

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

## ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ВЫСОКОПЛОТНОЙ $Al_2O_3$ -TiC-КЕРАМИКИ

По результатам изучения профиля рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании высокоплотной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики установлены основные механизмы разрушения алмазных зерен и формирования слоя шлама на зернах и связке. Оценено влияние факторов изменения профиля рабочей поверхности алмазного круга на контактное взаимодействие при шлифовании и снижение его режущей способности.

**Ключевые слова:** высокоплотная керамика, алмазный круг, разрушение, микро- и макроскол, контактное взаимодействие, смазочно-охлаждающая жидкость, суспензия, слой шлама, режущая способность, качество изготовления.

### ВВЕДЕНИЕ

Качество изготовления высокоточных керамических изделий предполагает выполнение как традиционных требований по точности и шероховатости поверхности, так и дополнительных условий по состоянию их поверхностного слоя [1–3]. Реализацию этого расширенного комплекса требований гарантируют операции алмазного шлифования, оптимально спроектированные на основе углубленных знаний о контактном взаимодействии алмазного круга с керамической заготовкой [4–6]. Важным разделом этих знаний является взаимосвязь постоянно изменяющегося профиля рабочей поверхности круга (РПК) при алмазном шлифовании с качеством изделий, производительностью и себестоимостью их изготовления [7].

Классические представления об этой взаимосвязи базируются на эффектах, затрагивающих основные элементы системы шлифования: алмазное зерно (далее — зерно), связку, керамику, смазочно-охлаждающую жидкость и диспергированный материал заготовки [8–13]. Разрушение зерен, изнашивание связки и осаждение слоя шлама на РПК из ультрадисперсной суспензии изменяют профиль РПК, ухудшая или улучшая режущую способность алмазного

круга [14, 16]. Считается, что в первом случае круг работает в режиме затупления (засаливания) и требует частого использования вспомогательной операции («правка круга»), во втором — в режиме «самозатачивания» [8]. Однако недостаточная изученность природы изменения профиля РПК при алмазном шлифовании высокоплотной керамики не позволяет точно прогнозировать режим работы круга и создает дополнительные трудности при разработке технологического процесса.

В работе поставлена цель изучить природу изменения профиля рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании высокоплотной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали РПК формы 1А1, алмазоносный слой которого выполнен из зерен А4 фракции 120/100 на металлической связке М2-01 после непрерывного шлифования в течение 5, 15 и 30 мин. Шлифовали заготовки размерами 60×50×40 мм из высокоплотной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики на плоскошлифовальном станке ОШ-440 по «маятниковой» схеме с использованием смазочно-охлаждающей жидкости. Режим шлифования: скорость круга  $v_{кр}$  30 м/с, продольная подача  $S_{пр}$  5–15 м/мин, поперечная подача  $S_{поп}$  0,5–1,5 мм/ход, глубина шлифования  $t$  0,01–0,05 мм. Свойства керамики: предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  650 МПа, трещиностойкость  $K_{Ic}$  5,4 МПа·м<sup>1/2</sup>, плотность  $\rho$  4,3 г/см<sup>3</sup> и твердость 93 HRA.

Общий анализ профиля РПК проводили без демонтажа алмазного круга с использованием



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

ручной асферической лупы Eschenbach mobilux (6-кратное увеличение) и мобильного микроскопа Микмед 2.0 (200-кратное увеличение), установленного на столе станка с помощью магнитной стойки и подключенного к компьютеру. Для детального исследования РПК использовали образцы размерами 2,5×2,5 мм и глубиной 2 мм, вырезанные с поверхности алмазного круга после шлифования и демонтажа со станка. Очистку образцов выполняли в ультразвуковой мойке Elmasonic S70. Токопроводящую пленку углерода на образцы, предназначенные для исследования на сканирующем электронном микроскопе, наносили в установке Quorum Q150R ES. После вырезки образцов последовательно выполняли балансировку круга на специализированном приспособлении и правку алмазного круга на станке с использованием абразивного бруска БП 32x20x200 22А 200 СТ1 5 К Б.

