

Д. Т. Н. В. В. Кузин¹ (✉), Н. Р. Портной¹, К. Т. Н. С. Ю. Фёдоров¹, В. И. Мороз²

¹ ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² ОАО «Сандвик – МКТС», Москва, Россия

УДК 621.924.93:666.3

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ

Экспериментально установлена связь технологических параметров воздушно-абразивной обработки с морфологией поверхности режущих пластин ВОР71 из оксидно-карбидной керамики. Выявлены особенности формирования поверхности керамики в этом процессе и механизмы, участвующие в нем. Показана высокая эффективность воздушно-абразивной обработки для улучшения эксплуатационных характеристик керамических изделий.

Ключевые слова: воздушно-абразивная обработка (ВАО), оксидно-карбидная керамика, морфология, шероховатость, режущая пластина, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным технологическим процессом изготовления изделий из керамических материалов является струйно-абразивная обработка, заключающаяся в воздействии высокоскоростной абразивной струи на поверхность заготовки [1]. В результате этого воздействия на заготовке формируется поверхностный слой, придающий разным керамическим материалам улучшенные свойства [2]. Положительное влияние заключается в уменьшении числа дефектов, образующихся после алмазного шлифования и интенсифицирующих износ изделий при эксплуатации [3, 4].

В качестве носителя абразивных частиц при струйно-абразивной обработке используют жидкость и воздух. В первом случае «инструментом», обеспечивающим снятие припуска с заготовки, является гидроабразивная струя, во втором — воздушно-абразивная струя. Особенности формирования поверхностного слоя керамики при гидроабразивной обработке рассмотрены в работах [5, 6]. В отношении воздушно-абразивной обработки (ВАО) результаты выполненных исследований имеют несистемный характер, что не позволяет оценить эффективность этого метода для управления состоянием поверхностного слоя керамических изделий. Вместе с тем разработка новых методов повышения эксплуатационной стабильности кера-

мических изделий является актуальной научно-технической задачей [7].

В настоящей работе поставлена цель — изучить влияние ВАО на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики (на примере режущих пластин ВОР71).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования использовали четырехгранные режущие пластины ВОР71 размерами 12,7×12,7×4,76 мм из оксидно-карбидной керамики; ВАО пластин выполняли в двухкамерной установке планетарного типа. Пластины 1 фиксировали в пространстве между четырьмя штырями 2 на внешней поверхности сателлитов 3, расположенных на подвижном рабочем столе 4 установки (рис. 1, а). Синхронизация перемещений исполнительных органов установки обеспечивала вращение сателлитов с пластинами только в момент их пребывания в зоне действия воздушно-абразивной струи, формируемой каждой форсункой. За счет вращения рабочего стола со скоростью v_1 пластины перемещали относительно форсунок, а вращение сателлитов со скоростью v_2 в момент пребывания пластин в зоне действия каждой форсунки обеспечивало равномерную обработку всех рабочих поверхностей (передней, четырех задних и периметра упрочняющей фаски) пластин (рис. 1, б).

Рабочий цикл ВАО состоял из однократного прохождения пластин относительно одиннадцати форсунок, причем в зоне действия каждой форсунки пластины совершали один полный



В. В. Кузин

E-mail: kyzena@post.ru

оборот. Время пребывания пластин в зоне действия каждой форсунки составляло 1, 2 и 3 с, при этом общее время обработки τ составляло 11, 22 и 33 с соответственно. Давление P воздушно-абразивной струи изменяли в диапазоне от 1,5 до 2,5 ат. Угол α наклона форсунок (угол атаки воздушно-абразивной струи) во всех экспериментах оставался неизменным, $\alpha = 45^\circ$. Также были постоянными: абразив — белый электрокорунд фракции 150 мкм, диаметр сопла форсунки $d_{\phi} = 7$ мм и расстояние от сопла до заготовки $L = 120$ мм.

