

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), д. т. н. С. Н. Григорьев, к. т. н. М. А. Волосова

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«Станкин», Москва, Россия

УДК 666.3:546.28'171]:531.717.8

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОФИЛЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА С КАЧЕСТВОМ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ Al_2O_3 -TiC-КЕРАМИКИ

Выявлены основные элементы рабочей поверхности алмазного круга после шлифования Al_2O_3 -TiC-керамики и исследованы их параметры. С использованием разработанной методики построены топографические карты, проекции зерен, поперечные и интегральные профили для выделенных участков рабочей поверхности алмазного круга. Предложен способ прогнозирования качества шлифованной поверхности керамики, основанный на статистической оценке характеристик интегрального профиля рабочей поверхности алмазного круга.

Ключевые слова: Al_2O_3 -TiC-керамика, шлифование, алмазный круг, рабочая поверхность круга (РПК), топографическая карта, проекции зерен, поперечный и интегральный профиль, статистическая оценка, шлифованная поверхность.

ВВЕДЕНИЕ

В основе контактного взаимодействия рабочей поверхности круга (РПК) с керамикой при шлифовании находятся множественные ударные воздействия алмазных зерен (далее — зерен) по обрабатываемой поверхности [1–3]. После первоначального удара зерно выполняет одно из следующих действий: скользит по обрабатываемой поверхности без изменения ее состояния; разрушает микроскопический участок на поверхности керамики; образует риску на поверхности керамики за счет снятия микростружки; создает на обрабатываемой поверхности разрушения типа «выкол» при раскалывании зерна [4–6]. Преобладающий вариант вторичных действий зависит от трех факторов: свойств алмазных зерен, режима шлифования и профиля РПК [7].

При неудовлетворительном результате шлифования два первых фактора легко скорректировать, а существующие методы управления третьим фактором, который по природе является стохастичным, имеют ограниченную эффективность [8–10]. Усложняют процесс управления профилем РПК экстремально высокая твердость контактирующих материалов (алмаза и Al_2O_3 -TiC-керамики), непрогнозируемое изменение профиля РПК при шлифовании, неоднородная структу-

ра керамики и ее неуправляемая поверхностная трансформация под действием технологических нагрузок [11–14]. Недостаточная изученность этих эффектов, а также влияние профиля РПК на структуру и свойства поверхностного слоя керамики при шлифовании не позволяют стабилизировать выходные параметры процесса шлифования высокоплотных керамических материалов [15]. Это является основной причиной появления многочисленных неопределенностей при разработке технологического процесса изготовления высокоточных керамических изделий [16].

Цель настоящей работы — выявить взаимосвязь профиля рабочей поверхности алмазного круга с качеством шлифованной поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики и оценить возможность ее использования для прогнозирования эффективности окончательного шлифования.

Методика исследования

Исследования выполнены с использованием оригинальной методики. Исследовали рабочую поверхность круга 1A1 B2-01 100% AC6 100/80 после шлифования образцов Al_2O_3 -TiC-керамики размерами 20×20×10 мм на станке ОШ-440 в течение t 5 мин со смазочно-охлаждающей жидкостью. Режимы шлифования: скорость вращения круга v 30 м/с, продольная подача $S_{пр}$ 5 м/мин, поперечная подача $S_{поп}$ 1 мм/ход, глубина шлифования t 0,01 (режим № 1) и t 0,03 мм (режим № 2). Качество шлифованной поверхности образцов оценивали ее морфологией и состоянием поверхностного слоя.

Образцы для исследования профиля РПК размерами 2,5×2,5 мм и глубиной 2 мм вырезали с



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

торцевой поверхности круга после каждого эксперимента. После этого выполняли балансировку алмазного круга и его правку с использованием абразивного бруска БП 32x20x200 22А 200 СТ1 5 К Б. Подготовка образцов РПК для металлографических исследований включала их первоначальную обработку в ультразвуковой мойке Elmasonic S70 и последующее нанесение токопроводящей пленки углерода в установке катодного распыления Quorum Q150R ES. Морфологию поверхности образцов РПК и шлифованной керамики изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA 3 LMN (Tescan, Чехия).

