

Морфология дефектов высокоплотной керамики при алмазной обработке

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), к. т. н. С. Ю. Фёдоров, д. т. н. С. Н. Григорьев

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

УДК 666.3:[621.923.4:621.921.34]

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ КРОМОК ОБРАЗЦОВ Al_2O_3 -TiC-КЕРАМИКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

На основе изучения особенностей формирования морфологии кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики при плоском алмазном шлифовании определены основные виды и геометрические параметры выкрашиваний. Выявлена взаимосвязь геометрических параметров выкрашиваний с глубиной шлифования, продольной и поперечной подачей. Предложено объяснение значительного влияния режима шлифования и ориентации кромок образцов относительно продольной и поперечной подачи стола станка на морфологию кромок.

Ключевые слова: Al_2O_3 -TiC-керамика, алмазное шлифование, морфология кромок, шлифованная поверхность (ШП), боковая поверхность (БП).

ВВЕДЕНИЕ

Дефекты, образующиеся на кромках заготовок при механической обработке, снижают точность деталей, препятствуют сборке узлов, повреждают сопрягаемые поверхности и негативно влияют на эксплуатационные характеристики изделий [1]. Обработка шлифованием заготовок из хрупких керамических материалов сопровождается образованием на их кромках дефектов в виде выкрашиваний [2–6]. Стремление к повышению производительности изготовления деталей за счет интенсификации режимов шлифования сопровождается увеличением размеров этих выкрашиваний [7]. При этом снижение интенсивности режимов шлифования существенно повышает время обработки, что в отдельных случаях экономически неэффективно [8, 9].

Частично эту проблему удается решить за счет создания технологических методов минимизации степени дефектности кромок керамических заготовок. В частности, в работе [10] предложен способ уменьшения размеров выкрашиваний за счет применения кругов с конической «заходной» частью. Разработан также способ торцевого шлифования с планетарной кинематикой и последующей притиркой [11]. Эффективность применения метода дозированного распыления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), уменьшающего размеры выкрашиваний при плоском шлифовании заготовок из оксидной керамики, проанализирована в работе [12].

Другим подходом к решению существующей проблемы является изготовление фасок разных

формы и размеров на шлифованных поверхностях заготовок на следующем этапе технологического процесса [13–15]. Однако в настоящее время нормирование геометрии этих фасок затруднено из-за отсутствия научно обоснованных рекомендаций, что связано с недостаточной изученностью процесса формирования морфологии кромок керамических заготовок при шлифовании.

В МГТУ «Станкин» выполнены комплексные исследования природы образования выкрашиваний на кромках образцов из разных керамических материалов, а также влияния режимов плоского шлифования на их геометрию. Цель этих исследований — создание технологических рекомендаций по назначению геометрических параметров фаски и расчета припуска на обработку. Результаты этого исследования будут представлены в цикле статей, первая из которых посвящена обработке образцов Al_2O_3 -TiC-керамики, нашедшей широкое применение в качестве инструментального и конструкционного материала [16, 17].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены с использованием оригинальной методики. В экспериментах применяли образцы Al_2O_3 -TiC-керамики размерами $12 \times 12 \times 4$ мм с фаской размерами $0,2 \times 45^\circ$ на всех кромках (рис. 1, а) и шероховатостью поверхностей $Ra = 0,15 \div 0,2$ мкм. Наличие фаски обеспечивало отсутствие выкрашиваний шириной более 3 мкм на кромках образцов. Физико-механические свойства этой керамики приведены в статье [18].

