Д. т. н. **В. В. Кузин**[1] (✉), **Н. Р. Портной**[1], к. т. н. **С. Ю. Фёдоров**[1], **В. И. Мороз**[2]

[1] *ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия*
[2] *ОАО «Сандвик-МКТС», Москва, Россия*

УДК 621.924.93:666.3

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Экспериментально установлена связь технологических параметров гидроабразивной обработки с морфологией рабочих поверхностей и геометрией пластин ВОК71. Установлено, что гидроабразивная обработка значительно повышает надежность пластин за счет благоприятного изменения морфологии их рабочих поверхностей и лезвия, а также уменьшения радиуса его округления.

Ключевые слова: *гидроабразивная обработка (ГАО), оксидно-карбидная керамика, морфология, шероховатость, режущая пластина, износ.*

ВВЕДЕНИЕ

Важными количественными показателями надежности деталей машин являются их безотказность и наработка до отказа [1]. Именно эти характеристики являются критическими для керамических деталей и инструментов в разных условиях эксплуатации [2–6]. Поэтому конструкторы предпочитают использовать в новых машинах отработанные элементы и функциональные узлы с проверенной надежностью, а технологи — проверенные режущие инструменты из твердого сплава при создании новых технологических процессов в металлообработке. Эти обстоятельства существенно ограничивают применение керамических деталей и инструментов при создании инновационных изделий и процессов. Для изменения этого подхода необходимо решить важную научно-техническую задачу — обеспечить требуемую надежность керамических деталей и инструментов в определенных условиях эксплуатации [7–9].

Эффективным направлением решения этой комплексной задачи является разработка методов управления поверхностным слоем, использование которого способно снизить интенсивность внезапных отказов керамических деталей при эксплуатации за счет уменьшения числа поверхностных дефектов, инициирующих износ и разрушение керамики под действием внешних нагрузок [10]. Методологические подходы к созданию этих методов подробно проанализированы в работе [11]. В частности, эти аналитические обзоры определили высокую перспективу струйных методов обработки для управления состоянием поверхности керамических деталей. В работе [10] подробно проанализировано влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики керамических деталей. Однако аналогичных систематизированных данных для гидроабразивной обработки (ГАО) не получено.

✉
В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

Цель работы — изучить влияние ГАО на надежность деталей из оксидно-карбидной керамики под действием экстремальных эксплуатационных нагрузок (на примере режущих пластин ВОК71).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

ГАО четырехгранных пластин из оксидно-карбидной керамики ВОК71 размерами 12,7×12,7×4,76 мм проводили на установке модели 2G Bulldog. Эта установка имеет три камеры (одна — рабочая, две — вспомогательные) и два рабочих стола, попеременно подающихся в рабочую камеру (зона обработки), что обеспечивает беспрерывный цикл обработки. Принципиальная схема ГАО, реализуемая на этой установке, показана на рис. 1, *а*.

Пластины *1* располагают в гнездах кассеты *2*, имеющих определенные форму и размеры, что исключает «вылет» пластин из гнезда кассеты при обработке. Кассеты с пластинами устанавливают на рабочие столы *3* во вспомогательной камере установки, а затем подают их в рабочую камеру (рис. 1, *б*), в которой реализуется процесс ГАО пластин. Гидроабразивная жидкость *4* формируется форсунками *5*, наклоненными под углом α к поверхности

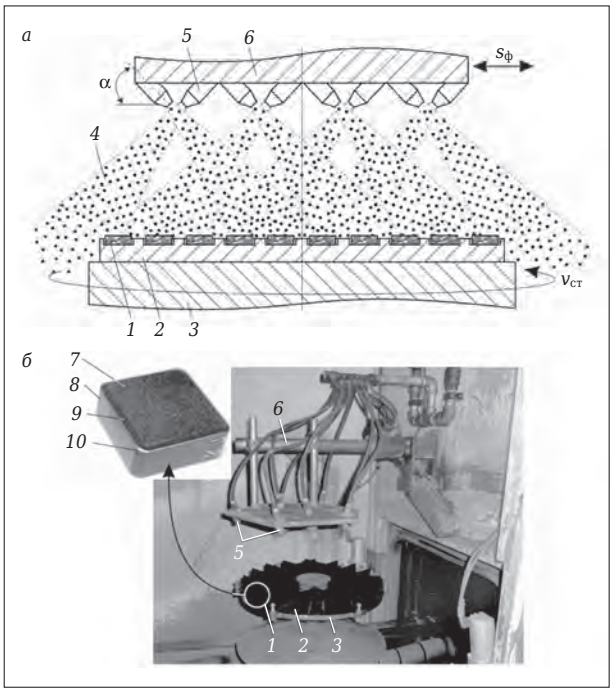

Рис. 1. Принципиальная схема ГАО на установке модели 2G Bulldog (*а*) и общий вид ее рабочей камеры (*б*)