Форму зерен, микрорельеф их ребер, морфологию поверхности связки и характер разрушения зерен оценивали на случайно выбранных участках образцов РПК. Число N зерен, высоту h выступания зерен над связкой и расстояние l между вершинами соседних зерен определяли в результате графической обработки микрофотографий (рис. 1, а) выделенного участка РПК. При построении топографической карты этого участка (рис. 1, б) сложную геометрическую форму реальных зерен заменяли равносторонним многогранником, размер которого соответствовал диаметру d окружности, описанной вокруг выступающей части зерна и измеренной на микрофотографии (например, $d_1 = d_1^i$). С использованием d рассчитывали высоту h выступания зерен над связкой по формуле $h = d/k$, где d — диаметр описанной окружности; k — коэффициент ($k = 2,51$), определенный экспериментально при повороте образца РПК на разные углы к электронному пучку в камере СЭМ. При расчете h не учитывали разрушение вершин зерен.

С использованием топографической карты последовательно строили проекцию зерен на плоскость $x_i - z$ (рис. 1, в) и поперечный профиль (рис. 1, г). Выбор поперечной плоскости (а не продольной) объясняется большей информативностью поперечного профиля РПК. На построенной проекции определяли расстояние l между вершинами соседних зерен как разницу в значениях их координат по оси x_i (например, $l_1 = x_2 - x_1$). Для упрощения обработки экспериментальных результатов создавали несколько проекций зерен на выделенном участке, которые объединяли в интегральный профиль. Определяли следующие статистические характеристики интегрального профиля: среднюю $h_{ср}$, минимальную $h_{мин}$ и максимальную $h_{макс}$ высоту выступания зерен над связкой; среднее $l_{ср}$, минимальное

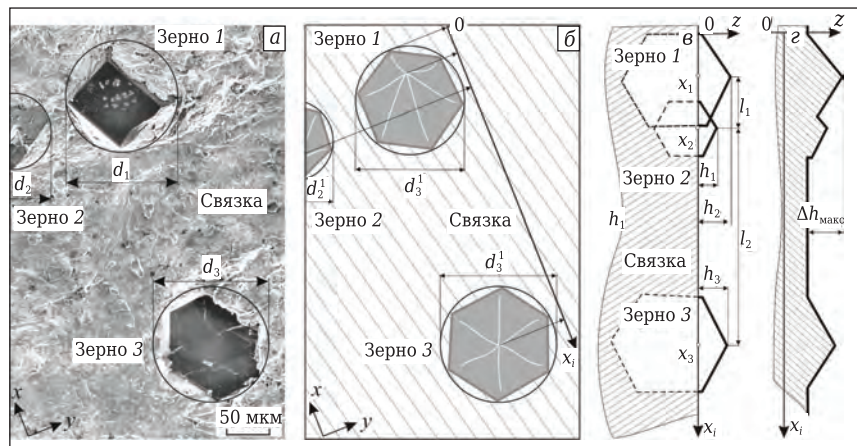


Рис. 1. Графическая иллюстрация методики анализа РПК: а — микрофотография выделенного участка РПК; б — топографическая карта; в — проекции зерен; г — поперечный профиль

$l_{мин}$ и максимальное $l_{макс}$ расстояние между вершинами соседних зерен. Развитость профиля РПК характеризовали показателем $\Delta h_{макс}$.

Приняли единое обозначение координатных осей на микрофотографиях, топографических картах, проекциях зерен и поперечных профилях РПК: ось x — поперечное направление, нормальное плоскости вращения круга; ось y — продольное направление, параллельное плоскости вращения круга; ось z — вертикальное направление, нормальное РПК. Расположение осей x и y ориентировали по отличительным морфологическим признакам на РПК.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее выполненные экспериментальные исследования и компьютерное моделирование [12, 14, 17] показали, что высокая твердость и низкая теплопроводность Al_2O_3-TiC -керамики приводят к генерации высоких теплосиловых нагрузок, действующих как на поверхность керамики 1, так и на РПК 2 (рис. 2). Под действием этих нагрузок формируется профиль РПК за счет разрушения вершин 3 хаотично расположенных зерен 4 и усложняется структура поверхности связки 5 в результате осаждения шлама 6, состоящего из осколков алмазов и частиц стружки керамики. Эти изменения снижают режущую способность РПК, а вносимые коррективы при выборе связующего вещества и наполнителя 7 не вносят принципиальных улучшений в результативность шлифования.

