

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

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 2*

Изучена неоднородность напряжений на границах основных структурных элементов Al_2O_3 -керамики в условиях нестационарной термоупругости, имеющих особое значение для создания рекомендаций по выбору керамики для концевых керамических фрез.

Ключевые слова: концевая керамическая фреза, Al_2O_3 -керамика, нестационарная термоупругость, напряженно-деформированное состояние (НДС).

ВВЕДЕНИЕ

В части 1 статьи [1] предложено выбирать керамику для изготовления концевых керамических фрез с учетом их напряженно-деформированного состояния (НДС) при резании. На основе результатов моделирования НДС лезвия фрез из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики при сделанном допущении об ее однородности выявлена взаимосвязь свойств этих тугоплавких соединений с температурой и напряжениями в условиях нестационарной термоупругости. Однако эти зависимости не позволили сделать однозначный вывод об оптимальной керамике для изготовления фрез. Для обоснованного выбора керамики необходимо оценить неоднородность напряжений в поверхностном слое керамического лезвия в условиях действия циклической тепловой нагрузки [2–4].

Цель работы — исследование неоднородности напряжений, формирующихся на границах основных структурных элементов Al_2O_3 -керамики при нагреве.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовали структурную неоднородность напряжений в поверхностном слое лезвия фрезы

из оксидно-карбидной керамики в условиях нестационарной термоупругости. Считали, что в неоднородной керамике зерна Al_2O_3 и TiC окружены зернами Al_2O_3 , которые формируют матрицу; маловероятный вариант окружения зерен Al_2O_3 зернами TiC не рассматривали. Полагали также, что на поверхности лезвия керамической фрезы имеются «налипания» обрабатываемого материала — никелевого сплава ЭП741Н-П. Другие допущения приведены в статье [1].

С учетом сделанных допущений исследовали керамику двух систем: система № 1 — Al_2O_3 -MgO- Al_2O_3 -ЭП741Н-П (зерно и матрица выполнены из Al_2O_3 , межзеренная фаза — из MgO, слой на поверхности керамики — из сплава ЭП741Н-П); система № 2 — TiC-MgO- Al_2O_3 -ЭП741Н-П (зерно — из TiC, межзеренная фаза — из MgO, матрица — из Al_2O_3 , слой на поверхности керамики — из сплава ЭП741Н-П). Ссылки на справочники и монографии, из которых позаимствованы значения свойства этих материалов, приведены в публикации [5].

В численных экспериментах использовали расчетную схему (рис. 1, а) и автоматизированную систему термочисленных расчетов RKS-ST v.1.0 [6]. Расчеты выполняли для зерна диаметром 10 мкм, что соответствовало значению радиуса лезвия фрезы $r = 5$ мкм. Зерно заделано в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 1$ мкм. На поверхности керамики имеется слой сплава ЭП741Н-П толщиной $h_{ом} = 0,1$ мкм. Керамическое лезвие нагружали сосредоточенной силой $F = 0,02$ Н, $\beta = 45^\circ$, распределенной силовой нагрузкой $P = 5 \cdot 10^8$ Па и тепловым потоком $Q = 9 \cdot 10^8$ Вт/м². При этом с поверхностей керамической пластины, свобод-

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 10 за 2018 г.



