

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

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

УДК 666.3.017:620.178.16

# ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ИЗНОСА

С использованием разработанной методики оценена надежность резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами из оксидной ВО13, оксидно-карбидной ВОР71 и нитридной РКС22 керамики при точении закаленной стали 35ХГСА (44–48 HRC). Доказана высокая эффективность сформированного комплекса эксплуатационных характеристик и установленных критериев износа.

**Ключевые слова:** керамические инструменты (КИ), внезапный отказ КИ, надежность, стойкость, критерий износа.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди большого числа разнородных подсистем, формирующих современную систему металлообработки, наиболее нестабильные эксплуатационные характеристики генерирует подсистема резания [1–4]. Многие вопросы, связанные с надежностью этой подсистемы при использовании режущих инструментов из быстрорежущей стали и твердого сплава, достаточно проработаны и реализованы в нормативных документах и технологических рекомендациях [5]. Однако проблему надежного функционирования подсистемы резания в случае использования керамических инструментов (КИ) решить не удается из-за специфического поведения керамики под действием экстремально высоких нагрузок [6–11]. Из-за неудовлетворенности потребителей КИ единственной эксплуатационной характеристикой — средней стойкостью — необходима разработка комплекса характеристик, способных достоверно оценить надежность этих инструментов.

Для оценки надежности режущих инструментов используются в основном методы параметрической теории надежности [12]. Эти методы требуют значительного числа испытаний на стойкость для определения надежности, а также возможности применения полученных результатов для прогнозирования надежности аналогичного режущего инструмента. Одним из возможных направлений упрощения этой за-

дачи является детальное изучение причин внезапных отказов КИ при ограниченном объеме испытаний, так как наиболее достоверную информацию о надежности КИ содержат данные об их отказах в процессе испытаний и эксплуатации [13]. Это позволит определить критерии отказов, дополняющие статистические данные испытаний, и в совокупности использовать их при проектировании технологических процессов металлообработки. Поэтому получение количественных оценок надежности КИ и установление критериев их предельного износа является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность системы металлообработки, уменьшить затраты на ее технологическое проектирование, обеспечение и функционирование.

Цель настоящей работы — оценить надежность режущих инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами из оксидной, оксидно-карбидной и нитридной керамики, на основе разработанного комплекса характеристик и установленных критериев износа при ограниченном объеме испытаний на стойкость при точении закаленной стали 35ХГСА.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методическое обеспечение экспериментальных исследований разработано на основе сформулированной цели работы и структуры подсистемы резания, учитывающей условия эксплуатации резцов, оснащенных керамическими сменными многогранными пластинами. Этот подход обеспечил учет наибольшего числа элементов и отношений, связывающих свойства и условия



В. В. Кузин  
E-mail: kyzena@post.ru

эксплуатации КИ с характеристиками их надежности. Для оценки надежности КИ использовали сформированный комплекс эксплуатационных характеристик: число внезапных отказов (сколов)  $N$ , средние  $T_{\text{ср}}$ , минимальные  $T_{\text{мин}}$  и максимальные  $T_{\text{макс}}$  значения стойкости, диапазон изменения стойкости  $\Delta$  ( $\Delta = T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}$ ) в партии, стандартное отклонение  $\sigma_T$  и коэффициент вариации  $V_T$  стойкости.

Эти эксплуатационные характеристики определяли по результатам испытаний на стойкость партии КИ. Под стойкостью  $T$  КИ понимали суммарное время  $\tau$  их эксплуатации до достижения двух установленных критериев износа. В качестве критерия промежуточного износа приняли  $h_3 = 0,3$  мм ( $h_3$  — ширина фаски износа задней поверхности), а в качестве критерия предельного износа —  $h_3 = 0,5$  мм (при достижении или превышении которого испытания прекращали). По результатам испытаний строили поля семейства кривых  $\tau - h_3$ , описывающие кинетику износа каждого КИ в испытываемой партии. Одновременно выявляли особенности износа КИ на разных этапах эксплуатации (с привязкой к установленным критериям износа).