Типичный фрагмент РПК зернистостью 100/80 (по FEPA — D107, по ISO 565 — 106/90 мкм, по ANSI B74.16 — 140/170 меш) после 5 мин непрерывного шлифования (этап нормальной работы алмазного круга) Al_2O_3-TiC -керамики показан на рис. 3. Видно, что РПК имеет развитый профиль (поперечный — по оси x , продольный — по оси y), сформированный хаотично расположенными и выступающими зернами 1. Зерна разных разме-

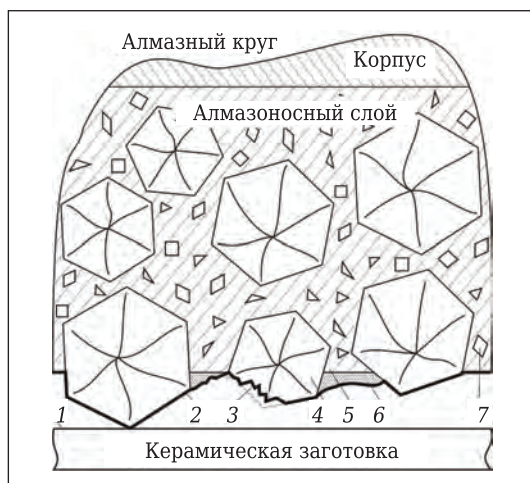


Рис. 2. Схематичное изображение контакта алмазного круга с керамикой

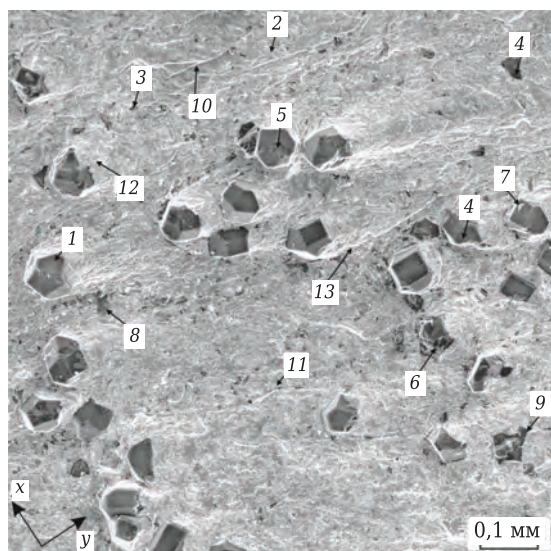


Рис. 3. Внешний вид выделенного участка РПК

ров и формы, имеющие бессистемную пространственную ориентацию, заделаны в связку 2, на поверхности которой имеются мелкие частицы наполнителя 3. Над поверхностью связки выступают вершины 4 зерен, глубоко заделанных в связку. Природа формирования этого профиля РПК определяется стохастическим распределением исходной навески зерен из основной (80 мкм) и крупной (100 мкм) фракции алмазного порошка в соотношении 75 и 13 % (ГОСТ 9206–80).

Зерна имеют развитую поверхность граней и шероховатые ребра, что обеспечивает их надежное удержание в связке. Пространственное расположение зерен определяет возможные варианты их контакта с поверхностью керамики по вершине, по вершине и ребрам, по грани и ребрам. По этой причине на многих зернах имеются разрушенные вершины 5, сколы 6 на гранях и ребрах, которые образуют новые острые режущие кромки. Бездефектные участки ребер кристаллов алмаза имеют

радиус округления 0,1–0,3 мкм. На поверхности отдельных зерен имеются налипшие частицы 7.