Образцы обрабатывали на плоскошлифовальном станке модели ОШ-550 периферией алмазного круга 1А1 В2-01 100 % АС6 160/125 с применением СОЖ. Продольную подачу при шлифовании изменяли в диапазоне $S_{пр} = 5 \div 15$ м/мин, поперечную



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

в диапазоне $S_{\text{поп}} = 0,5 \div 1,5$ мм/ход, глубину шлифования в диапазоне $t = 0,01 \div 0,05$ мм при постоянной скорости круга $v_{\text{кр}} = 30$ м/с. На каждом режиме шлифовали 5 линейно расположенных образцов вдоль направления продольной подачи, кромки которых нумеровали относительно $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{поп}}$ стола станка (рис. 1, б). Видно, что противоположные кромки, расположенные параллельно направлению продольной подачи стола станка, имели номера 1 и 2 (далее № 1 / 2), а кромки, расположенные параллельно направлению поперечной подачи, — номера 3 и 4 (далее № 3 / 4).

Процесс шлифования включал два этапа: на первом этапе снимали припуск толщиной $t = 0,15$ мм для удаления фаски на кромках образца и создания стабильного теплового баланса в зоне обработки, на втором — выполняли 5 проходов с установленной глубиной шлифования. На последнем проходе алмазный круг перемещался в направлении от кромки № 1 к кромке № 2. Дефектность кромок, образованных шлифованной поверхностью (ШП) и боковыми поверхностями (БП) образцов Al_2O_3 -TiC-керамики, характеризовали шириной a выкрашиваний и углом β скалывания (рис. 2). Измерение a и β проводили с использованием при-

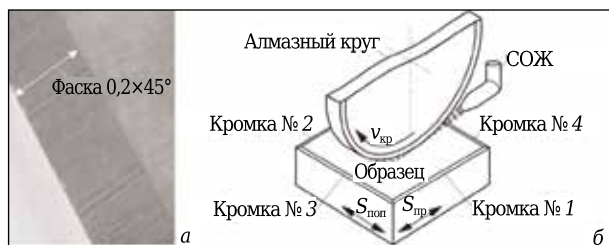


Рис. 1. Фаска на кромке образца (а) и схема шлифования (б)

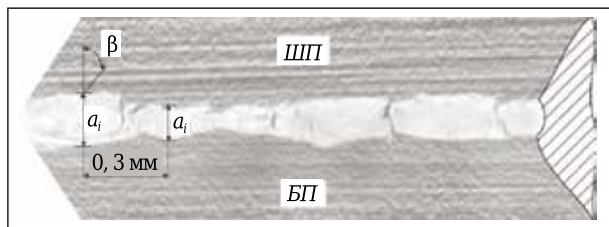


Рис. 2. Схема измерения ширины и угла скола выкрашиваний на кромках образцов

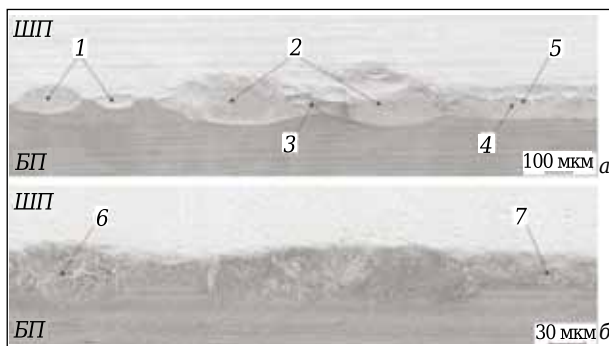


Рис. 3. Морфология кромок № 1 / 2 (а) и № 3 / 4 (б)

бора «MikroCAD premium» на всей длине (12 мм) кромок с интервалом 0,3 мм. Среднее значение ширины выкрашиваний на каждой кромке рассчитывали по результатам 200 измерений (40 измерений на каждом образце \times 5 образцов). Морфологию поверхности выкрашиваний на кромках образцов изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ кромок образцов Al_2O_3 -TiC-керамики после шлифования показал их высокую дефектность из-за присутствия многочисленных выкрашиваний, ширина которых изменяется в широком диапазоне (17–150 мкм). На этот диапазон и, соответственно, среднюю ширину выкрашиваний существенно влияют параметры режима шлифования керамических образцов. Выявлена также однозначная корреляция ширины выкрашиваний на кромках керамических образцов с направлением и размером дефектов в их поверхностном слое на ШП [16]. Установлено, что морфология противоположных кромок, например кромок № 1 и 2, на образцах является практически идентичной. Однако морфологические рисунки взаимно перпендикулярных кромок, например кромок № 1 и 3, существенно отличаются друг от друга. Эти различия хорошо видны на микрофотографиях, показанных на рис. 3. Проанализируем морфологию кромок № 1 / 2 и № 3 / 4, а также специфику выкрашиваний на этих кромках.