Испытания на стойкость проводили при продольном точении заготовок диаметром  $D = 50$  мм и длиной  $L = 250$  мм из закаленной стали 35ХГСА твердостью 44–48 HRC на токарном станке модели CU500MRD (рис. 1, а), оснащенном системой бесступенчатого регулирования оборотов шпинделя. Использовали державку 1 CoroTurn RC, закрепленную в резцедержателе станка (рис. 1, б). В державке закрепляли сменную четырехгранную пластину 2 формы SNGN 120408, установленную на «подкладке» 3 из твердого сплава прихватом 4 через «стружколом» 5. Конструкция державки обеспечивала следующую геометрию КИ: передний угол  $\gamma = -7^\circ$ , задний угол  $\alpha = 7^\circ$ , углы в плане  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ . Испытывали три партии КИ из разной керамики по 20 шт. в каждой из них. На каждом КИ испытывали одну «вершину» (рабочая часть КИ, выделенная пунктирной линией) при режиме: скорость резания  $v = 220$  м/мин, подача  $S = 0,1$  мм/об, глубина резания  $t = 0,8$  мм.

В испытаниях использовали отобранные в случайном порядке и аттестованные в соответствии с ГОСТ 25003 пластины из оксидной BO13, оксидно-карбидной BOK71 и нитридной РКС22 керамики (далее КИ BO13, КИ BOK71 и КИ РКС22 соответственно), причем каждая партия включала 20 шт. Контролировали также структуру керамических материалов и морфологию рабочих поверхностей всех КИ с использованием эталонных образцов. При проведении испытаний КИ измеряли ширину фаски износа задней поверхности  $h_3$  на оптическом микроскопе Stereo Discovery V12 (Zeiss). При достижении износа КИ по установленным критериям иссле-

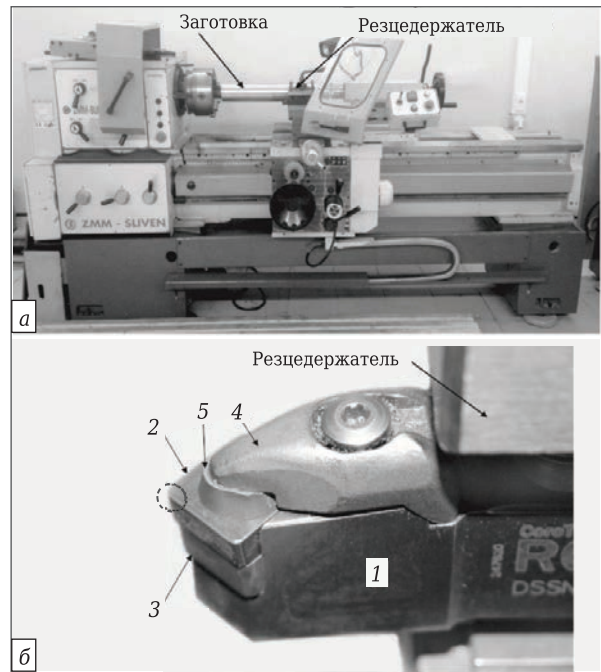


Рис. 1. Оборудование для проведения испытаний КИ на стойкость

довали морфологию изношенных поверхностей, а также проверяли наличие сколов, трещин и локальных разрушений с использованием электронно-сканирующего микроскопа VEGA 3LMN (Tescan). Перед этим исследованием с участка износа КИ стравливали налипания обрабатываемого материала. Твердость поверхности заготовки в процессе испытаний контролировали прибором ТКМ-359М.