На РПК обнаружены следы выпадения целых и частично разрушенных зерен из связки с образованием лунок разного вида. Этот эффект имеет двойственные технологические последствия: негативные — сглаживание профиля РПК и уменьшение ее режущей способности, позитивные — восстановление режущей способности РПК в результате «самозатачивания» алмазного круга. Наиболее распространены «пустые» лунки 8 от выпавших зерен, форма которых представляет собой зеркальное отражение нижней части зерна или имеет выраженные следы пластических деформаций от перемещений (вдавливаний и разворотов) зерна в посадочном месте перед выпадением. Очевидно, в первом случае выпадение зерна произошло при его первых контактах с керамикой из-за недостаточной прочности связи алмаз – связка, во втором — в результате значительных разрушений выступающей части зерна после многочисленных контактов. На дне и боковых поверхностях «пустых» лунок обнаружены параллельные продольные трещины длиной до 25 мкм, единичные поперечные трещины длиной до 100 мкм и частицы шлама разных размеров и формы. На поверхности РПК выявлены лунки, большой объем которых занимают крупные осколки разрушенных алмазов 9. Над задней частью всех лунок зафиксировано нависание крупных навалов шлама.

На поверхности связки выделены два вида участков с разными морфологическими рисунками, причем соотношение площадей этих участков изменяется при увеличении длительности шлифования керамики. Поверхность участков первого вида имеет достаточно ровный и сглаженный морфологический рисунок, который дополняют гребни 10 и риски 11, ориентированные в направлении шлифования. Этот морфологический рисунок имеет сходство с морфологией поверхностей после гидроабразивной обработки. Участки второго вида имеют технологическое происхождение и образованы шламом с тыльной стороны зерен в виде удлиненных навалов 12, которые образованы сглаженными плотноупакованными частицами, вытянутыми в продольном направлении. Ширина этих навалов сравнима с размерами зерен, а их высота уменьшается в направлении от зерна. Вокруг скопления зерен образуется семейство навалов с четко выраженными границами 13.

На рис. 4, а показана топографическая карта выделенного участка РПК (см. рис. 3), включающая тридцать три зерна, из которых в дальнейшем использовали тридцать одно (нумерация зерен 1–31 не изменена). Все пронумерованные зерна разбиты на две группы по удобству их проецирования на поперечные плоскости $x_1 - z$ и $x_2 - z$. Вторая плоскость смещена на расстояние ϵ относительно первой плоскости, что отражено в последующих построениях. На плоскость $x_1 - z$

проецировали зерна 1–15, на плоскость $x_2 - z$ зерна на 16–31.

Анализ проекций зерен двух групп на плоскости $x_1 - z$ и $x_2 - z$ показал, что при формировании профиля РПК реализуются три варианта перекрытия зерен (рис. 4, б). Первый вариант — зерна не перекрывают друг друга (например, зерна 1 и 8 первой группы и зерно 31 второй), второй вариант — крупные зерна полностью перекрывают мелкие (например, зерна 3 и 5 полностью перекрывают соответственно зерна 2 и 4 первой группы, зерна 17 и 22 — соответственно зерна 16 и 21 второй группы). Третий (наиболее распространенный) вариант — соседние зерна частично перекрываются, причем степень перекрытия изменяется от 1 (зерна 19 и 20) до 98 % (зерна 5 и 6).

С использованием проекций зерен построены два поперечных профиля РПК пилообразной формы (рис. 4, в). Установлено, что статистические характеристики h и l двух профилей существенно различаются. Для первой группы зерен $h_{1ср}$ 29,2 мкм, $h_{1мин}$ 15,9 мкм, $h_{1макс}$ 37,4 мкм и $l_{1ср}$ 62,1 мкм, $l_{1мин}$ 7 мкм, $l_{1макс}$ 151 мкм, для второй группы зерен $h_{2ср}$ = 28,3 мкм, $h_{2мин}$ = 11,2 мкм, $h_{2макс}$ = 35,8 мкм и $l_{2ср}$ = 45,9 мкм, $l_{2мин}$ = 12 мкм, $l_{2макс}$ = 113 мкм. Эти характеристики свидетельствуют о том, что зерна первой группы выступают над связкой больше, чем зерна второй группы, а зерна второй группы заделаны в связку более компактно, чем зерна первой группы, особенно в центральной части профиля.

Сформированный интегральный профиль РПК на основе двух поперечных профилей включает два крайних изолированных зерна и непрерывную (на проекции) режущую кромку. Статистические характеристики интегрального профиля (без учета двух изолированных крайних зерен 1 и 31): $h_{\Sigma ср}$ = 28,8 мкм, $h_{\Sigma мин}$ = 11,2 мкм, $h_{\Sigma макс}$ = 37,4 мкм и $l_{\Sigma ср}$ = 50,4 мкм, $l_{\Sigma мин}$ = 7 мкм, $l_{\Sigma макс}$ = 129 мкм. Развитость интегрального профиля РПК на выделенном участке Δh_{Σ} = 16,2 мкм.