Выкрашивания на кромках № 1 / 2 имеют форму фасеточных сколов эллипсной формы, большая ось которых ориентирована вдоль этих кромок (см. рис. 3, а). Эти сколы имеют четко очерченные границы как на ШП, так и на БП. Угол β для этих выкрашиваний составляет 40–50°, причем режим шлифования не приводит к его существенному изменению. Рельеф этих кромок имеет комбинированный морфологический рисунок, определяемый характерными формами выкрашиваний. Этими характерными формами являются малые сколы 1, между которыми имеются фрагменты бездефектной кромки; крупные сколы 2, «перекрывающие» друг друга посредством многочисленных мелких сколов, образующих «хребет» 3; цепочка сколов 4, имеющая достаточно стабильную ширину по всей длине. Малые сколы 1 имеют симметричную форму относительно «идеальной» кромки образца, а форма крупных сколов 2 и цепочки сколов 3 характеризуется некоторой вытянутостью в сторону ШП за счет присутствия многочисленных каскадов мелких сколов 5, образовавшихся на границе сопряжения с ШП. Эти каскады увеличивают ширину выкрашиваний, но не изменяют угол скалывания.

Выкрашивания на кромках № 3 / 4 имеют принципиально иной вид; их можно определить как хаотичные локальные разрушения керамики, произошедшие на пересечении двух поверхностей

(см. рис. 3, б). Видно, что выкрашивания образованы вырывами крупных конгломератов зерен из керамической матрицы, имеющих хаотичный вид с преобладанием эллипсной 6 и прямоугольной 7 формы. Эти локальные разрушения происходят под углом β более 60° , что определяет несимметричность их формы относительно «идеальной» кромки образца за счет большей вытянутости выкрашивания вдоль БП. Округление границ между выкрашиваниями на ШП придают морфологии кромок № 3 / 4 определенную «мягкость» линий; на БП границы имеют четкие контуры. В наибольшей степени эта особенность дефектной кромки проявляется на границе выкрашивание – ШП из перемещения пластически деформированного слоя на поверхность выкрашиваний со стороны ШП.

Анализ микрофотографий, показанных на рис. 4, позволяет детализировать морфологию кромок на образцах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики. Видно, что фасеточные сколы на кромке № 1 образовались в непосредственной близости от впадин, сформировавшихся на ШП керамических образцов в результате микрорезания единичными алмазными зернами (см. рис. 4, а). В частности, граница мелкого скола 1 проходит по дну впадины 2, а его боковые поверхности сформированы поперечными трещинами, зародившимися при образовании этой впадины. Образование крупного скола 3 также связано с впадиной 4, причем поверхность этого фасеточного скола имеет сложный пространственный вид, что свидетельствует об участии в его происхождении большого числа трещин, развивающихся по сложным траекториям под действием комплекса термо-механических нагрузок при шлифовании. Характерные признаки выкрашивания на кромке № 3 показаны на рис. 4, б. Видно, что наиболее удаленная точка поверхности выкрашивания по ШП совпадает с дефектом «углубление» 5 на ШП, а локальное разрушение керамики происходит на границе выкрашивание – ШП с участием пластически деформированного слоя 6, который «наваливается» на исходную структуру керамики 7. Установлено, что наиболее существенно на процесс разрушения кромок № 3 / 4 влияют дефекты в виде впадин, образовавшиеся на ШП керамических образцов.