Образцы РПК изучали с использованием оптического микроскопа Olympus BX51M, 3D-измерительной системы MikroCAD Premium, сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3LMN, позволяющего получать СЭМ-изображения и анализировать элементный состав в одном окне программного обеспечения. При исследовании образцов РПК использовали следующие координаты: по оси *x* — поперечное направление, нормальное плоскости вращения круга, по оси *y* — продольное направление, параллельное плоскости вращения круга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что природа изменения профиля РПК при шлифовании высокоплотной керамики соответствует классическим представлениям об этом процессе. Вместе с тем высокие твердость и теплостойкость высокоплотной керамики, а также химическая инертность ее компонентов вносят специфические особенности в этот процесс. Первая особенность заключается в генерации в контактной области алмазного круга с керамической заготовкой экстремально высоких циклических силовых и тепловых нагрузок, действующих на РПК. Под действием этих нагрузок происходит интенсивная трансформация состояния основных элементов РПК: разрушение зерен, упругая деформация связки и выпадение зерен. Вторая особенность связана с образованием абразивной суспензии в результате насыщения смазочно-охлаждающей жидкости ультрадисперсным порошком, образовавшимся при разрушении зерен (и диспергировании) припуска, снимаемого с керамической заготовки. Последовательно проанализируем эти особенности, действующие механизмы и последствия.

Хаотичность профиля РПК определяет два возможных варианта контактного взаимодей-

ствия зерна с керамикой: «нет контакта» и «есть контакт». При отсутствии контакта зерно считается пассивным, при наличии контакта активным. В качестве примера на рис. 1 показан фрагмент зерна после 5 мин непрерывного шлифования  $Al_2O_3$ -TiC-керамики. Видно, что зерно имеет малодефектные поверхности с небольшой рельефностью граней и радиусом округления его ребер до 0,3 мкм. Как правило, на этих зернах имеются сглаженные выемки 1 на ребрах размерами до 5 мкм и ямки 2 на гранях размерами до 3 мкм. Эти дефекты имеют природно-технологическое происхождение и могут являться источниками появления зародышевых трещин в алмазном зерне под действием циклически повторяющихся ударных и тепловых нагрузок [8]. Поверхность пассивных зерен в процессе шлифования подвергается незначительному воздействию абразивной суспензии, результатом которого являются избирательное осаждение тонкой пленки шлама 3 на поверхности зерна и налипание частицы шлама 4 округлой формы среднего размера 1 мкм. Более активно формирование слоя шлама происходит на лицевых гранях *Л* зерна с образованием расплющенной частицы на тыльных гранях *Т* зерна формируется навал шлама 6, высота которого практически соответствует высоте выступания зерна над связкой 7.

Морфология поверхности шлама существенно отличается от морфологии поверхности связки на участке 7. На поверхности шлама имеются многочисленные мелкие короткие риски 8 и «протоки» 9, образовавшиеся в результате пропахивания частицами-осколками и перемещения с высокой скоростью абразивной суспензии. Пассивные зерна прочно закреплены в связке и плотно покрываются слоем шлама; трещин и следов упругих перемещений на границах зерно – связка и зерно – слой шлама не обнаружено.

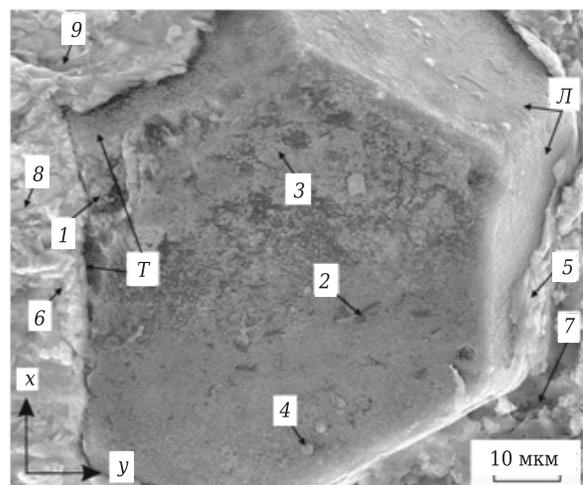


Рис. 1. Фрагмент пассивного зерна на РПК после 5 мин непрерывного шлифования  $Al_2O_3$ -TiC-керамики

После разрыва этих мостиков связи мелкие осколки выпадают в межзеренное пространство и выносятся в пространство с образованием многочисленных рисок 16 на навале шлама. Второй процесс связан с износом связки, приводящим к «обнажению» зерен и уменьшению прочности их удержания в РПК. Третий процесс заключается в оседании образовавшегося шлама на зернах и связке, что приводит к сокращению межзеренного пространства и последующему полному «засаливанию» алмазного круга.