Статистическую обработку результатов экспериментов проводили с применением программного комплекса Statistica v.10. В расчетах использовали данные испытаний 15 КИ из каждой партии; результаты испытаний КИ, имевших внезапный отказ (скол) при эксплуатации, не учитывали. В случае успешных испытаний более 15 КИ в партии из статистической обработки исключали худшие результаты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поля семейства кривых  $\tau - h_3$  для КИ BO13, BOK71 и РКС22 при точении стали 35ХГСА при режиме  $v = 220$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об и  $t = 0,8$  мм показаны на рис. 2. Видна практическая схожесть этих полей для разных КИ, что свидетельствует об одинаковом механизме их износа. Другим общим признаком полей является зависимость вида кривых  $\tau - h_3$  от значения  $T$ . Например, кривые  $\tau - h_3$  при больших значениях  $T$  имеют классический вид с ярко выраженными участками приработки, нормального и катастрофического износа. При средних значениях  $T$  участки приработки и нормального износа на кривых  $\tau - h_3$  имеют более сжатый характер. При

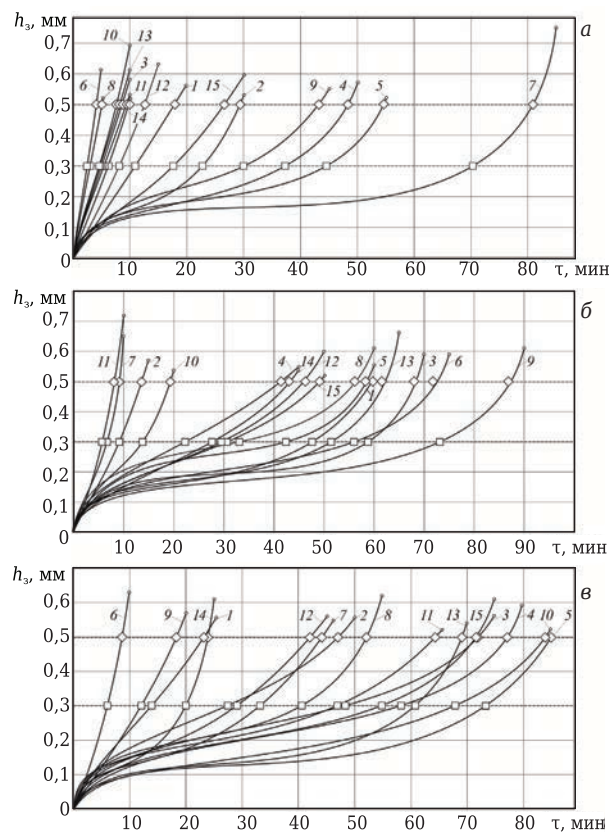


Рис. 2. Поля семейства кривых  $\tau - h_z$  для КИ ВО13 (а), ВОК71 (б) и РКС22 (в) при точении стали 35ХГСА

малых значениях  $T$  идентифицировать границы между участками не удастся, что свидетельствует о практически одинаковой интенсивности износа КИ в период всей эксплуатации.

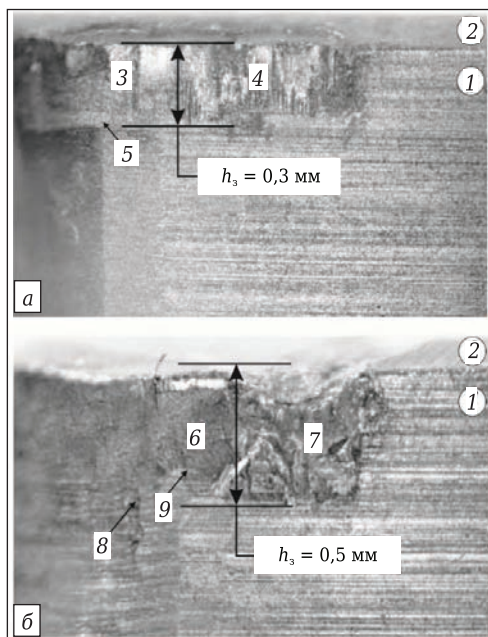


Рис. 3. Микрофотографии участков износа КИ при достижении критериев промежуточного (а) и предельного износа (б)