рабочего стола. Восемь форсунок объединены в форсуночный узел таким образом, чтобы гидроабразивные струи перекрывали всю площадь кассет с пластинами. Вращательное движение рабочего стола $v_{ст}$ в совокупности с возвратно-поступательным движением форсуночного узла $s_ф$ обеспечивает равномерную обработку всех рабочих поверхностей (передней *7*, задней *8* и упрочняющей фаски *9*) и лезвия *10* пластин. После окончания процесса ГАО пластин рабочий стол с кассетой перемещается во вспомогательную камеру, в которой происходят промывка пластин струей жидкости под высоким давлением и их последующее удаление из кассеты.

В настоящем исследовании изменяли время ГАО (τ 4, 8 и 12 мин) и давление гидроабразивной струи (*P* 1,5, от 2,5 до 4 ат). В экспериментах оставались неизменными: угол наклона форсунок α = 45°, диаметр сопла форсунки $d_ф$ = 3 мм, расстояние от сопла форсунки до заготовок *L* = 145 мм, концентрация абразивных частиц в жидкости *Q* = 11 %, марка абразива — белый электрокорунд. Каждый эксперимент дублировали по 3 раза.

Надежность пластин ВОК71 после ГАО определяли по результатам испытаний при продольном точении заготовки из закаленной стали ШХ15 *HRC* 55 на следующем режиме: скорость резания *v* = 170 м/мин, подача *s* = 0,05 мм/об, глубина резания *t* = 0,2 мм. Надежность пластин оценивали следующими характеристиками: среднее $T_{ср}$, наибольшее T_{max} и наименьшее T_{min} время наработки до отказа; стойкость при износе из задней поверхности h_3 0,3, 0,4 и 0,5 мм, а также диапазон Δ изменения времени наработки до отказа, время безотказной работы T_1. Более подробно эта методика изложена в публикации [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ микрофотографии передней поверхности и упрочняющей фаски пластин после ГАО свидетельствует о существенном влиянии технологических режимов этой обработки на состояние поверхностного слоя керамики (рис. 2).

Морфология передней поверхности пластины, обработанной при *P* = 1,5 ат (см. рис. 2, *а*), характеризуется «мягким» шагреневым рисунком со сглаженными выступами и ямками, равномерно распределенными по всей поверхности. На передней поверхности имеются следы рисок от шлифования со сглаженными поверхностями, а на упрочняющей фаске эти риски имеют наиболее выраженный вид. На отдельных рисках обнаружены трещины. На лезвии пластины имеются сколы как с острыми кромками, так и со сглаженными поверхностями. Выявлены отдельные абразивные частицы, шаржированные в переднюю поверхность и упрочняющую фаску пластин.