Качество ВАО оценивали морфологией и шероховатостью рабочих поверхностей пластин, а также радиусом округления лезвия пластины. Для измерения этих параметров использовали оптический микроскоп «SteREO DiscoveryV12», сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA 3LMH, прибор «MicroCAD premium», профилограф-профилометр HOMMEL TESTER T8000. В качестве примера на рис. 1, б показана 3D модель фрагмента режущей пластины ВОК71, на которой обозначены ее основные функциональные элементы. Показаны также два сечения А–А (грань пластины) и Б–Б (вершина пластины), в которых строили профиль рабочей части пластины. Пример построения этого профиля в сечении А–А с выделенным радиусом ρ округления лезвия керамической режущей пластины показан на рис. 1, в. На этой кривой отрезок a_1a_2 принадлежит передней поверхности, отрезок a_2a_3 — упрочняющей фаске, отрезок a_3a_4 — лезвию, отрезок a_4a_5 — задней поверхности пластины. Аналогичные отрезки (b_1b_2 , b_2b_3 , b_3b_4 и b_4b_5) присутствуют на кривой, описывающей профиль в сечении Б–Б. Необходимость использования этих двух сечений для измерения ρ связана с существенными различиями в их значениях на исходных пластинах.

Эффективность ВАО оценивали по результатам сравнительных испытаний режущих пластин ВОК71 при продольном точении заготовки из закаленной стали ШХ15 55 HRC при следующем режиме: скорость резания $v = 170$ м/мин, подача $s = 0,05$ мм/об, глубина резания $t = 0,2$ мм. Использовали резец, который после установки режущей пластины имел следующую геометрию: передний угол $\gamma = -7^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Через определенное время резания при проведении испытаний фиксировали ширину фаски износа задней поверхности пластины с использованием инструментального микроскопа БМИ-2Ц. Испытания прекращали при достижении фаски износа на задней поверхности пластин значения $h_3 = 0,3$ мм, счи-

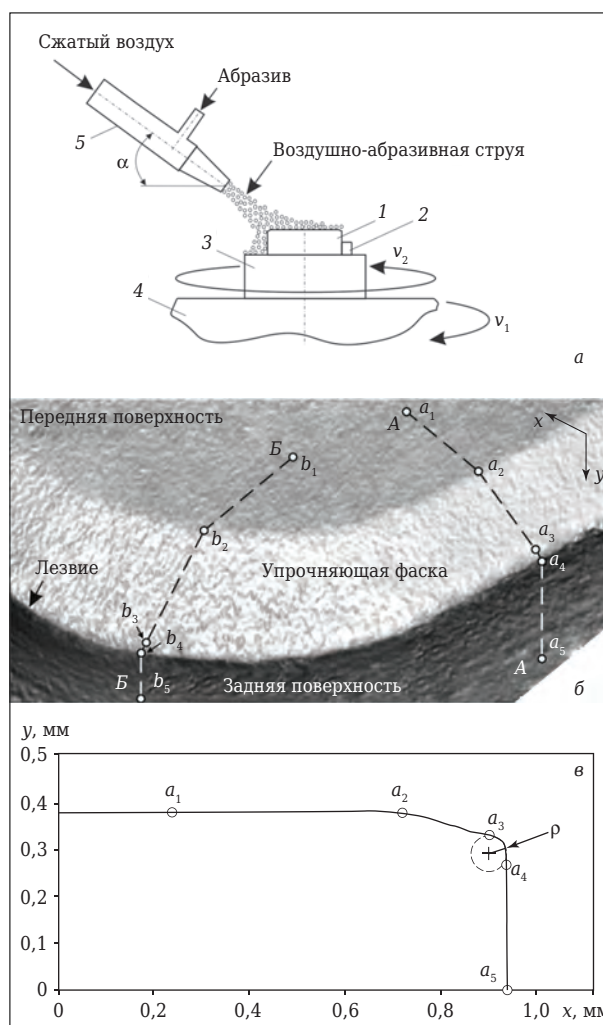


Рис. 1. Схема ВАО (а), 3D модель фрагмента режущей пластины ВОК71 (б) после обработки и профиль ее рабочей части (в)

тая это критерием технологического отказа инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны микрофотографии передней поверхности режущей пластины ВОК71 до и после ВАО (аналогичной морфологией характеризуются задняя поверхность и упрочняющая фаска). Видно, что на исходной поверхности керамической пластины имеется направленный рельеф, который формируют многочисленные канавки (см. рис. 2, а). Эти канавки образовались при шлифовании в результате воздействия единичных алмазных зерен шлифовального круга на обрабатываемую поверхность. На этой поверхности присутствуют многочисленные трещины и области локальных разрушений керамики, природа образования которых подробно рассмотрена в публикациях [8, 9]. Эти дефекты крайне негативно влияют