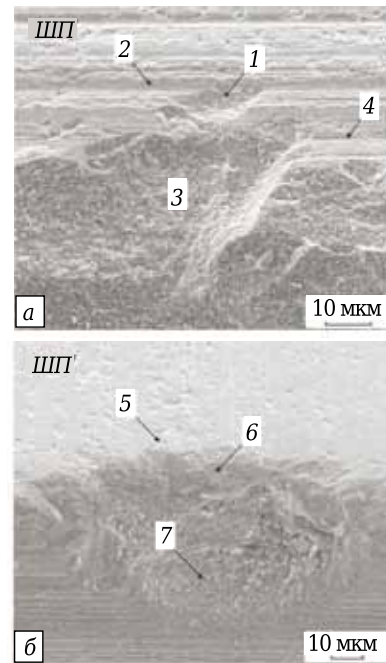


Рис. 4. Морфология поверхности скола на кромке № 1 (а) и выкрашивания на кромке № 3 (б)

Столь существенная разница в морфологии кромок № 1 / 2 и № 3 / 4 определяется разными условиями разрушения керамики, зависящими от процессов, протекающих на ШП. Поверхностные дефекты, образовавшиеся на ШП в непосредственной близости от кромок, являются концентраторами микронапряжений в поверхностном слое керамики, которые инициируют образование выкрашиваний. При шлифовании $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики такими дефектами являются впадины, оказывающие наибольшее влияние, а также поперечные трещины, углубления и области локальных разрушений [18]. Следует отметить, что направление впадин на ШП совпадает с расположением кромок № 1 / 2 на образцах, а на кромках № 3 / 4 их траектории пересекаются под прямым углом.

На рис. 5 показаны зависимости влияния параметров режима шлифования на среднюю ширину выкрашиваний на разных кромках образцов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiC}$ -керамики. Видно, что параметры режима шлифования существенно влияют на a на всех кромках образ-

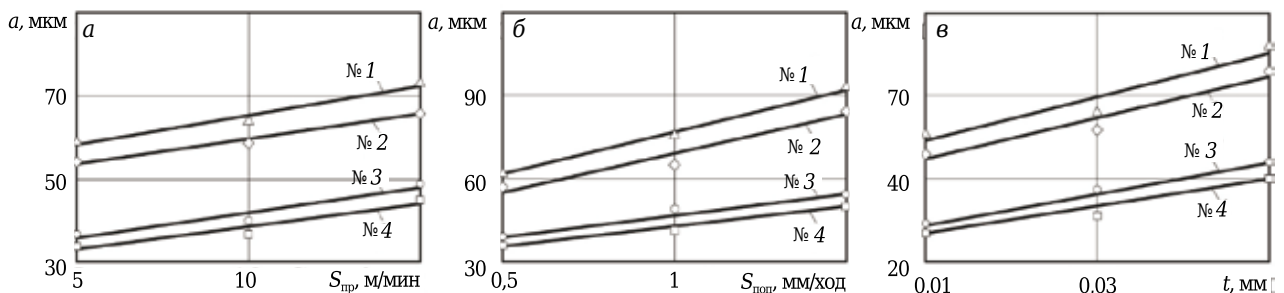


Рис. 5. Влияние $S_{шп}$ (а), $S_{поп}$ (б) и t (в) на среднюю ширину a выкрашиваний на кромках № 1 – № 4

цов, причем интенсификация режима шлифования приводит к ее увеличению. С повышением $S_{\text{пр}}$ в диапазоне 5–15 м/мин ($S_{\text{поп}} = 0,8$ мм/ход, $t = 0,04$ мм) a увеличивается от 59 до 73, от 54 до 66, от 37 до 49 и от 34 до 45 мкм на кромках № 1–№ 4 соответственно (см. рис. 5, а). При увеличении $S_{\text{поп}}$ в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход ($S_{\text{пр}} = 12$ м/мин, $t = 0,04$ мм) a возрастает от 62 до 93, от 57 до 85, от 39 до 55 и от 36 до 50 мкм на кромках № 1–№ 4 соответственно (см. рис. 5, б). С повышением t в диапазоне 0,01–0,05 мм ($S_{\text{пр}} = 12$ м/мин, $S_{\text{поп}} = 0,8$ мм/ход) a увеличивается от 51 до 72, от 46 до 66, от 29 до 44 и от 27 до 40 мкм на кромках № 1–№ 4 соответственно (см. рис. 5, в).