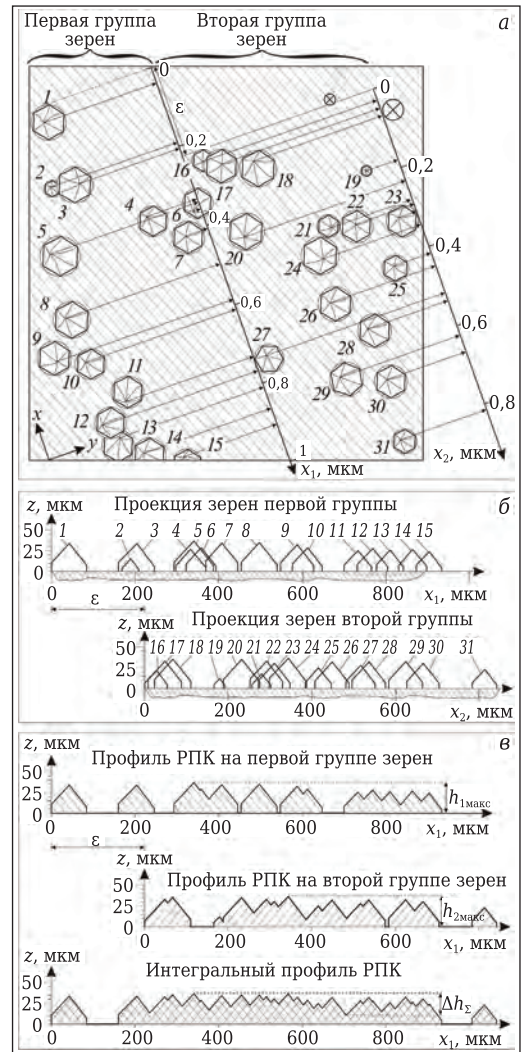


Рис. 4. Топографическая карта (а), проекции зерен (б), поперечные и интегральные профили (в) выделенного участка РПК

Распределение зерен по высоте h выступания на интегральном профиле показано на рис. 5, а. Видно, что наибольший вклад в формирование

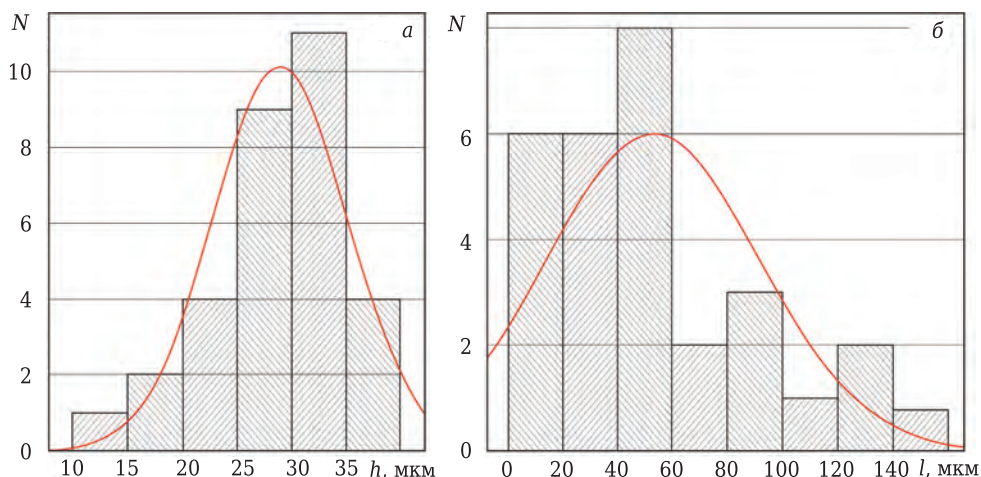


Рис. 5. Гистограмма распределения зерен по высоте h выступания над связкой (а) и по расстоянию l между их вершинами (б) на выделенном участке РПК

высоты интегрального профиля вносят зерна, выступающие над связкой на высоту 25–35 мкм. Зерен, выступающих на высоту 15–25 и более 35 мкм, в 2 раза меньше, чем зерен основной фракции. Наименьшее участие в формировании поперечного профиля РПК принимают зерна, выступающие на высоту 10–20 мкм. Распределение зерен на интегральном профиле по расстоянию l показано на рис. 5, б. Видно, что наибольшее число зерен в двух группах расположено на расстоянии до 60 мкм друг от друга, наименьшее — на расстоянии более 100 мкм друг от друга.