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

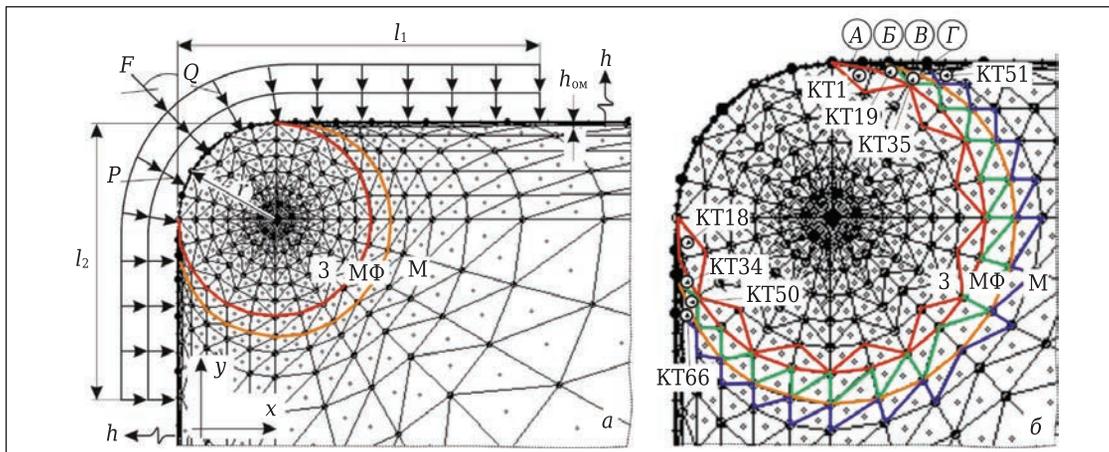


Рис. 1. Расчетная схема (а) и расположение КТ на выделенных поверхностях лезвия фрезы (б)

ных от теплового потока, осуществляли теплоотвод в окружающую среду с коэффициентом $h = 10^5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{град)}$.

Для количественной оценки температур T и интенсивности напряжений σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [7]. Выделенные КТ (рис. 1, б) располагались в поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность А), в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность Б), в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхность В), и в поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность Г). В поверхности А выделены КТ1–КТ18, в поверхности Б — КТ19–КТ34, в поверхности В — КТ35–КТ50 и в поверхности Г — КТ51–КТ66.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние времени нагрева τ на T в КТ1 поверхности А при нагреве лезвия из керамики систем № 1 и 2 показано на рис. 2, а. Видно, что кривые имеют простую форму и состоят из двух характеристических участков. На первом харак-

теристическом участке (этап нестационарной термоупругости) происходит резкое повышение температуры до T_1 за $\tau = 0,04$ с. Установлено, что значения T_1 для всех КТ керамики системы № 1 выше, чем системы № 2. Например, значение T_1^1 в КТ1 керамики системы № 1 составляет $1432 \text{ }^\circ\text{C}$, а T_1^2 в КТ1 керамики системы № 2 — $916 \text{ }^\circ\text{C}$. Через $\tau = 0,04$ с от начала нагрева температура во всех КТ керамики систем № 1 и 2 стабилизируется и далее не изменяется; системы входят в этап стационарной термоупругости. При охлаждении керамического лезвия происходит обратный процесс.

В качестве примера на рис. 2, б показано стационарное температурное поле, сформировавшееся в лезвии из керамики системы № 1 на этапе стационарной термоупругости. Видно, что изотермы, фиксирующие температуры 203, 406, 609, 812, 1015, 1218 и 1421 K , имеют вид вытянутых концентрических окружностей. Анализ этого температурного поля позволяет сделать вывод о крайне высоком температурном градиенте, что характеризует появление напряжений, имеющих тепловую природу. Это положение

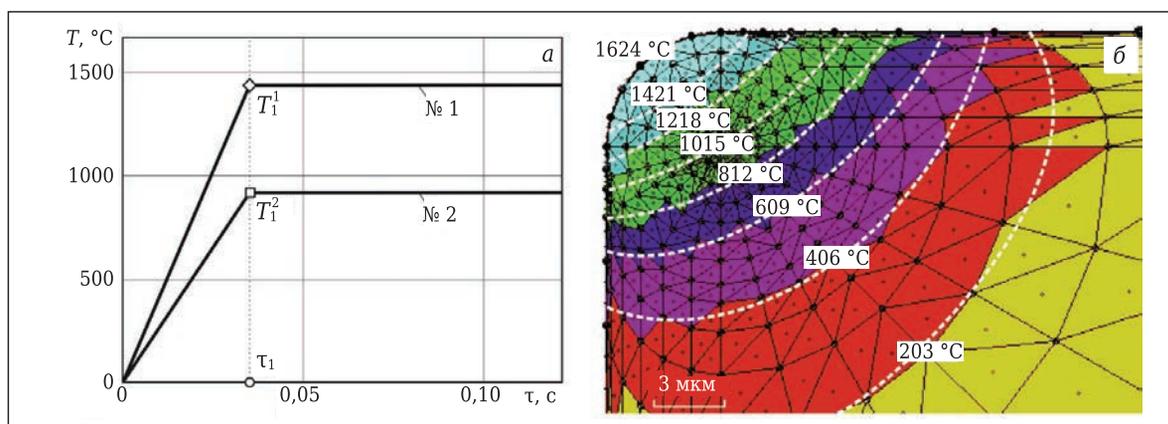


Рис. 2. Характер изменения T в КТ1 поверхности А керамики систем № 1 и 2 при нагреве (а) и температурное поле в лезвии из керамики системы № 1 на этапе стационарной термоупругости (б)

подтверждается выводами, представленными в публикации [8].