На активных зернах, имеющих контакт с керамикой и находившихся под воздействием циклических силовых и ударных нагрузок, имеют место разрушения в виде микро- и макросколов. Первоначально разрушаются зерна, наиболее выступающие над РПК и воспринимающие эксплуатационную нагрузку. На рис. 2 показан пример разрушения зерна по механизму последовательных микросколов при шлифовании в течение 5 мин. Видно, что в результате последовательных хрупких микросколов изменилась геометрия зерна за счет округления вершин и образования многочисленных острых лезвий, являющихся основой для благоприятного изменения профиля РПК. Однотипный пилообразный морфологический рисунок сформировался на вершинах, ребрах и гранях зерна, подвергшихся силовым и тепловым нагрузкам. На гранях и разрушенных участках зерна присутствуют многочисленные частицы шлама округлой формы.

Как правило, наибольшему разрушению по механизму микроскалывания подвергаются лицевая грань *Л* зерна, в меньшей степени боковые и тыльные грани. При врезании вершины зерна в керамику первоначально происходят микросколы 1 на вершине, а затем на ребрах, ограничивающих *Л*. При образовании последовательных микросколов формируется протяженный поврежденный участок по всему пери-

метру *Л*. Этот процесс является позитивным для изменения профиля РПК и повышения режущей способности алмазного круга. Многочисленные микросколы создают острые режущие кромки, которые активно участвуют в формировании поверхностного слоя керамики, образуя продольные риски на поверхности. Другим следствием разрушения зерен по механизму последовательных микросколов является образование ультрадисперсных алмазных осколков и частиц керамики (при прорезании продольных рисок), которые входят в состав суспензии в качестве сверхтвердой абразивной составляющей.

В данном примере боковая грань *Б1* зерна не имеет каких-либо заметных повреждений (за исключением ребер), а на грани *Б2* происходит макроскол с сокращением площади (в отдельных случаях с исчезновением) поврежденного участка на ребре, о чем свидетельствует морфология образовавшейся поверхности. При разрушении верхних и боковых ребер на лицевой грани *Л* зерна значительно увеличиваются нормальные напряжения на его тыльной грани *Т*, приводящие к макросколам. Из рис. 2 видно, что на *Т* зерна имеются следы двух фасетчатых макросколов 2 и 3 с четко выраженными ступеньками, скол 3 имеет значительно меньший размер, чем скол 2.

Появление участков разрушений на зернах означает увеличение тепловых и силовых нагрузок, действующих на зерно при контакте с керамикой, и последующее разрушение зерна по механизму макроскола. Пример такого разрушения двух граней зерна показан на рис. 3. Видно, что первоначально произошло разрушение вершины 1 зерна по механизму последовательных микросколов, а затем под действием термоусталостных явлений произошли два последовательных макроскола 2 и 3 гранях зерна на *Л1* и *Б* соответственно. Видно, что поверхности