Выполненные построения и результаты статистического анализа позволили сформулировать положение о возможном использовании характеристик интегрального профиля РПК для прогнозирования эффективности шлифования керамических образцов по критерию качества шлифованной поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики. Это положение базировалось на следующих предположениях.

Очевидно, что наибольшая эффективность шлифования будет достигаться при глубине t 0,01 мм, так как в этом случае 71 % зерен, формирующих РПК, активно участвуют во вторичных действиях (разрушение микроскопических участков, создание углублений и риск на поверхности керамики). Припуск с образцов Al_2O_3 -TiC-керамики, который формируют 2–3 «условных ряда» плотноупакованных зерен размерами до 5 мкм, будут удалять алмазы, наиболее выступающие над связкой и имеющие разрушенные вершины. Острые кромки на разрушенных ребрах зерен минимизируют тепловые нагрузки на обрабатываемую поверхность и РПК.

При увеличении глубины шлифования до t 0,02 мм доля активных зерен возрастает до 93 % их общего числа на РПК, что имеет позитивное значение. Однако увеличение общей длины ребер зерен, участвующих в разрушении и микрорезании поверхности керамики, будет увеличивать термомеханическую напряженность процесса шлифования. Более того, в удалении 4–6 «условных рядов» плотноупакованных зе-

рен Al_2O_3 -TiC-керамики будут участвовать не только зерна с острыми кромками, но и зерна с бездефектными ребрами, радиус округления которых составляет 0,3 мкм. Это будет затруднять процесс разрушения керамики и, следовательно, при этом режиме эффективность шлифования следует считать средней.

При шлифовании с глубиной t 0,03 мм РПК необходимо разрушить и «перемолоть» 6–9 «условных рядов» плотноупакованных зерен Al_2O_3 -TiC-керамики, что является достаточно трудной задачей для алмазных кристаллов размерами 80–100 мкм и выступающих над связкой на 1/3 этого размера. Несколько упрощают эту задачу два обстоятельства: первое — в съеме припуска участвуют 100 % зерен, формирующих РПК, второе — зазор 5–7 мкм между связкой и керамикой будет устранять непосредственный фрикционный контакт между ними. Однако высокие тепловые нагрузки, генерируемые в контактной зоне, будут способствовать формированию весьма дефектного поверхностного слоя керамики. Следовательно, этот режим шлифования следует считать неэффективным по критерию качества поверхности. Дальнейшее увеличение глубины шлифования до t 0,04 мм нецелесообразно из-за возникающего фрикционного контакта связки с керамикой.

Выполненная серия экспериментов по шлифованию образцов Al_2O_3 -TiC-керамики подтвердила сформулированное положение о возможности использования характеристик интегрального профиля РПК для прогнозирования эффективности шлифования керамических образцов по критерию качества. В качестве примера на рис. 6 показаны микрофотографии, характеризующие морфологию поверхности образцов, обработанных при двух режимах шлифования. Видно, что морфология обеих шлифованных поверхностей характеризуется хаотичным сочетанием следующих элементов: продольных рисок 1, впадин 2 и выступов 3, областей локального разрушения 4, волнообразных напыльков 5 и разнонаправленных трещин 6. На поверхности пластически деформированного слоя, обра-