Характер изменения T в поверхностях A и Γ керамики систем № 1 и 2 при ее выходе на стационарный режим показан на рис. 3. В заштрихованной области расположены кривые, определяющие характер изменения T в поверхностях B и B . Сопоставление температур в поверхностном слое керамики систем № 1 и 2 выявило их значительную разницу. Это означает, что в случае соседнего расположения зерен Al_2O_3 и TiC , окруженных зернами Al_2O_3 , формирующие матрицу, эти области при нагреве будут существенно влиять на формирование общего теплового поля.

Под действием сформировавшегося теплового состояния лезвий из керамики систем № 1 и 2 во время нагрева происходит упругая деформация керамического лезвия в виде «выпучивания». Степень упругой деформации определяется временем от начала нагрева, причем увеличение времени нагрева приводит к сложному изменению перемещения КТ в горизонтальном и вертикальном направлениях. Это связано с тем, что до начала нагрева под действующей силовой нагрузкой ($F = 0,0001$ Н, $\beta = 45^\circ$, $P = 5 \cdot 10^8$ Па) происходит упругая деформация керамического лезвия в виде вдавливания. Наибольшей деформации подвергается центральный участок на поверхности зерна и, соответственно, керамического лезвия.

На рис. 4 показан характер изменения σ_i в разных поверхностях керамики систем № 1 и 2 до нагрева (действует только силовая нагрузка) и после нагрева (действует комбинированная нагрузка).

Установлено, что характер изменения σ_i в поверхности A керамики систем № 1 и 2 до нагрева имеет практически одинаковый вид (см. рис. 4, $a, б$), а после нагрева форма кривых существенно различается (зафиксировано только в КТ3, КТ4, КТ15 и КТ16). Причем значения σ_i

для керамики системы № 1 до и после нагрева несколько выше, чем для керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 469 до 876 МПа при $\sigma_{ср} = 659,7$ МПа, а после нагрева — от 400 до 918 МПа при $\sigma_{ср} = 634,4$ МПа (рис. 4, a); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 489 до 902 МПа при $\sigma_{ср} = 676,2$ МПа, а после нагрева — от 436 до 859 МПа при $\sigma_{ср} = 632,4$ МПа (см. рис. 4, $б$).

Характер изменения σ_i в поверхности B керамики систем № 1 и 2 до нагрева имеет практически одинаковый вид (см. рис. 4, $в, г$), а после нагрева форма кривых существенно различается. Причем значения σ_i для керамики системы № 1 до нагрева выше, а после нагрева ниже, чем для керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 451 до 827 МПа при $\sigma_{ср} = 594,8$ МПа, а после нагрева — от 427 до 796 МПа при $\sigma_{ср} = 676,4$ МПа (см. рис. 4, $в$); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 446 до 747 МПа при $\sigma_{ср} = 564,9$ МПа, а после нагрева — от 749 до 1215 МПа при $\sigma_{ср} = 904,5$ МПа (см. рис. 4, $г$).

Характер изменения σ_i в поверхности B керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева имеет практически одинаковый вид (см. рис. 4, $д, е$). Значения σ_i для керамики системы № 1 до нагрева несколько выше, а после нагрева несколько ниже, чем для керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 406 до 817 МПа при $\sigma_{ср} = 568,1$ МПа, а после нагрева — от 542 до 1213 МПа при $\sigma_{ср} = 735,1$ МПа (см. рис. 4, $д$); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 401 до 773 МПа при $\sigma_{ср} = 557,6$ МПа, а после нагрева — от 635 до 1183 МПа при $\sigma_{ср} = 850,9$ МПа (см. рис. 4, $е$).