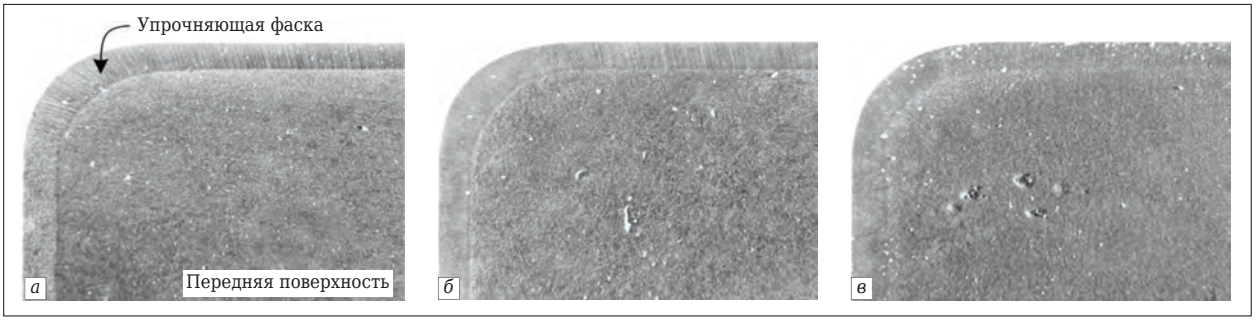

Рис. 2. Влияние давления *P* струи на морфологию передней поверхности керамических режущих пластин ВОК71 при τ = 8 мин: *а* — *P* = 1,5 ат; *б* — *P* = 2,5 ат; *в* — *P* = 4 ат

На передней поверхности пластины, обработанной при P = 2,5 ат (см. рис. 2, *б*), формируется морфологический рисунок, свидетельствующий о более интенсивном абразивном воздействии по сравнению с обработкой при P = 1,5 ат. На обработанной поверхности полностью отсутствует направленный рисунок (характерный для исходной поверхности), а следы рисок со сглаженными поверхностями имеются только на упрочняющей фаске. Увеличение размеров выступов и ямок на поверхности керамики, а также более высокая степень ее шаржирования по сравнению с ГАО при P = 1,5 ат свидетельствует о более интенсивной степени абразивного воздействия при повышении давления гидроабразивной струи.

Наибольшую степень абразивного воздействия имеет поверхность пластины ВОК71, обработанная при P = 4 ат (см. рис. 2, *в*). Морфология этой поверхности характеризуется сильно развитым шагреневым рельефом с ямками-кратерами значительных размеров, хаотично распределенными по обработанной поверхности, а также большим числом абразивных зерен, шаржированных в поверхность керамической пластины. На упрочняющей фаске пластин ВОК71 также отсутствуют следы рисок, которые крайне негативно влияют на их надежность при эксплуатации.

Результаты измерения параметра *Ra* шероховатости поверхностей и радиуса ρ округления лезвия пластины ВОК71 после ГАО показаны на рис. 3. Видно, что увеличение P приводит к возрастанию *Ra* и уменьшению ρ. При увеличении P с 1,5 до 4 ат при обработке в течение τ = 8 мин *Ra* возрастает с 0,16 до 0,21 мкм на передней поверхности и с 0,18 до 0,23 мкм на задней поверхности пластины (см. рис. 3, *а*). Увеличение времени обработки с 8 до 12 мин приводит к возрастанию *Ra* передней поверхности с 0,22 мкм при P = 1,5 ат до 0,36 мкм при P = 4 ат, а на задней поверхности — с 0,25 мкм при P = 1,5 ат до 0,39 мкм при P = 1,5 ат. При увеличении P значение ρ уменьшается; при увеличении P с 1,5 до 4 ат

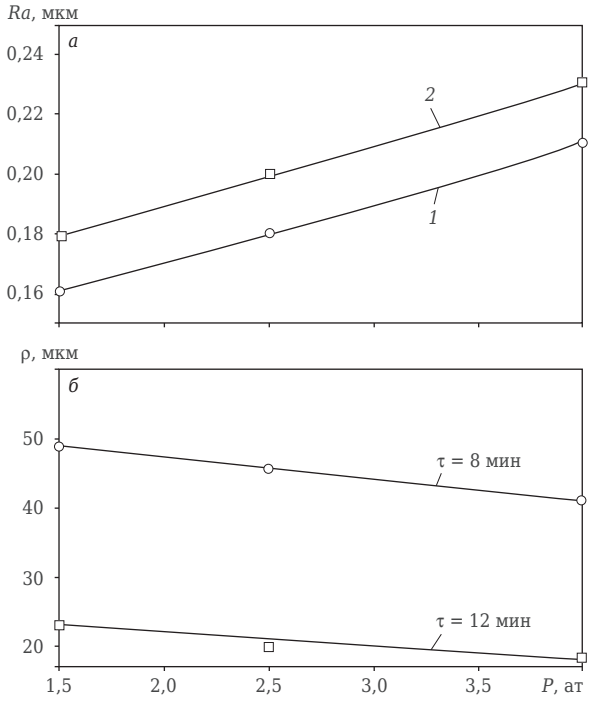

Рис. 3. Влияние давления P гидроабразивной струи на параметр *Ra* шероховатости передней (*1*) и задней (*2*) поверхностей при τ = 8 мин (*а*) и ρ при разном времени обработки

при обработке в течение τ = 8 мин ρ уменьшается с 48 до 41 мкм, а при обработке в течение τ = 12 мин — с 23 до 18 мкм (см. рис. 3, *б*). Установлено, что наибольшие значения ρ после ГАО не превышают его усредненного значения (ρ = 54 мкм) до этой обработки, что является очень важным фактором, обеспечивающим уменьшение эксплуатационных нагрузок.

