot \ln v_{LF}} \cdot v_{LF}^{0,07 \cdot \ln s_{CF}} \quad (13)$$

При статистических расчетах адекватность регрессионной модели была подтверждена после проверки по t -критерию Стьюдента и F -критерию Фишера. Средневзвешенную остаточную дисперсию определяли по формуле

$$\sigma_{ост} = \frac{\sum (Ra_{эксп} - Ra_{расч})^2}{n} \quad (14)$$

где n — число проведенных опытов в матрице планирования; $Ra_{эксп}$ — значение шероховатости, полученное экспериментальным путем; $Ra_{расч}$ — значение шероховатости, полученное расчетным путем. Средневзвешенная дисперсия $\sigma_{ост} = 0,008$. Отклонение по значению шероховатости Ra в уравнении (13) $\pm 0,089$ мкм.

Поверхности отклика, полученные при фиксации глубины резания t и поперечной подачи s_{CF} , показывают прогнозное значение шероховатости поверхности пластин из кварцевой керамики при выборе определенных показателей режима шлифования. Объем между поверхностями отклика является множеством значений шероховатости поверхности при постоянных значениях t и s_{CF} . Из рис. 3, а видно, что наименьшая шероховатость поверхности достигается при наибольшей скорости круга (скорости резания) и наименьшей скорости продольной подачи круга.

Для нахождения регрессионной модели шероховатости поверхности при шлифовании цилиндрических деталей из кварцевой керамики был использован универсальный круглошлифовальный станок модели ЗУ131ВМ с установленным на нем алмазным кругом диаметром 500 мм и зернистостью 250/200 мкм на металлической связке М2-01. В качестве образца был использован цилиндр из керамики диаметром 45 мм. Был построен план эксперимента в виде латинского квадрата 5^3 с серией из 25 опытов при различном комбинировании режимов резания и получена следующая математическая модель:

$$Ra = 12,25 \cdot s_{LF}^{0,47} \cdot t^{0,14 - 0,11 \cdot \ln s_{LF}} \quad (15)$$

где s_{LF} — продольная подача алмазного круга, мм/об.

Средневзвешенная дисперсия $\sigma_{ост} = 1,760$. Отклонение по значению шероховатости Ra в уравнении (15) $\pm 1,327$ мкм. Из рис. 3, б видно,

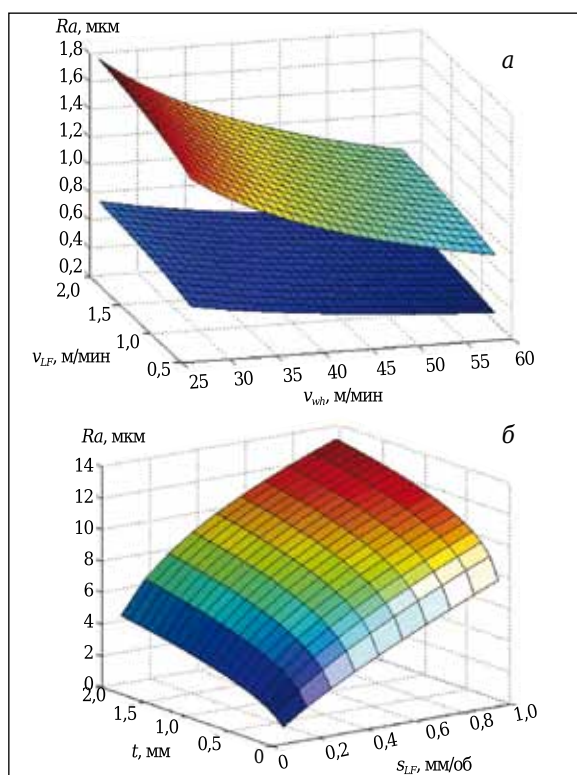


Рис. 3. Поверхности отклика при плоском (а) и круглом (б) шлифовании кварцевой керамики

что минимальное значение шероховатости достигается при наименьшей глубине шлифования и продольной подаче алмазного круга [8, 9].

Принципиальные схемы круглого и плоского шлифования керамических образцов при проведении эксперимента показаны на рис. 4. Изношенная поверхность алмазного круга после проведения эксперимента показана на рис. 5. Видно, что распределение алмазных зерен в металлической связке неравномерное, 30–40 % алмазных зерен выкрошены, что свидетельствует об износе инструмента. Для достижения критического износа круга следует определить максимальный допустимый предел активных алмазных зерен, оставшихся на поверхности круга. На

