

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 666.3:536.49:621.914.22

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФРЕЗ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ. ВЫБОР КЕРАМИКИ. Часть 1

Показана возможность использования методологии проектирования керамических инструментов, основанной на анализе их напряженно-деформированного состояния, для выбора керамики при создании концевых керамических фрез. Приведена взаимосвязь свойств Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики с температурой, перемещениями и напряжениями в лезвии керамической фрезы в условиях нестационарной термоупругости.

Ключевые слова: проектирование, концевая керамическая фреза, Al_2O_3 -керамика, Si_3N_4 -керамика, тепловой поток, пространственно-сложные поверхности (ПСП), нестационарная термоупругость.

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление деталей из труднообрабатываемых материалов специального назначения (лопатки паровых и газовых турбин, крыльчатки, гребные и воздушные винты, импеллеры, экструдеры) имеет особую технологическую сложность из-за необходимости высокоточной обработки пространственно-сложных поверхностей (ПСП) [1, 2]. Эффективность этой обработки определяется совокупностью факторов, в том числе реализацией спроектированного процесса формообразования ПСП на многокоординатном станке [3], а ее выходные параметры связаны с заданной траекторией движения фрезы и назначенными режимами резания, зависящими от материала фрезы. Широко применяемые монолитные концевые фрезы из твердого сплава для обработки ПСП на многокоординатном станке обеспечивают хорошие результаты на «черновых» проходах при удалении наибольшего объема материала [4]. При чистовой обработке ПСП, когда формируются качественные показатели детали, целесообразно применять высокоскоростное фрезерование с использованием керамических инструментов, улучшающих состояние чистовых поверхностей и снижающих себестоимость обработки [5]. Керамика является наиболее эффективным инструментальным материалом для прецизионной финишной об-

работки, потенциальные возможности которой еще в полной мере не выявлены [6, 7].

Обработка ПСП на многокоординатных станках с позиции теории резания является чрезвычайно сложным процессом из-за ее ярко выраженной нестационарности, определяемой прерывистым характером резания и постоянным изменением его режима, взаимными перемещениями по сложным траекториям заготовки и фрезы, непрерывной трансформацией сечений удаляемого припуска и изменяющимся характером эксплуатационных нагрузок на зубья фрезы. Это является причиной формирования весьма сложного напряженно-деформированного состояния зубьев фрезы и приводит к их частым внезапным сколам, причем особую опасность имеют циклические тепловые нагрузки. По этой причине применение концевых (также используемые термины — монолитных, цельных) керамических фрез для обработки ПСП деталей из труднообрабатываемых материалов считается нецелесообразным.

Авторы настоящей работы, имеющие значительный опыт в создании, изготовлении и эксплуатации разных инструментов из керамики, считают, что концевые керамические фрезы имеют большие перспективы и исследовательские работы по их созданию являются весьма актуальными. Это подтверждают результаты работы [8], в которой приведены сведения, касающиеся высокоскоростного фрезерования никелевого сплава керамической фрезой. Начальный этап этих исследований должен быть ориентирован на формирование методологии проектирования концевых керамических фрез (выбор рациональ-



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

ной марки инструментальной керамики, определение оптимальных геометрических параметров рабочих поверхностей, выбор состава покрытия), выбор базовых процессов в технологии изготовления монолитных керамических фрез и проведение испытаний опытных образцов фрез на износостойкость при многокоординатной обработке ПСП. Цель настоящей работы — с использованием ранее созданной методологии проектирования керамических инструментов [9, 10], основанной на создании барьера зарождению и развитию эксплуатационных трещин, сформировать рекомендации по выбору керамики для изготовления монолитных керамических фрез.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