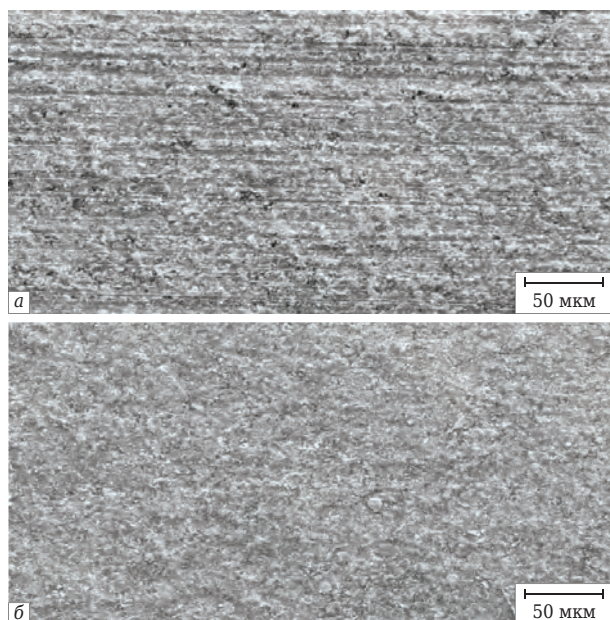


Рис. 2. Морфология поверхности керамической режущей пластины до (а) и после (б) УАВ

на эксплуатационные показатели керамических инструментов [10, 11]. Процесс УАВ существенно изменяет морфологию всех рабочих поверхностей керамических пластин за счет многочисленных ударных воздействий на нее единичных абразивных частиц, обладающих высокой кинетической энергией и имеющих разную геометрию. После этого поверхность керамики приобретает шагреневый рельеф с хаотично распределенными кратерами, выступами и плоскими участками, которые имеют разные форму и размеры. Присутствия трещин и области локальных разрушений керамики на обработанных поверхностях не выявлено. Поверхность керамики в процессе УАВ формируется в результате многочисленных соударений с ней абразивных частиц, обладающих высокой кинетической энергией и имеющих разную геометрию, с образованием кратеров. Исследование поверхности образовавшихся кратеров показало отсутствие локальных разрушений керамики на их дне и боковых поверхностях.

На краях кратеров имеются несимметричные выступы волнистой формы. Анализ формы канавок и выступов позволяет предположить, что их образование произошло в результате совместного действия механизмов микрорезания и пластического течения тонкого поверхностного слоя керамики в направлении перемещения абразивных частиц. В образовании плоских участков на обработанной поверхности задействован транскристаллитный механизм хрупкого разрушения единичных зерен. На пластинах выявлены многочисленные осколки частиц белого электрокорунда, шаржированные в керамическую поверхность, которые не были удалены при последующей ультразвуковой чистке.

Технологические режимы УАВ существенно влияют на морфологию обработанных поверхностей. В качестве примера на рис. 3 показаны поверхности пластин, обработанные с разной интенсивностью абразивного воздействия. В первом случае (см. рис. 3, а) интенсивность абразивного воздействия была наименьшей, в третьем случае (см. рис. 3, в) — наибольшей. Последовательно рассмотрим особенности морфологии каждой из этих поверхностей.

Морфология поверхности пластины, обработанной при $P = 1,5$ ат и $\tau = 11$ с, характеризуется сочетанием шагреневого рисунка с «размытым» направленным рельефом, имевшимся на исходной поверхности пластин (см. рис. 3, а). Выявлены единичные протяженные углубления со сглаженными поверхностями, которые на исходных поверхностях идентифицировали как области локального разрушения керамики. Обнаружены также сглаженные следы трещин. На этой поверхности имеются единичные шаржированные частицы абразивных зерен.

Морфологический рисунок передней поверхности пластины, обработанной при $P = 2$ ат и $\tau = 22$ с, имеет значительно большую степень абразивного воздействия по сравнению с первым случаем УАВ (см. рис. 3, б).