Очевидно, различия в значениях ширины выкрашиваний на противоположных кромках (№ 1 и 2, № 3 и 4) связаны с неодинаковым сочетанием термических и силовых нагрузок при входе алмазного круга в контакт с керамикой и последующем выходе из контакта на последнем проходе. В соответствии с методикой исследования пятый (последний) проход при шлифовании, формирующий окончательную морфологию кромок образца, начинался с «врезания» в образец по кромке № 1. В этот момент на «холодный» керамический образец действуют ударные силовые нагрузки со стороны алмазных зерен, что приводит к формированию в поверхностном слое керамики экстремально высокой неоднородности микронапряжений [19]. В этих условиях резко увеличивается вероятность зарождения и роста хрупких трещин на кромке № 1.

В последующий момент времени происходят практически мгновенное повышение температуры в поверхностном слое керамики и стабилизация теплового баланса в зоне шлифования. Тепловой фактор оказывает благоприятное влияние на неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики, в том числе с дефектами, и, соответственно, уменьшает вероятность появления и роста трещин [20–22]. В этих условиях (комбинированное действие силовых и тепловых нагрузок на поверхностный слой керамики) осуществляется выход алмазного круга из контакта с образцом по кромке № 2. Результаты численных экспериментов, полученные в работе [23], позволяют предположить, что снижение микронапряжений в поверхностном слое керамики, а также их неоднородности является основной причиной того, что ширина выкраши-

ваний на кромке № 2 меньше, чем на кромке № 1. Аналогичным образом можно объяснить разницу в ширине выкрашиваний на кромках № 3 и 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований, выполненных с использованием оригинальной методики, установлено, что при плоском алмазном шлифовании образцов Al_2O_3 –TiC-керамики на их кромках образуются многочисленные выкрашивания разной формы и размеров. Эти выкрашивания определяют морфологию кромок образцов. Установлено, что выкрашивания на кромках № 1 / 2 имеют вид фасеточных сколов, а на кромках № 3 / 4 образованы за счет вырывов крупных конгломератов зерен из керамической матрицы. Размеры выкрашиваний изменяются в широком диапазоне, причем их ширина зависит от ориентации кромок образца относительно продольной и поперечной подачи стола станка при шлифовании. Среднее значение ширины выкрашиваний на кромках № 1 и 2 больше, чем на кромках № 3 и 4, в 1,7 раза, а на кромках № 1 и 3 больше в среднем на 7 — 11 %, чем на кромках № 2 и 4. Угол скалывания для выкрашиваний на кромках № 1 / 2 составляет 40–50°, на кромках № 3 / 4 — 60°.

С интенсификацией режима шлифования среднее значение ширины выкрашиваний увеличивается на всех кромках Al_2O_3 –TiC-керамики. С увеличением $S_{\text{пр}}$ от 5 до 15 м/мин значение a увеличивается на кромках № 1 и 2 в 1,2 раза, на кромках № 3 и 4 в 1,3 раза. Увеличение $S_{\text{поп}}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход приводит к возрастанию a в 1,5 раза на кромках № 1 и 2 и в 1,4 раза на кромках № 3 и 4. С увеличением t от 0,01 до 0,05 мм a возрастает на кромках № 1 и 2 в 1,4 раза, на кромках № 3 и 4 в 1,5 раза. Столь существенные различия в морфологии кромок образцов Al_2O_3 –TiC-керамики связаны с термомеханической напряженностью локальных объемов керамики, находящихся в зоне действия нагрузок, генерируемых алмазным кругом при шлифовании.