На рис. 1 показана монолитная концевая фреза, имеющая три зуба, и ее геометрические параметры по ГОСТ 18372–73 (буквенные обозначения приведены в [11]). Фреза имеет рабочую часть 1 и цилиндрический хвостовик 2 и изготавливается из разных марок твердого сплава путем вышлифовывания канавок 3 и 4 сложной формы на цилиндрической и торцевой поверхностях (соответственно) спеченной твердосплавной заготовки. В результате создаются зубья фрезы и сердечник 5, определяющий макропрочность рабочей части и жесткость концевой фрезы. Геометрия зубьев фрезы оказывает особое влияние на микропрочность фрезы. Основными элементами зуба фрезы являются главная режущая кромка 6 на цилиндрической поверхности, выполняющая основную работу по удалению припуска, и вспомогательная режущая кромка 7 на ее торцевой поверхности, формирующая обработанную поверхность. Эти две кромки образуют сложную геометрию лезвия 8 зуба фрезы, на которое действуют нестационарные тепловые и силовые нагрузки при фрезеровании.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием «однозубых» моделей концевых керамических фрез (далее фрез) при обработке поверхностей простой формы (плоскость), показали, что их эксплуатация сопровождается специфичными контактными, силовыми и тепловыми процессами. С использованием выявленных особенностей проанализирована кинетика износа и разрушения этих фрез

при обработке заготовок из разных материалов. В результате физических и химических процессов на лезвии происходит хрупкое микроразрушение поверхностных слоев керамики с постепенной трансформацией его рельефа. Наиболее интенсивно этот процесс протекает на лезвии керамической фрезы, имеющем малый радиус округления (сопоставимый с размером зерна в керамике) и наименьшую микропрочность. На характер и вероятность разрушения лезвия керамических фрез также влияют режим резания и свойства обрабатываемого материала. При этом однозначной зависимости между вероятностью разрушения лезвия и пределом прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, интенсивностью напряжения K_{1c} и термостойкостью T_p керамики, из которой изготовлены фрезы, обнаружено не было.

Выявлено, что разрушению лезвия фрезы предшествует изменение структуры поверхностного слоя керамики и появление эксплуатационных дефектов, которые являются источниками зарождения трещин, приводящих к микросколам на лезвии фрезы. Однако с использованием только экспериментальных данных не удалось выстроить цепочку взаимосвязей эксплуатационные нагрузки – напряженно-деформированное состояние керамики – износ и разрушение зубьев керамической фрезы. Для решения этой задачи использовали математическое моделирование напряженно-деформированного состояния лезвия фрезы.

Расчетную схему для численных экспериментов построили в соответствии с алгоритмом, приведенным в статьях [12, 13]. Приняли следующие допущения: рассматривается плоская задача, отсутствуют пластические деформации керамики и обрабатываемого материала, керамика является бездефектной, трение заменяется действием сосредоточенных сил, ударные нагрузки заменяются сосредоточенными силами. Первоначально построили микроструктурную модель лезвия монолитной керамической фрезы, которое контактирует с деталью по двум поверхностям [14]. Деталь передает эксплуатационные нагрузки на лезвие монолитной керамической фрезы. На основе этой микроструктурной модели разработаны две расчетные схемы (рис. 2), отличающиеся наличием слоя покрытия на контактных площадках лезвия монолитной керамической фрезы во второй схеме. Лезвие фрезы с