Рис. 3. Морфология поверхностей керамических пластин BOK71 после УАВ при режиме: а — $P = 1,5$ ат, $\tau = 11$ с; б — $P = 2$ ат, $\tau = 22$ с; в — $P = 2,5$ ат, $\tau = 33$ с ($\times 40$)

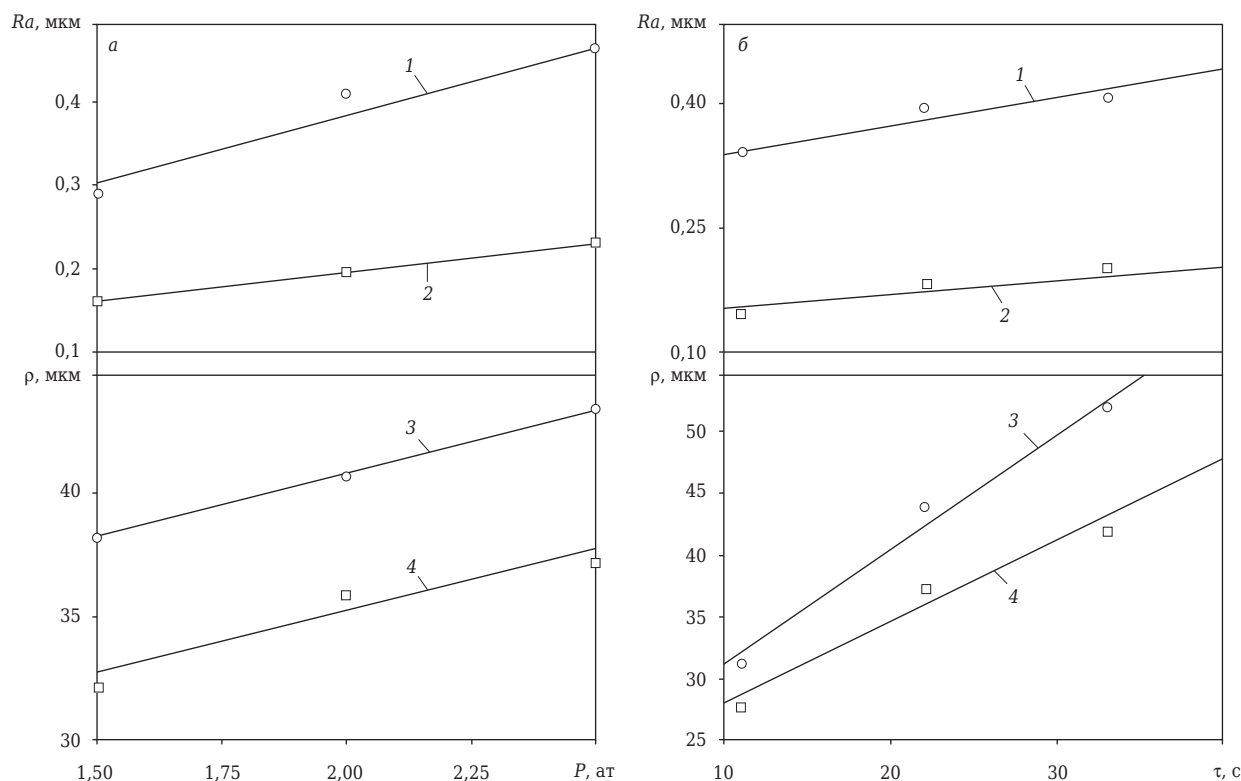


Рис. 4. Влияние P при $\tau = 60$ с (а) и τ при $P = 2,5$ ат (б) на Ra и r : 1 — передняя поверхность; 2 — задняя поверхность; 3 — сечение А–А; 4 — сечение Б–Б

Прежде всего, это выражается в практическом отсутствии следов направленного рисунка на обработанной поверхности. Поверхность имеет четко выраженный шагреневый рельеф и значительную степень «шаржирования». На этой поверхности не обнаружено дефектов в виде трещин и областей локального разрушения поверхностного слоя керамики.

Поверхность пластины ВОК71, обработанной при $P = 2,5$ ат и $\tau = 33$ с, имеет наибольшую степень абразивного воздействия (см. рис. 3, в). Морфология этой поверхности характеризуется весьма грубым шагреневым рельефом с многочисленными кратерами размерами более 50 мкм, хаотично распределенными по поверхности. Следов направленного рисунка на этой поверхности не выявлено; степень шаржирования наибольшая, причем размер отдельных осколков абразивных зерен превышает 30 мкм.