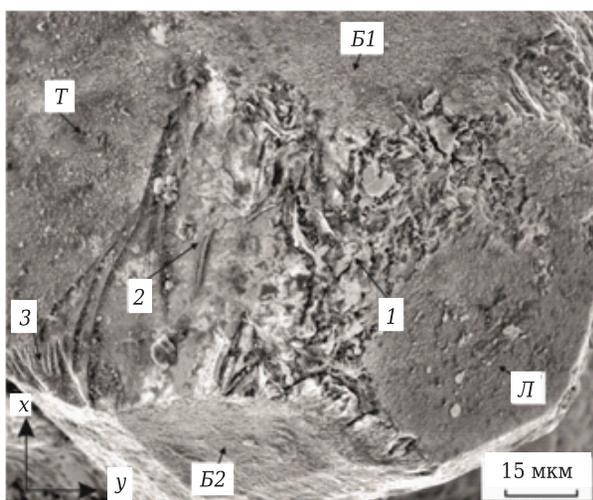


Рис. 2. Фрагмент активного зерна с многочисленными микросколами



Рис. 3. Разрушение алмазного зерна по механизму макроскола

фасетчатого скола 1 с четко ориентированными параллельными гребнями проявляют структуру природного алмаза и механизм макроскола, основанный на растрескивании поверхностного слоя алмаза с образованием своеобразной мозаики. Отсутствие трещин между разрушенным зерном, связкой и слоем шлама свидетельствует об отсутствии упругих перемещений зерна перед разрушением и его надежном закреплении в связке. Разрушение зерен по механизму макроскола означает сглаживание профиля РПК за счет выравнивания высоты выступающих зерен, и это является негативным фактором влияния на режущую способность алмазного круга. Однако при вспомогательной правке и принудительном очищении РПК эти разрушенные зерна «выходят» на поверхность и становятся способными к дальнейшему удалению припуска керамики с заготовки. Это, безусловно, позитивный фактор в изменении профиля РПК.

Наиболее неблагоприятными процессами в изменении профиля РПК являются выпадение зерен из связки и сглаживание РПК по следующему механизму. В локальной области вокруг наиболее выступающего зерна на РПК, имеющей наименьшее заглубление в связку, под действием высоких силовых и тепловых нагрузок происходят упругие деформации связки. Их высокочастотный характер приводит к быстрому образованию эксплуатационных несплошностей на границе зерно – связка и последующему зарождению трещин, ослабляющих силу удержания зерна на РПК. Зерно начинает циклические перемещения с «проворотами» в посадочном месте с постоянно увеличивающейся амплитудой. Одновременно с этим слой шлама заполняет освобождающееся пространство между гранями зерна и боковыми поверхностями посадочного места. Образовавшиеся «клинья» выдавливают зерно с поверхности РПК, что приводит к уменьшению его заглубления и последующему выпадению из связки практически целых зерен. Результат действия этого механизма — значительное выравнивание профиля РПК.

Предложенный механизм выпадения зерен, слабо удерживаемых связкой, иллюстрирует разрушение границы зерно – связка (рис. 4). Видно воздействие повышенных нагрузок привело на первом этапе к разрушению вершин 1 и ребер 2 по механизму последовательных микросколов, последующему разрушению мостиков связи с образованием глубоких контурных полостей 3 на границе зерно – связка и расшатыванию зерна в связке, облегчающему его выпадение. Зерно от окончательного выпадения удерживает неразрушенная граница 4 между его тыльной гранью *T* и связкой. Образование и рост трещин 5 в связке может провоцировать выпадение соседних зерен.

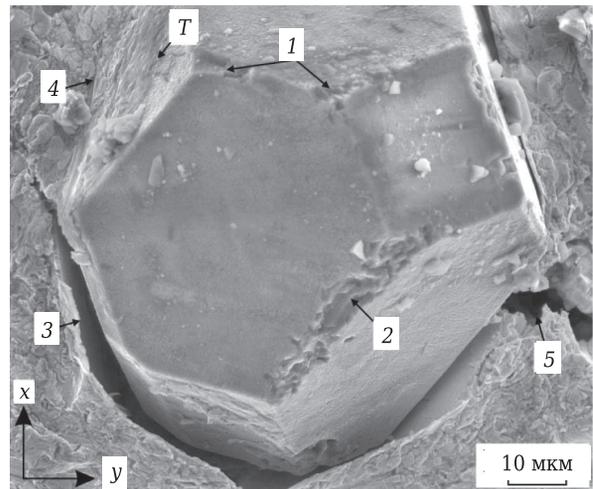


Рис. 4. Упругое перемещение зерна в связке

Наиболее существенное изменение профиля РПК связано с непрерывным осаждением слоя шлама на РПК. Морфологический рисунок поверхности шлама формируют сплюснутые частицы сглаженной формы (рис. 5). Эти плотноупакованные расплюснутые частицы 1 покрывают ограненные частицы-осколки керамики и зерен 2 разных размеров. На поверхности слоя имеются многочисленные поры 3; трещин в этом слое не обнаружено. Особенностью морфологии поверхности шлама являются удлиненные навалы на тыльной стороне зерен. Ширина этих навалов соответствует поперечному размеру зерен, а высота уменьшается в направлении от зерна [7]. Причина их образования связана со специфическим движением жидкости вокруг зерна с образованием внутренней турбулентной зоны.