Отличительным признаком этих полей для разных КИ является асимметрия. Наибольшее число кривых на поле КИ ВО13 расположено в его левой части и характеризуется наименьшими значениями  $T$  (до установленных критериев износа), а наибольшее число кривых на поле КИ ВОК71 расположено в его правой части с наибольшими значениями  $T$ . Кривые  $\tau - h_z$  на поле КИ РКС22 расположены достаточно равномерно. В партии КИ ВО13 из 12 шт. зафиксированы четыре внезапных отказа (сколы) при эксплуатации, причем два отказа произошли на начальном этапе эксплуатации (до  $h_z = 0,3$  мм), а два — в интервале между  $h_z 0,3$  и  $0,5$  мм. В партиях КИ ВОК71 и РКС22 (по 20 шт.) зафиксировано по одному внезапному отказу на начальном этапе их эксплуатации, что, очевидно, связано с присутствием технологических дефектов в керамике, не выявленных при аттестации КИ. Соответственно, из статистической обработки исключили один КИ ВО13 и по четыре КИ ВОК71 и РКС22, показавшие наихудшие результаты при испытаниях.

Установлено, что  $T_{\min}$  для КИ ВО13 составила 2 и 4 мин при  $h_z 0,3$  и  $0,5$  мм соответственно, для КИ ВОК71 — 6 и 8 мин и для КИ РКС22 — 6 и 9 мин;  $T_{\max}$  для КИ ВО13 составила 76 и 82 мин при  $h_z 0,3$  и  $0,5$  мм соответственно, для КИ ВОК71 74 и 86 мин и для КИ РКС22 67 и 85 мин;  $T_{\text{ср}}$  для КИ ВО13 составила 18,5 и 23,8 мин при  $h_z 0,3$  и  $0,5$  мм соответственно, для КИ ВОК71 33,3 и 45,6 мин и для КИ РКС22 38,3 и 51,8 мин при установленных критериях износа. Диапазон изменения стойкости  $\Delta$  при  $h_z = 0,3$  мм составил 70, 68 и 61 мин, а при  $h_z = 0,5$  мм — 78, 78 и 76 мин для КИ ВО13, ВОК71 и РКС22 соответственно.

В качестве примера сложного характера износа КИ на рис. 3 показаны микрофотографии участков износа вершины КИ, сформированной задней поверхностью 1 и упрочняющей фаской 2 при установленных критериях износа. Видно, что морфология поверхности керамики на фаске износа имеет разный вид при  $h_z 0,3$  и  $0,5$  мм. Анализ структуры керамики на участке износа при  $h_z = 0,3$  мм (см. рис. 3, а) выявил наличие областей со сглаженным рельефом 3 и областей 4, сформированных совокупностью вертикальных борозд разных ширины и глубины. Увеличение  $h_z$  приводит к укрупнению этих борозд главным образом за счет увеличения их глубины. Как правило, участок износа при  $h_z = 0,3$  мм имеет достаточно стабильную границу 5. На границах поверхностных зерен керамики обнаружены структурные дефекты эксплуатационного происхождения в виде несплошностей размерами до 1 мкм и зародышевые трещины длиной до 3 мкм. Число этих эксплуатационных дефектов многократно увеличивается на участке износа при  $h_z = 0,5$  мм, что резко активизирует «скрытое» разрушение поверхностного слоя керамики [14, 15].