Настоящая работа поддерживается Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания МГТУ «СТАНКИН» в сфере научной деятельности (регистрационный номер проекта 9.1372.2017).

Библиографический список

1. **Лосев, А. В.** Необходимость использования отделочно-зачистных технологий в машиностроении / А. В. Лосев, О. А. Лосева, Ю. С. Дмитриевская // Металлообработка. — 2010. — № 1 (49). — С. 2–9.
2. **Kun, Li.** Surface / subsurface damage and the fracture strength of ground ceramics / Li Kun, T. Warren Liao // J. Mater. Proc. Tech. — 1996. — Vol. 57. — P. 207–220.

3. **Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на основе нитрида кремния / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19–24.

Kuzin, V. V. Technology for machining high-refractory ceramic parts based on silicon nitride / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, № 4. — P. 204–208.

4. **El-Wardany, T.** Optimum process parameters to produce green ceramic complex parts / *T. El-Wardany, R. Barth, J. Holowczak [et al.]* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. — 2009. — Vol. 58. — P. 109–112.
5. **Kuzin, V. A.** A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / *V. Kuzin* // Key Eng. Mat. Precision Machining. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.
6. **Liang, Xiaohu.** Fractal analysis of engineering ceramics ground surface / *Xiaohu Liang, Bin Lin, Xuesong Han, Shangong Chen* // Appl. Surf. Sci. — 2012. — Vol. 258. — P. 6406–6415.
7. **Кузин, В. В.** Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41–45.
- Kuzin, V. V.** Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.
8. **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.
9. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.
- Kuzin, V. V.** Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.
10. **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.
11. **Волосова, М. А.** Исследование влияния комбинированной поверхностной обработки на физико-механические характеристики оксидной и нитридной режущей керамики / *М. А. Волосова* // Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2013. — № 2. — С. 39–43.
12. **Etami, M.** Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al_2O_3 engineering ceramics / *M. Etami, M. H. Sadeghi, Ahmed A. D. Sarhan* // Journal of Manufacturing Processes. — 2013. — Vol. 15. — P. 374–388.
13. **Wang, J.** Modeling the dependency of edge chipping size on the material properties and cutting force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials / *J. Wang, P. Feng, J. Zhang [et al.]* // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2016. — Vol. 101. — P. 18–27.
14. **Кузин, В. В.** Особенности эксплуатации канавочных резцов с керамическими пластинами при обработке деталей из закаленных сталей / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров, С. Ю. Федоров* // Вестник машиностроения. — 2012. — № 8. — С. 73–77.
- Kuzin, V. V.** Performance of Channel Cutters with Ceramic Plates in Machining Quenched Steel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov, S. Yu. Fedorov* // Russian Engineering Research. — 2013. — Vol. 33, № 1. — P. 24–28.
15. **Ventura, C. E. H.** Strategies for grinding of chamfers in cutting inserts / *C. E. H. Ventura, J. Köhler, B. Denkena* // Precision Engineering. — 2014. — Vol. 38. — P. 749–758.
16. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров [и др.]* // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46–50.
- Kuzin, V. V.** Tooling for high-speed cutting / *V. V. Kuzin, S. I. Dos'ko, V. F. Popov [et al.]* // Russian Engineering Research. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.
17. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
- Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / *V. V. Kuzin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
18. **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.
- Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al_2O_3 -TiC-ceramic surface condition / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.
19. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 47–51.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 1. Effect of complex mechanical loading / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.
20. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние тепловой нагрузки / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 2. Effect of thermal loading / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.
21. **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.
- 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* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 557–560.
22. **Kuzin, V.** Effect of thermal loading on stresses in defective surface layer of ceramics / *V. Kuzin, S. Grigor'ev, M. Portnoi* // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 189–192.
23. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 4. Совместное действие силовых и тепловых нагрузок / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 29–34.
- Kuzin, V. V.** Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 4. Combined effect of force and thermal loads / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 40–44. ■

Получено 24.04.17

© В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров,
С. Н. Григорьев, 2017 г.