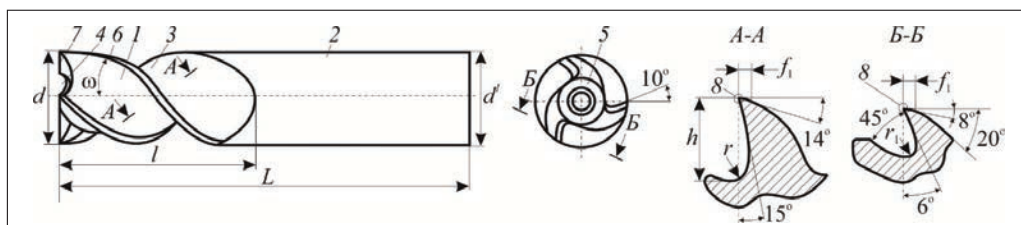


Рис. 1. Монолитная концевая фреза и ее геометрические параметры

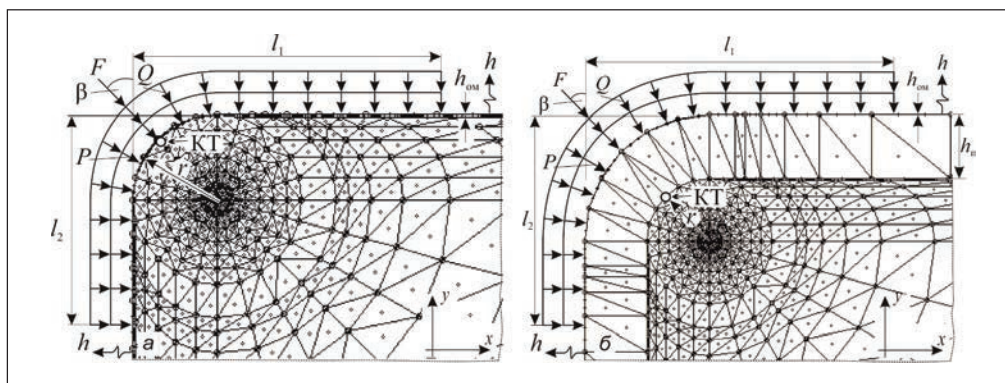


Рис. 2. Расчетные схемы

радиусом округления r из керамики состоит из следующих структурных элементов: зерна, межзеренной фазы и матрицы. В первой расчетной схеме на горизонтальной и вертикальной поверхностях расположен слой обрабатываемого материала толщиной h_{om} (см. рис 2, а), а во второй — между керамикой и слоем обрабатываемого материала расположен слой покрытия толщиной h_n . На внешний контур этой конструкции действуют сосредоточенная сила F , направленная под углами β к оси y , распределенная силовая нагрузка P и зависящий от времени тепловой поток Q . В расчетах учтены конвективные потери тепла с коэффициентом теплообмена h на свободных от теплового потока частях внешнего контура.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовали напряженно-деформированные состояния лезвия фрезы из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики (далее керамическое лезвие) в условиях неустановившейся термоупругости с использованием первой расчетной схемы и автоматизированной системы термпрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [15]. Это позволяет учесть при проектировании особенности состояния инструментального материала в переходном процессе (нагрев и охлаждение), что представляет особую актуальность при действии циклических тепловых нагрузок. В качестве обрабатываемого материала использовали никелевый сплав ЭП741Н-П. Считали, что керамика является однородной — зерно, межзеренная фаза и матрица выполнены из одного тугоплавкого соединения (границы между этими структурными элементами в

керамике отсутствуют). Свойства тугоплавких соединений, из которых выполнены керамики, и сплава приведены в таблице, причем свойства, зависящие от температуры, задавали формулами. В работе [16] приведен подробный список справочников и монографий, из которых позаимствованы значения этих свойств.

Расчеты выполняли для керамического лезвия радиусом r 5 мкм (сопоставим с размером зерна в керамике) и h_{om} 0,1 мкм. Керамическое лезвие нагружали сосредоточенной силой $F = 0,0001$ Н, $\beta = 45^\circ$, распределенной силовой нагрузкой $P = 5 \cdot 10^8$ Па и тепловым потоком $Q = 7 \cdot 10^8$ Вт/м². При этом с поверхностями керамической пластины, свободных от теплового потока, обеспечивали теплоотвод в окружающую среду с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м²·град).

Для количественной оценки и анализа горизонтальных u и вертикальных v перемещений, температур T , напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в керамическом лезвии использовали метод контрольных точек (КТ) [17]. Под КТ понимали фиксированные узлы или конечные элементы конструкции, образующие эту КТ. В качестве базовой использовали одну КТ (узел № 4, конечный элемент № 166), расположенную в керамике на границе со слоем обрабатываемого материала в первой расчетной схеме и слоем покрытия во второй расчетной схеме (см. рис. 2). Перемещения и температуру определяли в узле, а напряжения — в конечном элементе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для наглядного представления сложности напряженно-деформированного состояния ке-

Свойства	Керамика		Сплав ЭП741Н-П
	Al_2O_3	Si_3N_4	
ρ , кг/м ³	4,0	3,2	8,35
E , ГПа	380	300	193
μ	0,24	0,25	0,33
ТКЛР (20–1500 °С), 10^{-6} 1/град	8,5	3,2	13,7
λ , Вт/(м·град)	$2100 T^{-0,78}$	$1001,7 T^{-0,63}$	$7,954 e^{0,0013T}$
c_p , кДж/(кг·град)	$1093,6 + 183,7 \cdot 10^{-3}T - 304,3 \cdot 10^{-5}T^2$	$1342,9 + 200,4 \cdot 10^{-3}T - 96,8 \cdot 10^{-5}T^2$	$380,21 e^{0,0006T}$