Образование слоя шлама на РПК происходит под действием двух механизмов. Первый заключается в налипании капель и частиц округлой формы из суспензии, в которой дисперсионная среда

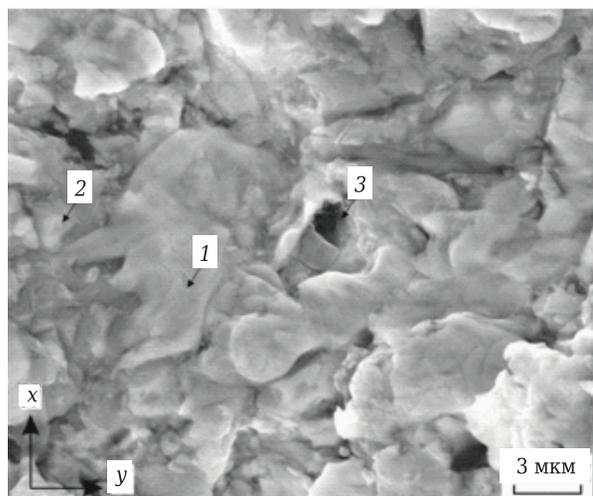


Рис. 5. Морфология поверхности слоя шлама на РПК

образована смазочно-охлаждающей жидкостью, а дисперсная фаза — ультрадисперсными частицами — осколками керамики, зерен и связки. Возможность осаждения частиц дисперсной фазы на РПК объясняется кинетической неустойчивостью суспензии, способной расслаиваться на составляющие фазы при ее нестабильном течении с крайне высокой скоростью в узком пространстве между РПК и поверхностью керамики. Одновременно с этим действует второй механизм, основанный на внедрении крупных осколков алмазов и диспергированных конгломератов керамики в связку из-за неспособности суспензии удалить их из контактной зоны. Совместное действие этих механизмов создает прочную адгезионную связь слоя шлама со связкой.

Присутствие слоя шлама на поверхности РПК становится отчетливо заметным уже после 5 мин непрерывного шлифования, причем интенсификация режима шлифования приводит к значительному увеличению скорости его формирования и толщины слоя. После 15 мин шлифования слой шлама покрывает до 85 % площади связки, а через 30 мин этот слой полностью покрывает исходный профиль РПК. Изучение участков РПК, на которых слой шлама отделился от связки в процессе ультразвуковой мойки, показало, что зерна, изолированные слоем шлама, находятся практически в бездефектном состоянии.

Образование и увеличение толщины слоя шлама оказывает крайне негативное влияние на профиль РПК, в результате чего ухудшается трибология контакта РПК с керамикой за счет появления дополнительных точек динамического соприкосновения, затрудняется съём припуска с керамической заготовки и заметно снижается качество обработки.

#### Библиографический список

1. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // *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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием оригинальной методики изучена природа изменения профиля рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании высокоплотной  $Al_2O_3$ -TiC-керамики. Установлено, что основными механизмами изменения профиля РПК являются: разрушение зерен, выпадение зерен из связки, осаждение слоя шлама. В разрушении зерен задействованы механизмы микро- и макросколов. Выпадение частично разрушенных зерен связано с упругими перемещениями связки, приводящими к образованию глубоких контурных полостей на границе зерно – связка и расшатыванию зерна. Слой шлама осаждается на РПК в результате налипания частиц из суспензии, образованной смазочно-охлаждающей жидкостью и ультрадисперсными частицами-осколками керамики, зерен и связки, а также внедрения крупных осколков алмазов и диспергированных конгломератов керамики в связку. Показано, что при общей зависимости интенсивности этих механизмов от продолжительности непрерывной работы алмазного круга и режима шлифования преобладающее действие на изменение РПК оказывает осаждение слоя шлама. Уменьшить интенсивность образования слоя шлама и его негативные последствия можно выявлением закономерностей гидродинамических процессов в области контактного взаимодействия алмазного круга с керамикой.

\*\*\*

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

5. **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.
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 [et al.] // *Proc. ASPE 2007 Annual Meeting.* — 2007. — P. 394–397.
7. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь профиля рабочей поверхности алмазного круга с качеством шлифованной поверхности  $Al_2O_3$ -TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // *Новые огнеупоры.* — 2020. — № 11. — С. 64–70.
8. **Семко, М. Ф.** Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб [и др.]. — Киев : Техшка, 1978. — 192 с.
9. **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.

10. **Ваксер, Д. Б.** Алмазная обработка технической керамики / Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1976. — 160 с.