На основе анализа результатов этих исследований приняли решение использовать для дальнейших экспериментов следующий режим ГАО: P = 2,5 ат, τ = 12 мин, L = 145 мм и α = 45°. Микрофотографии рабочих поверхностей и лезвия пластины ВОК71 после ГАО на этом режиме показаны на рис. 4. Видно, что на этих поверхностях отсутствуют риски, трещины, сколы и области локального разрушения керамики, характерные для исходных пластин.

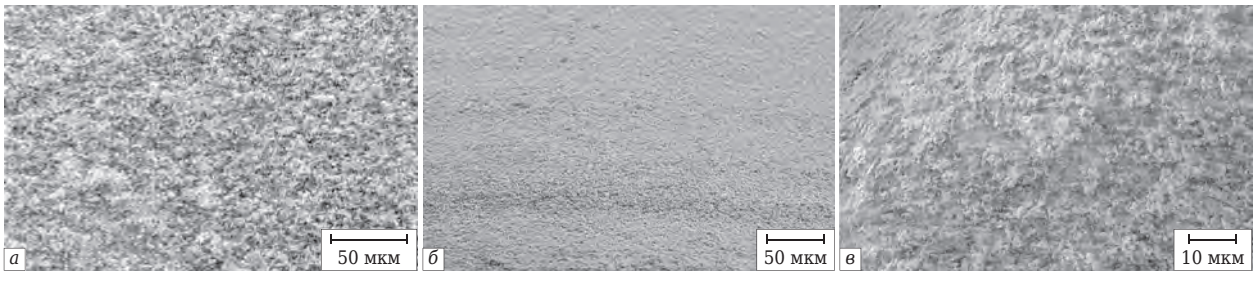

Рис. 4. Морфология передней поверхности (*а*), задней поверхности (*б*) и лезвия (*в*) пластины ВОК71 после ГАО на режиме P = 2,5 ат, τ = 12 мин, L = 145 мм и α = 45°

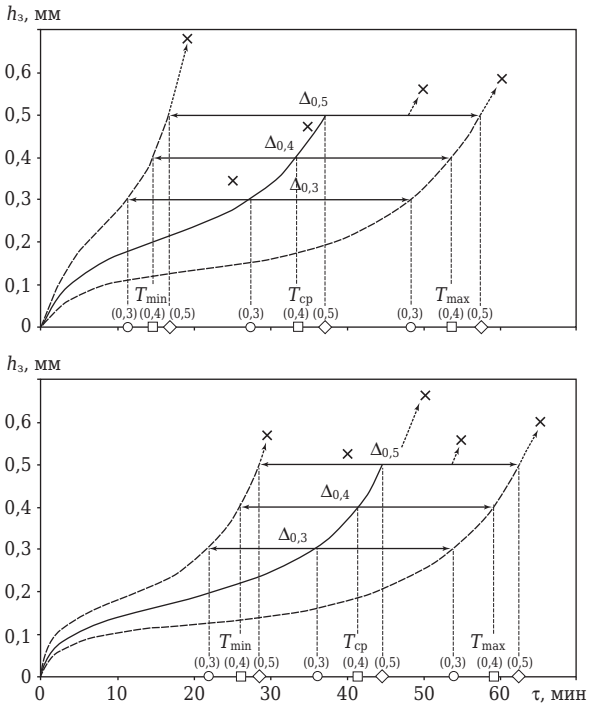

Рис. 5. Влияние времени τ эксплуатации пластины ВОК71 до (*а*) и после ГАО (*б*) на износ $h_з$ при точении с v = 170 м/мин, s = 0,05 мм/об и t = 0,2 мм

Главной морфологической чертой этих поверхностей является их шагреневый рисунок с мелкими гладкими выступами волнообразной формы. Между тем каждая из этих поверхностей пластины имеет определенные особенности.