рамического лезвия на рис. 3 показаны схемы его упругой деформации под действием разных нагрузок. На рис. 3, а приведена схема упругой деформации лезвия из Si_3N_4 -керамики под действием силовой нагрузки, а на рис. 3, б — при комбинированном нагружении (совместное действие силовой нагрузки и теплового потока на этапе установившейся теплопроводности). Видно, что области упругих деформаций имеют хорошо различимую границу, в пределах которой локальный объем керамики перемещается в одном направлении, обозначенном стрелкой u , v . Эти перемещения имеют одинаковые направления для КТ лезвия как из Al_2O_3 -керамики, так и из Si_3N_4 -керамики при идентичных условиях нагружения.

Установлено, что под действием силовой нагрузки ($F = 0,0001 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$, $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$) происходит упругая деформация режущей пластины в виде вдавливания. Лезвие перемещается по траектории, обозначенной стрелкой u , v , и КТ из первоначального ненагруженного положения переходит в положение КТ^1 , которое определяется углом β приложения силы F и уровнем P . При комбинированном нагружении ($F = 0,0001 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$, $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и $Q = 7 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$) упругая деформация керамического лезвия имеет вид выпучивания. Как и в первом случае, наибольшей деформации подвергается керамическое лезвие, которое перемещается по траектории, обозначенной стрелкой u_1 , v_1 . При этом КТ из первоначального ненагруженного положения смещается и занимает положение КТ^{11} , координаты которого определяются уровнем теплового потока, причем с изменением теплового потока пропорционально изменяются u_1 , v_1 . Эти результаты в полной мере коррелируют с выводами [18].

Результаты исследования T , u , v , σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ лезвия из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики при нагреве ($F = 0,0001 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$, $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и $Q = 7 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$) показаны на рис. 4. Все кривые на этих графиках имеют простую форму, определяемую действием теплового потока на керамическое лезвие, и имеют два характеристических

диапазона, обозначенных на графиках температура T – время нагрева τ . В характеристическом диапазоне 1 (этап нестационарной термоупругости) происходит изменение T , u , v , σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , значения которых выходят на максимальный / минимальный уровень в конечной точке этого диапазона. В характеристическом диапазоне 2 (этап стационарной термоупругости) значения T , u , v , σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i не изменяются. Влияние длительности нагрева на изменение температуры в керамическом лезвии описывается однозначно: в характеристическом диапазоне 1 температура повышается при $\tau = 0,04 \text{ с}$ до T^1 . Значение T^1 для лезвия из Al_2O_3 -керамики составляет 1228°C (см. рис. 4, а) и 873°C для лезвия из Si_3N_4 -керамики (см. рис. 4, б). Через $\tau = 0,04 \text{ с}$ после начала нагрева температура в КТ стабилизируется на указанных выше температурах и далее не изменяется.

Кривые изменения u и v при нагреве для КТ керамического лезвия имеют более сложный характер из-за того, что в начальный момент нагрева ($\tau = 0 \text{ с}$) керамическое лезвие уже находится в деформированном состоянии в результате действия силовой нагрузки. При нагреве u уменьшаются, а v увеличиваются в характеристическом диапазоне 1, причем перемещения КТ имеют практически симметричный вид. Установлено, что u и v для КТ лезвия из Si_3N_4 -керамики меньше, чем из Al_2O_3 -керамики. Кривые изменения как u , так и v для КТ лезвия из Al_2O_3 -керамики пересекают нулевую линию, а у лезвия из Si_3N_4 -керамики только v пересекает нулевую линию. В характеристическом диапазоне 2 u и v выходят на стационарный режим и фиксируются на следующих значениях: для лезвия из Al_2O_3 -керамики $u = 4,63 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $v = -3,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а для лезвия из Si_3N_4 -керамики $u = 1,27 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $v = 0,12 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