Характер изменения σ_i в поверхности Γ керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева имеет практически одинаковый вид. Значения σ_i в этой поверхности керамики системы № 1 до и после нагрева выше, чем у керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они

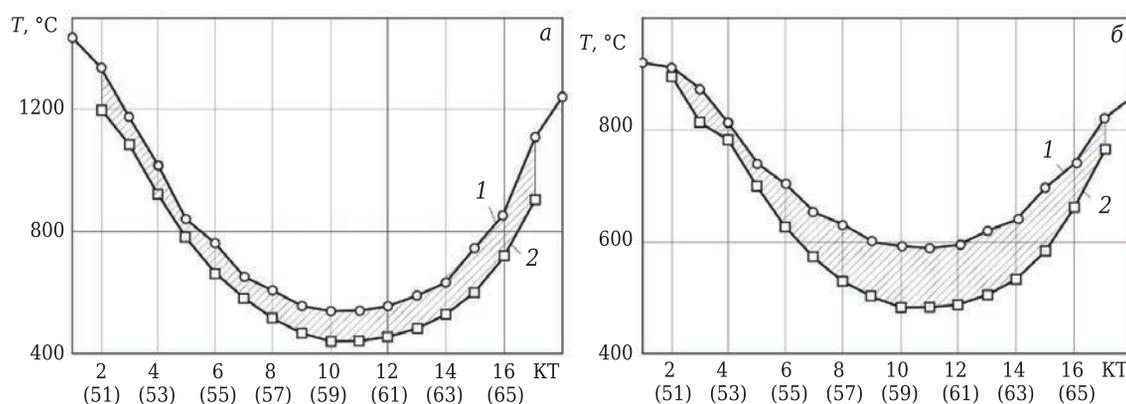


Рис. 3. Характер изменения T в поверхностях A (1) и Γ (2) керамики систем № 1 (а) и № 2 (б) после нагрева