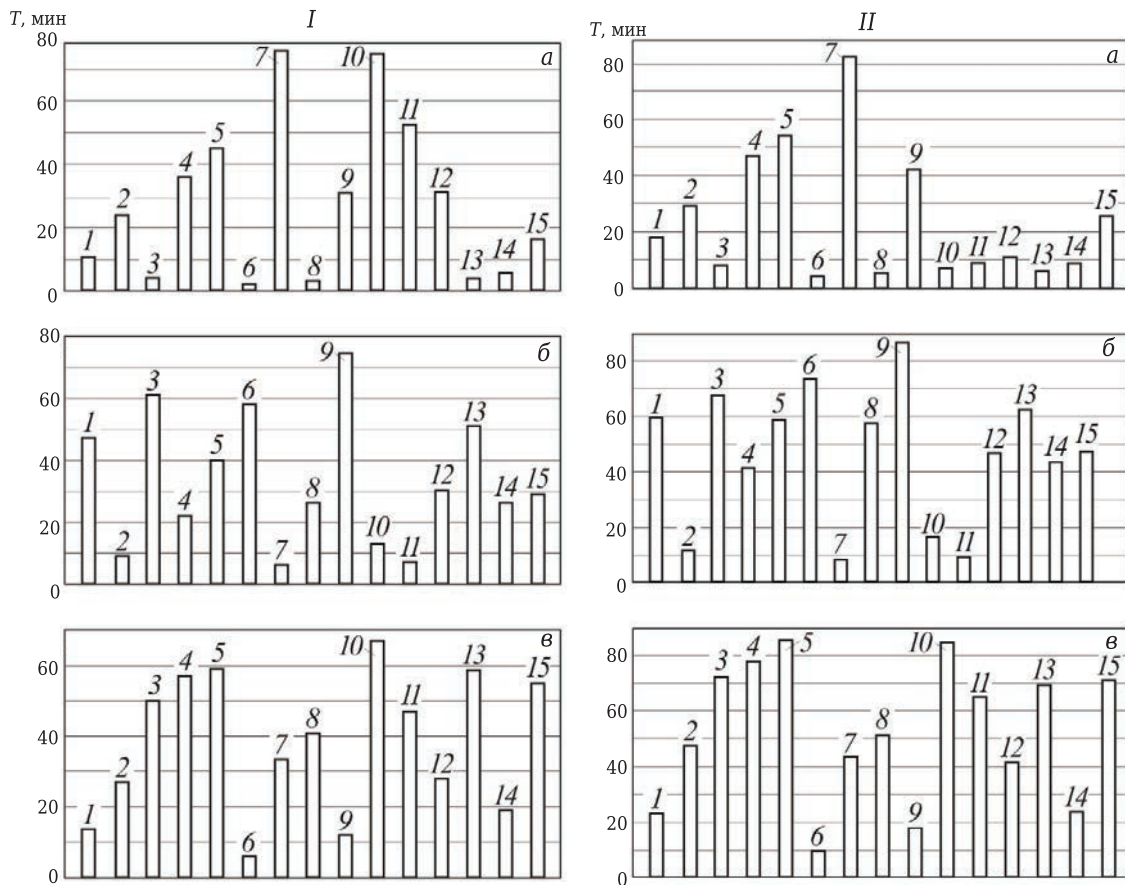


Рис. 4. Распределение  $T$  для КИ ВО13 (а), ВОК71 (б) и РКС22 (в) в партии из 15 шт. при точении стали 35ХГСА при  $h_3$ , равном 0,3 (I) и 0,5 мм (II)

С интенсивным действием механизма «скрытого» разрушения керамики связана крайне высокая дефектность поверхности на участке износа  $h_3 = 0,5$  мм. На этой поверхности, образованной многочисленными сколами 6 и локальными разрушениями 7, присутствуют многочисленные трещины 8, часть которых распространяется за пределы участка износа. Участок износа при  $h_3 = 0,5$  мм имеет весьма нестабильную границу 9. Этим можно объяснить внезапные отказы КИ ВОК71 и РКС22 после того, как ширина фаски износа превышала значение  $h_3 > 0,5$  мм. Этот этап в эксплуатации КИ следует признать режимом крайне нестабильной работы из-за высокой вероятности внезапных отказов. Для КИ ВО13 режим крайне нестабильной работы начинается после достижения  $h_3 = 0,4$  мм. Исходя из этого положения, рекомендовано применять в качестве критерия предельного износа  $h_3 = 0,3$  мм для КИ ВО13 и  $h_3 = 0,4$  мм для КИ ВОК71 и РКС22.

Распределение стойкости КИ из разной керамики в партии из 15 шт. при точении стали 35ХГСА до критерия износа  $h_3 = 0,3$  мм показано на рис. 4, I. Видно, что распределение  $T$  имеет наиболее нестабильный вид у КИ ВО13, а наиболее стабильный — у КИ РКС22. Установлено,

что стандартное отклонение стойкости  $\sigma_T$  при  $h_3 = 0,3$  мм составило 20,91, 21,18 и 19,8 мин, а коэффициент вариации стойкости  $V_T$  при этом же критерии износа составил 113,27, 63,68 и 51,74 мин у КИ ВО13, ВОК71 и РКС22 соответственно.