Передняя поверхность пластины (см. рис. 4, *а*) имеет наиболее развитый рельеф с большим числом чередующихся ямок и выступов разного размера (от 0,5 до 15 мкм). Мелкие ямки размерами до 1 мкм хаотично расположены на этой поверхности, а крупные и средние выступы имеют сглаженные формы и окружены ямками, форма которых напоминает протоки. Морфология задней поверхности пластины имеет равномерный рельеф с ярко выраженными поперечными волнами (см. рис. 4, *б*). На показанном фото хорошо виден шаг образующихся соседних волн, причем поверхность впадин более сглажена, чем поверхность гребней волн. Образование этих волн можно объяснить эффектом технологической наследственности, проявляющимся в большей интенсивности съема материала в областях локального разрушения керамики, которые сформировались при шлифовании. Наиболее позитивно ГАО влияет на лезвие пластины, что проявляется в формировании лезвия с ρ = 20 ÷ 25 мкм, на котором отсутствуют сколы, образовавшиеся при шлифовании. Морфология поверхности керамики на лезвии (см. рис. 4, *в*) характеризуется большим числом сглаженных выступов и ямок размерами до 5 мкм. Также на этой поверхности имеются отдельные ямки размерами до 10 мкм, дно которых образовано неразрушенными гранями подповерхностных зерен.

Сравнительный анализ поверхностей пластин после ГАО и ВАО (воздушно-абразивная обработка) показал, что использование в качестве носителя абразивных частиц жидкости имеет определенные преимущества по сравнению с воздухом. Прежде всего, это проявляется в меньшем «разрушающем» воздействии абразивных зерен на поверхность керамики, благодаря чему отсутствует «выбивание» цельных поверхностных зерен из керамического каркаса. Превалирование механизма транскристаллитного разрушения поверхностных зерен и последующее удаление из каркаса их разрушенных фрагментов приводят к формированию поверхности с более сглаженной морфологией. Явление «шаржирования» поверхности при ГАО проявляется в значительно меньшей степени по сравнению с ВАО. Также благоприятное воздействие жидкости проявляется в более эффективном «выносе» отработанных абразивных частиц и разрушенных частиц керамики из зоны обработки, что улучшает шероховатость обработанных поверхностей.

Для оценки надежности пластин ВОК71 после ГАО проведены их соответствующие испытания, в которых использовали по пять исходных и обработанных пластин (режим ГАО при P = 2,5 ат, τ = 12 мин, L = 145 мм и α = 45°). Результаты этих испытаний свидетельствуют, что ГАО существенно повышает надежность пластин ВОК71 (рис. 5).

Установлено, что, во-первых, поле семейства кривых τ – $h_з$ для пластин после ГАО имеет значительно меньший «размах» по сравнению с аналогичным показателем исходных пластин, причем это сокращение достигается за счет смещения кривой T_{min} в сторону большего времени. Во-вторых, из пяти исходных пластин только три оставались в работоспособном состоянии после износа $h_з$ = 0,5 мм (время их отказа на графике показано значком ×); одна пластина вышла из работоспособного состояния после достижения износа $h_з$ = 0,4 мм и одна пластина — после достижения износа $h_з$ = 0,3 мм. Все пластины после ГАО успешно отработали до износа $h_з$ = 0,5 мм, что позволяет сделать вывод об их более высокой безотказности по сравнению с исходными пластинами.

Установлено, что надежность исходных пластин при точении характеризуется $T_{ср}$ 27,1, 33,1 и 36,6 мин, T_{max} 48, 53,9 и 57,2 мин,

T_{min} 10,9, 14,4 и 16,6 мин и Δ 37,1, 39,5 и 40,6 мин до износа $h_з$ 0,3, 0,4 и 0,5 мм соответственно (см. рис. 5, *а*). Пластины после ГАО имели значительно более высокую надежность, что проявляется в увеличении $T_{ср}$, T_{max}, T_{min}, уменьшении Δ при разных значениях износа и уменьшении числа внезапных сколов. Например, значения этих показателей составляли $T_{ср}$ 37,3, 42,3 и 45,9 мин, T_{max} 54,5, 59,4 и 62,4 мин, T_{min} 22,5, 26,1 и 28,7 мин и Δ 32, 28,8 и 33,7 мин до износа $h_з$ 0,3, 0,4 и 0,5 мм соответственно (см. рис. 5, *б*).