Наибольший интерес представляют кривые, характеризующие изменение σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ лезвия из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики при нагреве. Видно, что керамики на основе Al_2O_3 и Si_3N_4 по-разному реагируют на нагрев. Резкое повыше-

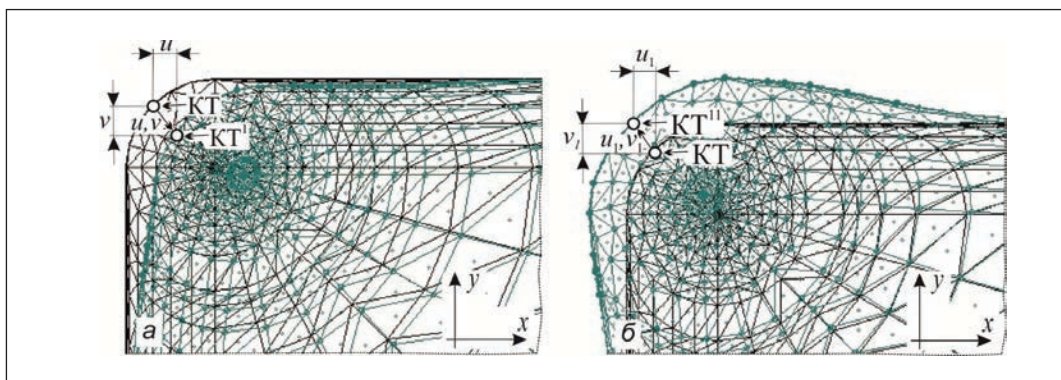


Рис. 3. Схема деформации керамического лезвия при силовом (а) и комбинированном (б) нагружении лезвия из Si_3N_4 -керамики

ние температуры до 1228 °С в характеристическом диапазоне 1 приводит к значительному уменьшению напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в КТ лезвия из Al_2O_3 -керамики, в результате этого уменьшается интенсивность напряжений σ_i с 862 до 746 МПа. Можно сказать, что в этом случае тепловой поток компенсирует действие силовой нагрузки. Увеличение температуры в значительно меньшем диапазоне (с 0 до 873 °С) в КТ лезвия из Si_3N_4 -керамики приводит к некоторому увеличению σ_i с 852 до 877 МПа в характеристическом диапазоне 1 за счет увеличения σ_{11} и σ_{12} и некотором уменьшении σ_{22} . В этом случае тепловой поток усиливает действие тепловой нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численных экспериментов подтвердил возможность использования ранее созданной методологии проектирования керамических инструментов, основанной на анализе их напряженно-деформированного состояния, для выбора керамики для изготовления монолитных керамических фрез. В результате моделирования напряженно-деформированного состояния лезвия фрез из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики (при сделанном допущении об однородности керамики) выявлены взаимосвязи свойств этих тугоплавких соединений с температурой, перемещениями и напряжениями в условиях нестационарной термоупругости. Установленные зависимости показали неоднозначное влияние базового струк-