Распределение стойкости КИ ВО13 в партии из 15 шт. при точении закаленной стали 35ХГСА при  $h_3 = 0,5$  мм показано на рис. 4, II. Видно, что распределение  $T$  практически повторяет предыдущий случай. Наиболее нестабильный вид распределения  $T$  имеют КИ ВО13, наиболее стабильный — КИ РКС22. Установлено, что  $\sigma_T$  стойкости при  $h_3 = 0,5$  мм составило 23,03, 24,43 и 25,13 мин, а  $V_T$  стойкости при этом же критерии износа составил 96,79, 53,59 и 48,52 мин у КИ ВО13, ВОК71 и РКС22 соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанной методики исследований и комплекса эксплуатационных характеристик, учитывающих структуру подсистемы резания в системе металлообработки и условия эксплуатации КИ, оценена надежность резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами из оксидной ВО13, оксидно-карбидной ВОК71 и нитридной РКС22 керамики, при точении закаленной стали 35ХГСА при

ограниченном объеме испытаний на стойкость. Установлены и проанализированы количественные показатели следующих эксплуатационных характеристик этих КИ: число внезапных отказов (сколов)  $N$ , средние  $T_{ср}$ , минимальные  $T_{мин}$  и максимальные  $T_{макс}$  значения стойкости, диапазон изменения стойкости  $\Delta$  ( $\Delta = T_{макс} - T_{мин}$ ) в партии, стандартное отклонение  $\sigma_T$  и коэффициент вариации  $V_T$  стойкости. Использование установленных критериев износа КИ позволило объяснить их внезапные отказы на разных ста-

диях эксплуатации. Рекомендуется применять в качестве критерия предельного износа  $h_3 = 0,3$  мм для КИ В013,  $h_3 = 0,4$  мм — для КИ В0К71 и РКС22.

\*\*\*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 9.1372.2017/4.6.*

## Библиографический список

1. **Старков, В. К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В. К. Старков. — М.: Машиностроение, 1989. — 297 с.

2. **Григорьев, С. Н.** Инструментальная оснастка станков с ЧПУ / С. Н. Григорьев, М. В. Кохомский, А. Р. Маслов. — М.: Машиностроение, 2006. — 544 с.

3. **Синопальников, В. А.** Надежность и диагностика технологических систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. — М.: Высшая школа, 2003. — 342 с.

4. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. И. Доско, 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.

5. **Григорьев, С. Н.** Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров [и др.] // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 8. — С. 48–54.

6. **Cui, Xiaobin.** Reliability analysis of ceramic cutting tools in continuous and interrupted hard turning / Xiaobin Cui, Feng Jiao, Pingmei Ming [et al.] // Ceram. Int. — 2017. — Vol. 43. — P. 10109–10122.

7. **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.

8. **Vereschaka, A. A.** Improvement in reliability of ceramic cutting tool using a damping system and nano-structured multi-layered composite coatings / A. A. Vereschaka, A. D. Batako, A. A. Krapostin [et al.] // Procedia CIRP. — 2017. — Vol. 63. — P. 563–568.

9. **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.

10. **Vigneau, J.** Reliability of ceramic cutting tools / J. Vigneau, P. Bordel, R. Geslot // CIRP Annals. — 1988. — Vol. 37. — P. 101–104.

11. **Кузин, В. В.** Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин / В. В. Кузин, В. Н. Аникин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров // Вестник машиностроения. — 2010. — № 11. — С. 50–56.

**Kuzin, V. V.** Wear and failure of ceramic cutting plates / V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov, M. Yu. Fedorov // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 11. — P. 1116–1123.

12. **Кацев, П. Г.** Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1974. — 231 с.

13. **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.

14. **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. Grigor'ev, M. A. Volosova // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.

15. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

**Kuzin, V. V.** Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44. ■

Получено 10.06.18

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,  
С. Ю. Фёдоров, 2018 г.