Анализ этих результатов показывает, что основной эффект от ГАО заключается в значительном увеличении T_{min} (практически в 2 раза), в то время как T_{max} повышается только на 10–14 %. За счет этого растет наработка до отказа пластин после ГАО на 25–38 % по сравнению с аналогичным показателем исходных пластин. Коэффициенты, определяемые отношением $T_{ср}$, T_{max}, T_{min} и Δ пластин после ГАО к аналогичным показателям исходных пластин ВОК71, приведены ниже:

$K_{Tср}$ при $h_з$, мм			K_{Tmax} при $h_з$, мм		
0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5
1,38	1,28	1,25	1,14	1,1	1,09

K_{Tmin} при $h_з$, мм			$K_Δ$ при $h_з$, мм		
0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5
2,06	1,81	1,72	0,86	0,73	0,83

Видно, что значения коэффициентов $K_{Tср}$, K_{Tmax} и K_{Tmin} при износе $h_з$ = 0,3 мм значительно превосходят значения этих коэффициентов при $h_з$ 0,4 и 0,5 мм. Это свидетельствует о том, что эффективность ГАО в наибольшей степени проявляется на этапах приработки и нормального износа режущих пластин за счет изменения качества (модификации) поверхностей пластин. На этапе катастрофического износа пластин эффект от ГАО проявляется в наименьшей степени. В совокупности полученные экспериментальные данные, приведенные в графическом и табличном виде, свидетельствуют о значительном увеличении надежности пластин ВОК71 после ГАО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием рационального режима ГАО, выявленного в результате исследования морфологии и шероховатости рабочих поверхностей, а также радиуса округления лезвия, изготовлена опытная партия пластин ВОК71, которую использовали для сравнительных испытаний. В результате проведенных исследований установлено, что ГАО значительно повышает надежность пластин ВОК71 за счет благоприятного изменения морфологии их рабочих поверхностей и лезвия, а также уменьшения радиуса его округления. После ГАО пластины ВОК71 имеют более высокие показатели безотказности и наработки до отказа; среднее время их эксплуатации до износа $h_з$ 0,3, 0,4 и 0,5 мм превышает в 1,38, 1,28 и 1,25 раза соответственно аналогичный показатель исходных пластин. Наибольший эффект от ГАО проявляется на этапах приработки и нормального износа керамических пластин.

* * *

Данная 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. ***ГОСТ 27.002–89.*** Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

2. ***Кузин, В. В.*** Исследование процесса высокоскоростного резания керамическими инструментами / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 3. — С. 47–51.

Kuzin, V. V. Study of high-speed cutting with ceramic tools / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 3. — P. 40–46.

3. ***Кузин, В. В.*** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 39–43.

Kuzin, V. V. Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.

4. ***Волосова, М. А.*** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / *М. А. Волосова, В. В. Кузин* // Металловедение и термическая обработка. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

Volosova, M. A. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / *M. A. Volosova, V. V. Kuzin* // Metal Science and Heat Treatment. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

5. ***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.

6. ***Кузин, В. В.*** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / *В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Фёдоров* // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.

Kuzin, V. V. Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / *V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov* // Journal of Friction and Wear. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 199–203.

7. ***Кузин, В. В.*** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / *В. В. Кузин, С. И. Досько, В. Ф. Попов* [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.

8. ***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.

9. ***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.

10. ***Кузин, В. В.*** Влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики / *В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 9. — С. 62–67.

11. ***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.

12. ***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.

Grigor'ev, S. N. Morphology of the surface of a high-density ceramic after hydroabrasive machining / *S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 164–167.

13. ***Кузин, В. В.*** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // Трение и износ. — 2014. — № 6. — С. 728–734.

Kuzin, V. V. The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 1. Macrolevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova* // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510. ■

Получено 05.10.15
© В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров, В. И. Мороз, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ICC6 — 6-й международный конгресс по керамике «От лаборатории к производству»

21–25 августа 2016 г. г. Дрезден, Германия

www.icc-6.com