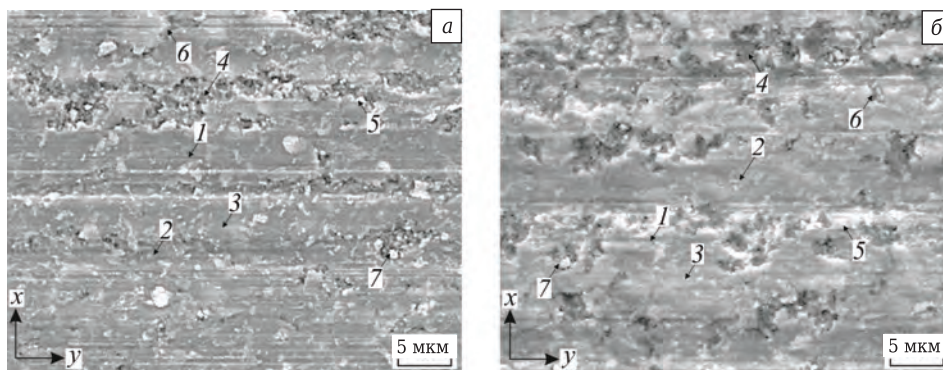


Рис. 6. Морфология поверхности образцов Al_2O_3 -TiC-керамики, шлифованных при режимах № 1 (а) и 2 (б)

зовавшегося при шлифовании, имеются многочисленные частицы-стружки 7.

Одновременно с общими признаками морфологического рисунка этих поверхностей имеются многочисленные различия. *Основное различие в состоянии этих поверхностей* — более «грубый» рельеф поверхности, шлифованной при режиме № 2. Это выражается в большей глубине впадин 2 и высоте выступов 3, а также в более выразительных контурах и больших размерах волнообразных наплывов 5, что свидетельствует о более высокой интенсивности процессов разрушения и пластической деформации в поверхностном слое керамики. Глубокое внедрение зерен в поверхность образцов при режиме № 2 приводит к формированию экстремально мощного источника теплоты и температуры, способствующего размягчению поверхностного слоя керамики. Это является основой пластического выдавливания значительного объема пластичной керамики на ее поверхность. *Второе по значимости различие* — число и размеры области локального разрушения 4. При шлифовании при режиме № 1 образуются цепочки мелких областей локального разрушения, которые занимают до 3 % общей площади обработанной поверхности, при режиме № 2 — крупные области разрушения вытянутой формы площадью до 10 % общей площади обработанной поверхности. *Третьим различием* следует считать длину трещин 6 на шлифованных поверхностях; при режиме № 2 длина этих трещин до 3 раз больше, чем при режиме № 1. *Последнее видимое различие* — разное число частиц-стружек 7 размерами до 3 мкм на поверхности образцов. После шлифования при режиме № 2 число этих частиц-стружек намного меньше, чем при режиме № 1. В совокупности эти отличительные признаки свидетельствуют о том, что профиль РПК оказывает определяющее влияние на процесс формирования морфологии шлифованной поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики через условия контактного взаимодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования алмазного круга 1A1 B2-01 100% AC6 100/80 после шлифования образцов Al_2O_3 -TiC-керамики выявлена совокуп-

Библиографический список

1. **Rupeng, Zhu.** Experimental research on grinding surface waviness of engineering ceramics / *Zhu Rupeng, He Ning, Fu Yucan, Yang Changyong* // Materials Science Forum Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV. — 2014. — Vol. 770. — P. 175–178.
2. **Tanovic, L.** Mechanisms in oxide-carbide ceramic BOK60 grinding / *L. Tanovic, P. Bojanic, M. Popovic* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 58. — P. 9–12.
3. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / *V. V. Kuzin*

ность основных элементов, формирующих его РПК. Установлено, что зерна имеют развитую поверхность граней, шероховатые ребра с радиусом округления 0,1–0,3 мкм, а также многочисленные разрушения и сколы, которые образуют новые острые режущие кромки. На РПК обнаружены следы выпадения целых и частично разрушенных зерен. Выявлено, что поверхность связи на РПК образуют участки двух видов: первые имеют достаточно ровную и сглаженную морфологию, а морфология вторых образована плотноупакованными частицами шлама, вытянутыми в продольном направлении.

С использованием разработанной методики построены топографические карты, проекции зерен, поперечные и интегральный профили выделенных участков РПК. Установлено, что наибольший вклад в формирование высоты интегрального профиля РПК вносят зерна, выступающие над связкой на высоту 25–35 мкм. Зерен, выступающих на высоту 15–25 и более 35 мкм, в 2 раза меньше, чем зерен основной фракции. Наименьшее участие в формировании поперечного профиля РПК принимают зерна, выступающие на высоту 10–20 мкм. Наибольшее число зерен на выделенных участках РПК расположено на расстоянии до 60 мкм друг от друга, наименьшее — на расстоянии более 100 мкм.