11. **Грабченко, А. И.** Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. — Харьков : Вища школа, 1985. — 184 с.

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

13. **Лавриненко, В. И.** Влияние физико-механических характеристик синтетических алмазных порошков марки АС6 на износостойкость шлифовального инструмента / В. И. Лавриненко, Г. Д. Ильницкая, Г. А. Петасюк // Сверхтвердые материалы. — 2013. — № 5. — С. 72–81.

14. **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.

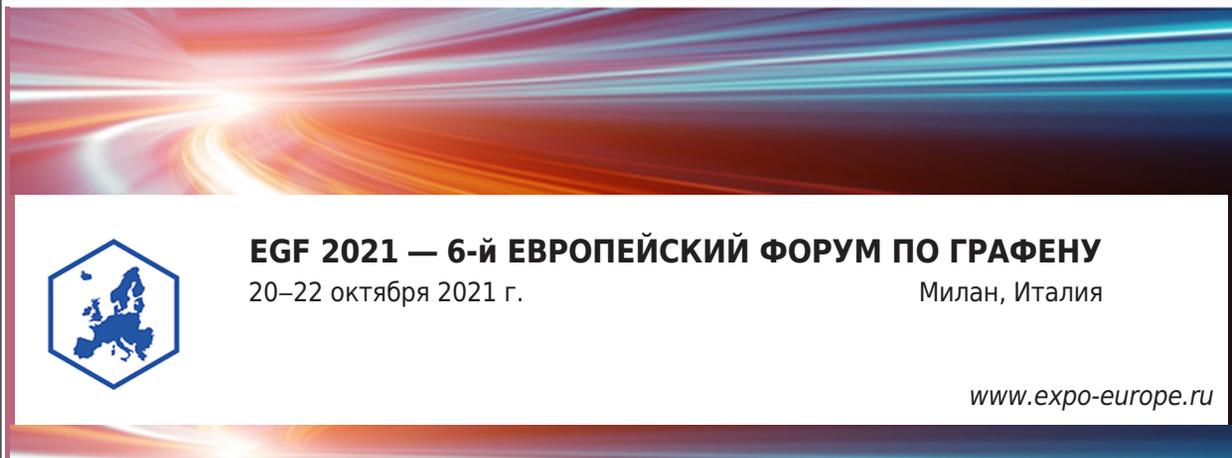
15. **Kuzin, V. V.** Features of  $Al_2O_3$ -TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.

**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. ■

Получено 07.04.21

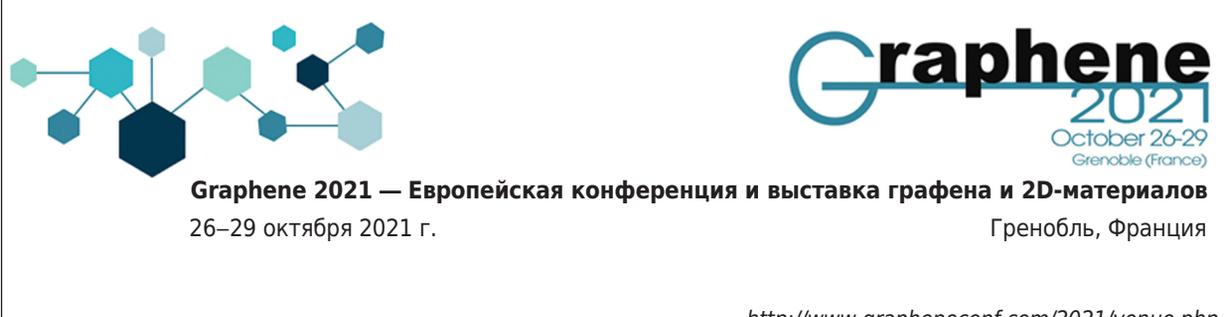
© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,  
М. А. Волосова, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**EGF 2021 — 6-й ЕВРОПЕЙСКИЙ ФОРУМ ПО ГРАФЕНУ**  
20–22 октября 2021 г.  
Милан, Италия

[www.expo-europe.ru](http://www.expo-europe.ru)



**Graphene 2021 — Европейская конференция и выставка графена и 2D-материалов**  
26–29 октября 2021 г.  
Гренобль, Франция

<http://www.grapheneconf.com/2021/venue.php>