Количественные показатели изменения состояния поверхностей и лезвия пластин ВОК71 после пескоструйной обработки показаны на рис. 4. Перед началом анализа приведенных зависимостей следует отметить, что параметр шероховатости передней поверхности исходных пластин составлял $Ra = 0,1 \div 0,15$ мкм, задней поверхности $Ra = 0,09 \div 0,12$ мкм. Столь однозначных значений радиуса округле-

ния лезвия пластин ВОК71 не получено из-за большого числа выкрашиваний шириной до 0,04 мм (этот размер допускается ГОСТ 25003) на гранях и вершинах пластин. Среднее значение радиуса округления лезвия на его бездефектных участках составляло $r = 23$ мкм, на участках с выкрашиваниями $r = 84$ мкм. При этом усредненным значением этого параметра по всей длине лезвия пластины считали $r = 54$ мкм. Сопоставление этих данных с результатами экспериментов (см. рис. 4) показывает, что ВАО увеличивает Ra и r на бездефектных участках лезвия, уменьшает r на участках лезвия, имеющих выкрашивания.

При увеличении P и τ возрастают средние значения Ra и r . Например, при росте P от 1,5 до 2,5 ат при обработке в течение $\tau = 22$ с среднее значение Ra возрастает от 0,29 до 0,45 мкм и от 0,09 до 0,23 мкм на передней и задней поверхностях соответственно (см. рис. 4, а). При обработке с $P = 1,5$ ат средние значения r составляют 38 и 32 мкм для сечений А–А и Б–Б соответственно, при обработке с $P = 2$ ат 41 и 36 мкм для сечений А–А и Б–Б соответственно, при обработке с $P = 2,5$ ат 44 и 37 мкм для сечений А–А и Б–Б соответственно. С увеличением τ от 11 до 33 с ($P = 2,5$ ат) средние значения Ra возрастают с 0,35 до 0,41 мкм и с 0,15 до 0,20 мкм на передней и задней по-

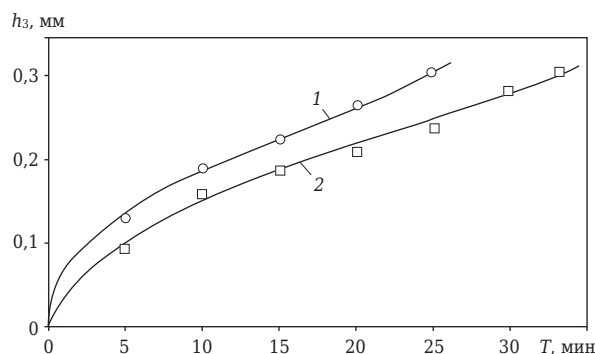


Рис. 5. Влияние времени T эксплуатации пластины ВОК71 до (1) и после (2) ВАО на износ h_3 при точении с $v = 170$ м/мин, $s = 0,05$ мм/об и $t = 0,2$ мм

верхностях (см. рис. 4, б). Средние значения ρ повышаются с 33 до 52 мкм и с 28 до 42 мкм в сечениях А–А и Б–Б соответственно. Видно, что наибольшие значения ρ после ВАО не превышают его усредненного значения ($\rho = 54$ мкм) до обработки.

На рис. 5 показаны результаты сравнительных испытаний пластин ВОК71 до и после ВАО при точении закаленной стали ШХ15. Испытывали пластины после ВАО при $P = 2,5$ ат и $\tau = 22$ с, так как эти пластины в наибольшей степени соответствовали установленному критерию состояния их рабочей части. Анализ зависимостей, характеризующих связь времени эксплуатации этих пластин с износом их задней поверхности, свидетельствует о высокой эффективности ВАО. Время эксплуатации пластин после обработки превышает в 1,5 раза аналогичный показатель исходных пластин при использовании критерия технологического отказа инструмента ($h_3 = 0,3$ мм).