На основе экспериментальных исследований сформулировано положение об определяющем влиянии профиля РПК на процесс формирования морфологии шлифованной поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики. С использованием этого положения разработан способ прогнозирования качества шлифованной поверхности керамики, основанный на статистической оценке характеристик интегрального профиля РПК на трех произвольно выбранных участках алмазного круга. Этот способ предназначен для целевого выбора характеристик алмазных инструментов при проектировании технологических процессов изготовления высокоточных керамических изделий.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

// Refract. Ind. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.

Кузин, В. В. Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.

4. **Ohbuchi, Yoshifumi.** Warp in high precision cut-off grinding of Al_2O_3 -TiC ceramic thin plate / *Yoshifumi Ohbuchi, Tetsuo Matsuo, Noboru Ueda* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. — 1999. — Vol. 48. — P. 285–288.

5. **Kuzin, V.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / *V. Kuzin* // Key Eng. Mater. Precision Machining. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.

6. **Yamamoto, Yuki.** Investigation on high depth of cut of ultra-smoothness grinding of Al_2O_3 -TiC ceramic / *Yuki Yamamoto, Heiji Yasui, Yusuke Tanaka, Ryushiro Sakamoto* [et al.] // Proc. ASPE 2007 Annual Meeting. — 2007. — P. 394–397.

7. **Kuzin, V. V.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / *V. V. Kuzin* // Russ. Eng. Res. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.

Кузин, В. В. Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.

8. **Zhang, B.** Grinding induced damage in ceramics / *B. Zhang, X. L. Zheng, H. Tokura, M. Yoshikawa* // J. Mater. Process. Technol. — 2003. — Vol. 132. — P. 353–364.

9. **Kuzin, V. V.** Correlation of Al_2O_3 -ceramic structure with the mechanism of surface layer formation for workpieces during diamond grinding / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, S. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 1. — P. 82–85.

Кузин, В. В. Взаимосвязь структуры Al_2O_3 -керамики с механизмом формирования поверхностного слоя заготовок при алмазном шлифовании / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2019. — № 1. — С. 65–68.

10. **Matsuo, T.** High-precision surface grinding of ceramics with superfine grain diamond cup wheels / *T. Matsuo, M. Touge, H. Yamada* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. — 1997. — Vol. 46. — P. 249–252.

11. **Шкарупа, И. Л.** Механическая обработка керамических материалов на основе оксида алюминия, нитрида и карбида кремния / *И. Л. Шкарупа, Д. А. Климов* // Стекло и керамика. — 2004. — № 6. — С. 16–18.

12. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al_2O_3 -TiC-ceramic surface condition / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.

Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al_2O_3 -TiC-керамики / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63–68.

13. **Рогов, В. А.** Сравнительный анализ механической обработки сверхтвердых керамических материалов шлифованием / *В. А. Рогов, М. И. Шкарупа* // Технология машиностроения. — 2009. — № 5 (83). — С. 12–16.

14. **Kuzin, V. V.** Features of Al_2O_3 -TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

Кузин, В. В. Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики при алмазном шлифовании / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев* // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.

15. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / *V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov* // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 402–406.

16. **Grigoriev, S. N.** Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / *S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin* // Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

Григорьев, С. Н. Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / *С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.

17. **Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in oxide-carbide ceramic surface with developed relief under action of heat flow / *V. V. Kuzin, M. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov* // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 557–560.

Кузин, В. В. Неоднородность напряжений в поверхности оксидно-карбидной керамики с развитым рельефом под действием теплового потока / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 63–66. ■

Получено 23.11.20

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



27–29 января 2021 г.
Токио, Япония

Основные разделы выставки:

- + Функциональные материалы (био- и стройматериалы, бумага, ткань, нетканые технические материалы, полимеры, органические и неорганические материалы, гибридные материалы, материалы для вакуумного напыления и поверхностных покрытий, сверхтонкие изоляторы и проводники, краски, покрытия, добавки, наполнители, смолы и др.)
- + Нанотехнологии и оборудование для изготовления функциональных материалов
- + Технологии использования электромагнитных полей

www.worldexpo.pro