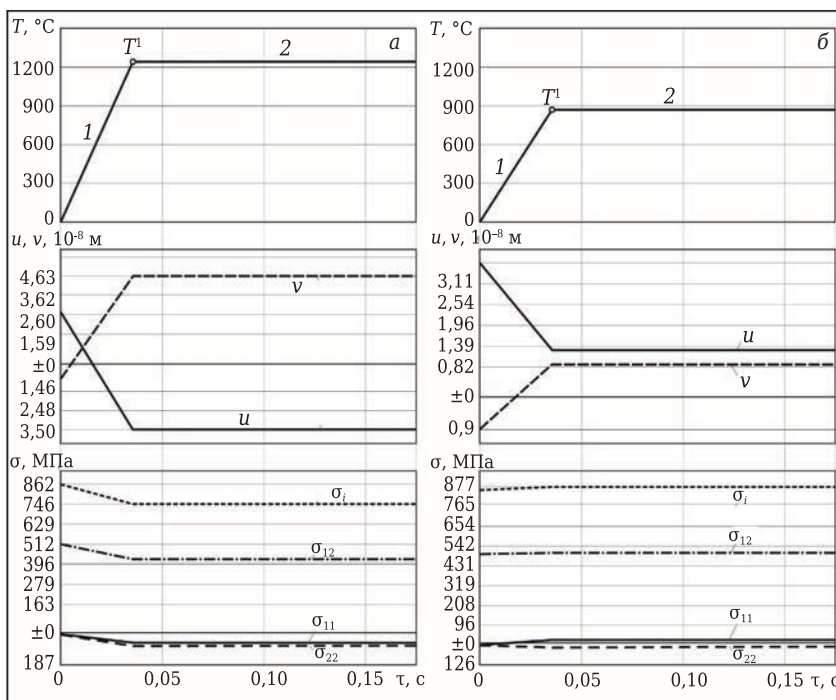


Рис. 4. Влияние длительности нагрева τ на температуру T , перемещения u и v и напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в КТ лезвия из Al_2O_3 -керамики (а) и Si_3N_4 -керамики (б) при нагреве

турного элемента керамики на изменение напряженного состояния керамического лезвия при циклическом действии теплового потока. Для обоснованного выбора керамики для изготовления монолитных керамических фрез необходимо изучить неоднородность напряжений, формирующуюся на границах основных структурных элементах керамики в условиях нестационарной термоупругости. Результаты этого исследования будут представлены в следующей статье.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00599).

Библиографический список

1. **Максимов, Ю. В.** К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопровильных деталей на станках с изменяющимися элементами / Ю. В. Максимов, А. Р. Абрамова, Д. Л. Кузьминский [и др.] // Изв. МГТУ МАМИ. — 2012. — № 1. — С. 168–174.
2. **Макаров, В. М.** Многокоординатная или многоповерхностная металлообработка / В. М. Макаров // Ритм. — 2010. — № 52. — С. 32–35.
3. **Лукина, С. В.** Повышение эффективности многокоординатного фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ / С. В. Лукина, И. В. Манаенков // Изв. МГТУ МАМИ. — 2012. — Т. 2, № 2. — С. 8–129.
4. **Верещака, А. С.** Повышение производительности монолитно-твердосплавного инструмента нанесением покрытий / А. С. Верещака, В. Н. Аникин, В. В. Кузин // Но-

вые конструкции и прогрессивные технологии производства инструмента : сб. тр. — М., 1984. — С. 306–310.

5. **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.

6. **Жедь, В. П.** Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение : справочник / В. П. Жедь, Г. В. Боровский, Я. А. Музыкант [и др.]. — М. : Машиностроение, 1987. — 320 с.

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. **Sajgalik, Michal.** Identification of technological parameters when machining Ni-alloys by monolithic ceramic milling tool / Michal Sajgalik, Andrej Czan, Mario Drbul [et al.] // Procedia Manufacturing. — 2017. — Vol. 14. — P. 51–57.

9. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87, 88.

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. **ГОСТ 18372–73.** Фрезы концевые твердосплавные. Технические условия.

12. **Kuzin, V.** Applications of multi-level method of stress-strain state analysis in ceramic tools design / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 173–176.

13. **Кузин, В. В.** Математическая модель напряженно-деформированного состояния керамической режущей пластины / В. В. Кузин, В. И. Мяченков // Вестник машиностроения. — 2011. — № 10. — С. 75–80.

Kuzin, V. V. Stress-strain state of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin, V. I. Myachenkov // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 10. — P. 994–1000.

14. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

15. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термopрочностных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.

Grigor'ev, S. N. Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

16. **Кузин В. В.** Инструменты с керамическими режущими пластинами / В. В. Кузин. — М. : Янус-К, 2006. — 160 с.

17. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35.

18. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

Kuzin, V. V. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380. ■

Получено 14.09.18

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,
М. А. Волосова, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

REFRA 2019 — 20-я КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СОВРЕМЕННЫМ ОГНЕУПОРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

24–26 апреля 2019 г.

г. Прага, Чешская Республика

Темы:

- Энергетические аспекты высокотемпературной обработки
- Огнеупорные и теплоизоляционные материалы для высокотемпературных процессов
- Коррозия огнеупорных материалов
- Структура огнеупорных материалов и их модификация наноматериалами
- Новые свойства огнеупорных материалов

www.silicaty.cz