Выявлена существенная разница в интенсивности износа на этапе приработки исходных пластин и пластин после ВАО. Например, среднее время эксплуатации до достижения износа на задней поверхности $h_3 = 0,1$ мм исходных пластин ВОК71 составило $T = 2,5$ мин, у обработанных пластин $T = 4,9$ мин. Практически аналогичные зависимости выявлены в отношении других рабочих поверхностей пла-

стин ВОК71. На последующем этапе эксплуатации эффект ВАО несколько уменьшается, но остается заметным (см. рис. 5). Этот факт свидетельствует о повышении износостойкости оксидно-карбидной керамики за счет минимизации числа технологических дефектов на рабочих поверхностях пластин, что тормозит зарождение и развитие трещин в поверхностном слое керамических пластин при эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что после ВАО изменяется морфология поверхности керамики, причем ее морфологический рисунок зависит от режима обработки. Обработанная поверхность имеет шагреньевый рельеф с многочисленными кратерами и выступами, образованными в результате совместного действия механизмов микрорезания и пластического течения тонкого поверхностного слоя керамики в направлении перемещения абразивных частиц. Процесс ВАО увеличивает параметр шероховатости Ra всех рабочих поверхностей и радиус ρ округления лезвия на бездефектных его участках, но уменьшает ρ на участках лезвия с выкрашиваниями. При росте давления P воздушно-абразивной струи и времени τ обработки средние значения Ra и ρ возрастают.

Высокая эффективность ВАО подтверждена результатами сравнительных испытаний пластин ВОК71 до и после ВАО при точении закаленной стали ШХ15. Время эксплуатации обработанных пластин превышает в 1,5 раза аналогичный показатель исходных пластин при использовании критерия технологического отказа инструмента.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. **Wakuda, M.** Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramics / M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // Journal of Materials Processing Technology. — 2003. — Vol. 132. — P. 177–183.
2. **Wakuda, M.** Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials / M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // Precision Engineering. — 2002. — № 26. — P. 193–198.
3. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.
4. **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.
5. **Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоугнеупорной керамики на ос-

нове 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.

5. **Григорьев, С. Н.** Модель формирования профиля реза при гидроабразивной обработке высокоплотной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 51–56.

Grigor'ev, S. N. Model of the formation of the profile of a cut in the hydroabrasive machining of a high-density ceramic / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 48–53.

6. **Григорьев, С. Н.** Морфология поверхности высокоплотной керамики после гидроабразивной обработки / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 123–126.

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

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

10. **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.

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.

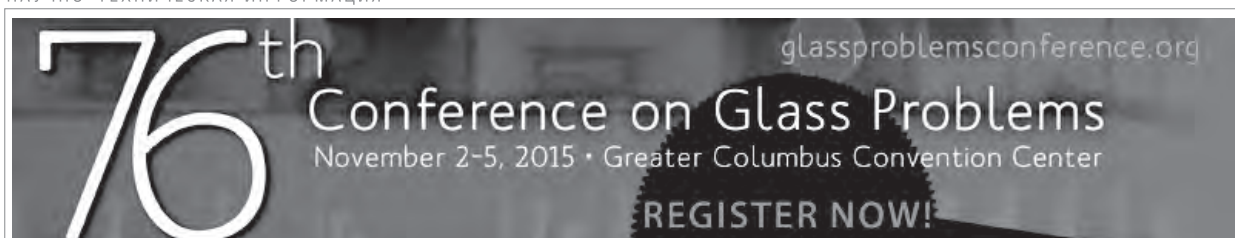
11. **Кузин, В. В.** Особенности эксплуатации канавочных резцов с керамическими пластинами при обработке деталей из закаленных сталей / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 8. — С. 73–77.

Kuzin, V. V. Performance of Channel Cutters with Ceramic Plates in Machining Quenched Steel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2013. — Vol. 33, № 1. — P. 24–28. ■

Получено 23.07.15

© В. В. Кузин, Н. Р. Портной,
С. Ю. Фёдоров, В. И. Мороз, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



76-я конференция по проблемам стекольной промышленности

2–5 ноября 2015 г.

г. Колумбус, шт. Огайо, США

Тематика

- Основы получения шихт и эксплуатация стекловаренных печей
- Окисление
- Тестирование стекла и диагностика излома
- Плавка стекла
- Огнеупорные материалы
- Защита окружающей среды
- Моделирование, штамповка