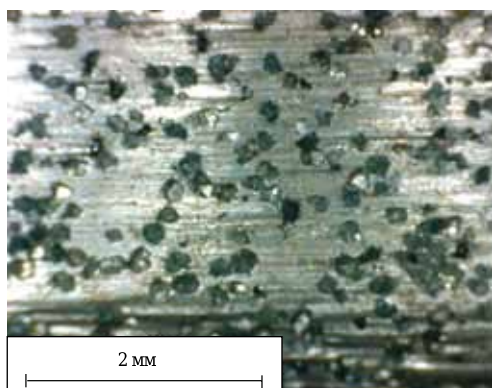


Рис. 5. Поверхность алмазного шлифовального круга после эксперимента

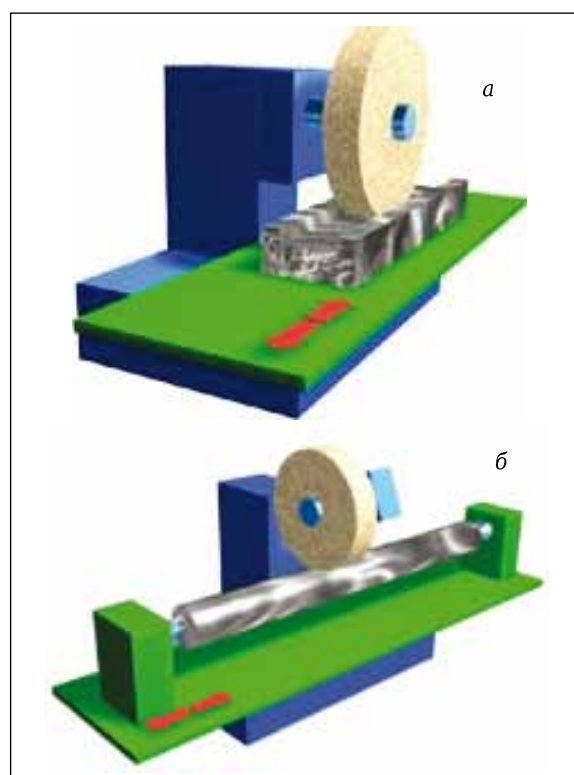


Рис. 4. Принципиальные трехмерные схемы (модели) плоского (а) и круглого (б) шлифования

Таблица 5. Соответствие технологических уровней и факторов

Уровень	n_{wor}^* , мин ⁻¹	t , мм	S_{LF} , мм/об
1	20	0,05	0,064
2	100	0,5	0,134
3	200	1,0	0,275
4	300	1,5	0,510
5	400	2,0	1,025

* Частота вращения обрабатываемой заготовки, мин⁻¹.

рис. 6 видно, что после шлифования кварцевой керамики на зерне алмаза образовались площадка износа и микрокромки. Следовательно, для интенсификации процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов необходимо управлять характером разрушения алмазных зе-

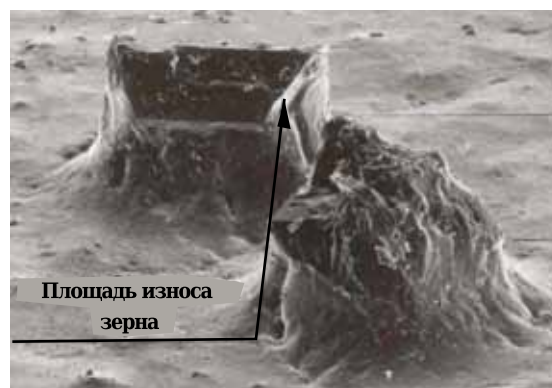


Рис. 6. Изношенное алмазное зерно в металлической связке. ×1000

рен таким образом, чтобы исключить образование на них площадок износа. Это осуществляется, например, путем непрерывного дозируемого разрушающего воздействия на связку круга, т. е. управления его режущим рельефом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения всех значимых управляемых технологических и неуправляемых физических факторов, возникающих в процессе шлифования и влияющих на него, таких как, например, вибрации системы станок – приспособление – инструмент

– деталь (СПИД) и температура в зоне резания, следует проводить масштабное многофакторное планирование с использованием отсеивающих экспериментов и выделения значимых факторов и эффектов взаимодействия. Для это необходимо использовать различные статистические методы: метод Бокса – Бенкина для чистовой обработки и метод дробного факторного эксперимента (ДФЭ) для черновой обработки. Это позволит оптимизировать значения управляемых факторов для достижения максимального коэффициента КЭШ деталей из труднообрабатываемой керамики.

Библиографический список

1. **Рогов, В. А.** Сравнительный анализ механической обработки сверхтвердых керамических материалов / В. А. Рогов, М. И. Шкарупа, Д. К. Гришин // Вестник РУДН. Инженерные исследования. — 2008. — № 2. — С. 15–21.
2. **Пилинский, А. В.** Инновационные методы и вызовы в скоростном и ультраскоростном шлифовании / А. В. Пилинский // Вектор науки ТГУ. — 2015. — № 2. — С. 136–144.
3. **Никифоров, И. П.** Современные тенденции шлифования и абразивной обработки : монография / И. П. Никифоров. — Старый Оскол : ТНТ, 2016. — 150 с.
4. **Душко, О. В.** Алмазное шлифование карбидкремниевой керамики для машиностроения : монография / О. В. Душко, В. М. Шумячер. — Волгоград : Волг-ГАСУ, 2009. — 80 с.
5. **Зубарев, Ю. М.** Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : уч. пособие / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемывшев. — СПб. : Лань, 2010. — 304 с.
6. **Никитков, Н. В.** Скоростная алмазная обработка дета-

лей из технической керамики / Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович. — Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. — 131 с.

7. **Кремень, З. И.** Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин. — СПб. : Политехника, 2007. — 424 с.
8. **Рогов, В. А.** Получение математической модели качества поверхности детали типа оболочки вращения из кварцевой конструкционной керамики / В. А. Рогов, М. И. Шкарупа, В. В. Копылов // Вестник РУДН. Инженерные исследования. — 2011. — № 3. — С. 68–73.
9. **Шкарупа, М. И.** Повышение эффективности механической и физико-технической обработки деталей типа оболочек вращения из конструкционной керамики : дис. ... канд. техн. наук / Шкарупа Михаил Игоревич. — М., 2011. — 189 с. ■

Получено 30.03.17

© М. И. Шкарупа, В. Б. Дудаков, М. М. Лашнев, В. А. Рогов, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



MAGFORUM 2017

Magnesium Minerals & Markets Conference

11–13 июня 2017 г. Radisson Blu Hotel, г. Краков, Польша

Темы:

- Полный спектр магнезитового сырья
- Тенденции и анализ рынка
- Проекты в стадии разработки
- Новейшие технические инновации
- Решения по логистике
- Дальнейшие процессы развития

www.imformed.com