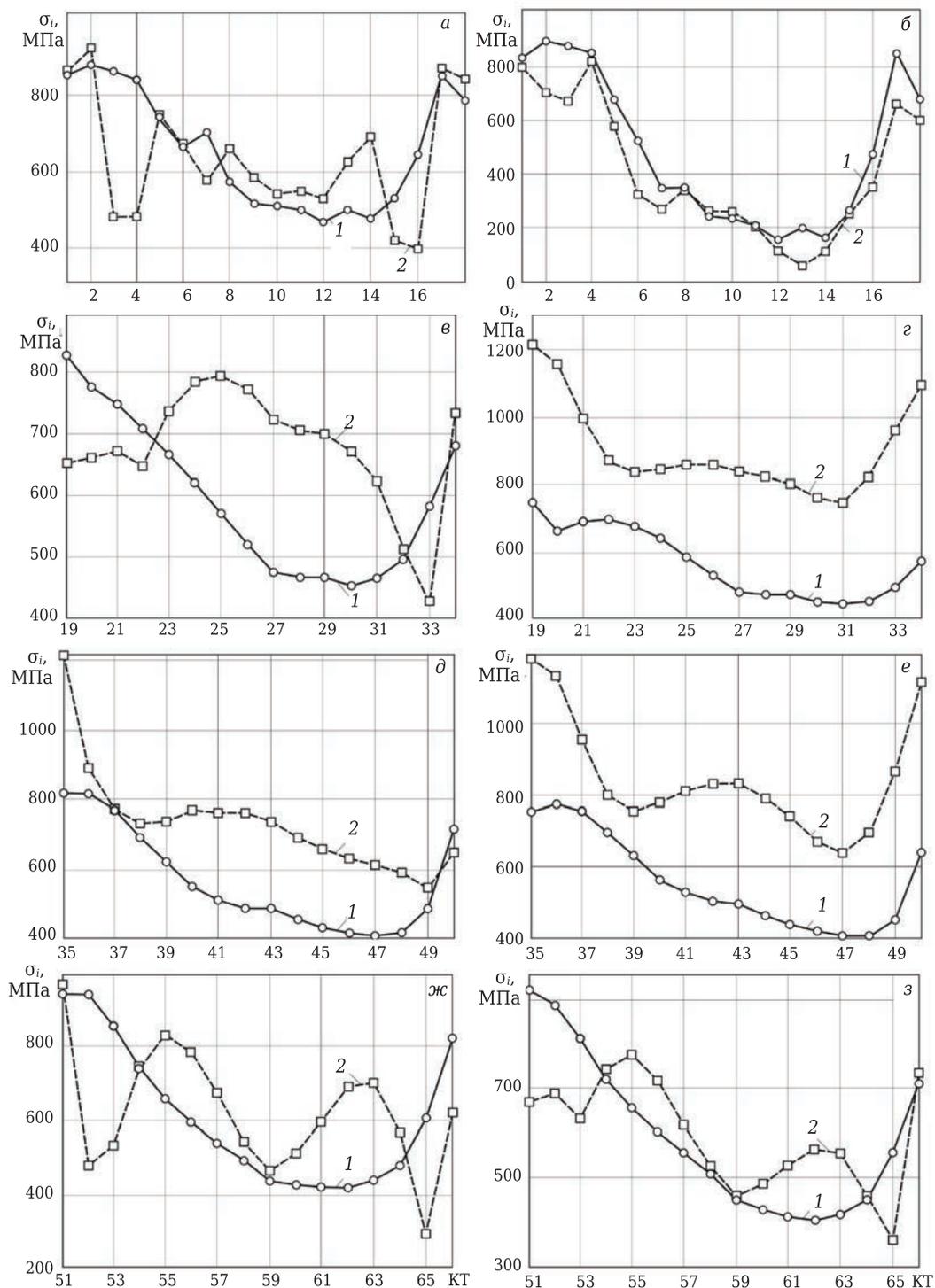


Рис. 4. Характер изменения σ_i в поверхностях А (а, б), Б (в, г), В (д, е) и Г (ж, з) керамики систем № 1 (а, в, д, ж) и № 2 (б, г, е, з) до (1) и после нагрева (2)

изменяются от 418 до 947 МПа при $\sigma_{ср} = 614,2$ МПа, а после нагрева — от 290 до 980 МПа при $\sigma_{ср} = 626,4$ МПа (см. рис. 4, ж); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 405 до 924 МПа при $\sigma_{ср} = 593,3$ МПа, а после нагрева — от 356 до 777 МПа при $\sigma_{ср} = 594,8$ МПа (см. рис. 4, з).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов численных экспериментов показал, что керамика на основе оксида алюминия систем № 1 ($Al_2O_3-MgO-Al_2O_3-ЭП741Н-П$) и № 2 ($TiC-MgO-Al_2O_3-ЭП741Н-П$) выходит на стационарный тепловой режим за время $\tau = 0,04$ с. Установлено, что высокие темпера-

туры, формирующиеся в поверхностном слое Al_2O_3 -керамики, приводят к образованию высоких температурных градиентов. Характер изменения σ_i в поверхностях А и Б керамики систем № 1 и 2 до нагрева имеет практически одинаковый вид, а после нагрева форма кривых существенно различается. Характер изменения σ_i в поверхностях В и Г керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева имеет практически одинаковый вид.

Для обоснованного выбора марки керамики для изготовления монокристаллических

фрез необходимо провести аналогичное исследование температур и неоднородности напряжений, формирующейся на границах основных структурных элементов Si_3N_4 -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. Кузин, В. В. Проектирование концевых керамических фрез для инновационных технологических процессов с учетом их напряженно-деформированного состояния. Выбор керамики. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2018. — № 10. — С. 68–73.

2. Верещака, А. С. Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью термоиндикаторных веществ / А. С. Верещака, В. М. Провоторов, В. В. Кузин [и др.] // Вестник машиностроения. — 1986. — № 1. — С. 45–49.

3. 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.

4. 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. Grigoriev, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.

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

6. Григорьев, С. Н. Автоматизированная система термочувствительных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченко, 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.

7. 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.

8. Григорьев, С. Н. Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of thermal loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477. ■

Получено 28.03.19

© В. В. Кузин,

С. Н. Григорьев, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**ALUMINIUM
TWO THOUSAND**

11-й МИРОВОЙ КОНГРЕСС «АЛЮМИНИЙ ДВЕ ТЫСЯЧИ»
9–13 апреля 2019 г.
г. Тревизо, Италия

www.aluminium2000.com