

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

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

УДК 666.3:546'28'171]:621.914.22

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНЦЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФРЕЗ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ. ВЫБОР КЕРАМИКИ. Часть 3*

Изучена неоднородность напряжений на границах основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики в условиях нестационарной термоупругости. Приведены созданные рекомендации по выбору рациональной керамики для изготовления концевых керамических фрез, предназначенных для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: концевая керамическая фреза, Si_3N_4 -керамика, нестационарная термоупругость, неоднородность напряжений, тепловое состояние.

ВВЕДЕНИЕ

В части 1 статьи [1] показана необходимость исследования теплового состояния и выявления неоднородности напряжений в поверхностном слое керамического лезвия фрез из Al_2O_3 - и Si_3N_4 -керамики в условиях действия циклической тепловой нагрузки. В части 2 статьи [2] эти исследования выполнены для лезвия фрезы из Al_2O_3 -керамики при нагреве. В настоящей работе поставлена цель — изучить тепловое состояние и неоднородность напряжений на границах основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики при нагреве и, используя эти результаты в совокупности с результатами работы [5], обосновать выбор рациональной керамики для изготовления концевых керамических фрез [2–4].

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В численных экспериментах использовали методику и расчетную схему, приведенную в статье [2]. Исследовали структурную неоднородность напряжений в керамике двух систем: система № 1 — Si_3N_4 - Y_2O_3 - Si_3N_4 -ЭП741Н-П (зерно и матрица выполнены из Si_3N_4 , межзеренная фаза — из

Y_2O_3 , слой на поверхности керамики — из сплава ЭП741Н-П), система № 2 — TiC - Y_2O_3 - Si_3N_4 -ЭП741Н-П (зерно — из TiC , межзеренная фаза — из Y_2O_3 , матрица — из Si_3N_4 , слой на поверхности керамики — из сплава ЭП741Н-П). Ссылки на справочники и монографии, из которых позаимствованы свойства этих материалов, приведены в публикации [3]. Керамическое лезвие нагружали сосредоточенной силой $F = 0,02 \text{ Н}$, $\beta = 45^\circ$, распределенной силовой нагрузкой $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и тепловым потоком $Q = 9 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$. При этом с поверхностей керамической пластины, свободных от теплового потока, осуществляли теплоотвод в окружающую среду с коэффициентом $h = 10^5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$. Расчеты выполняли в автоматизированной системе термopрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [4]. Для количественной оценки температур T и интенсивности напряжений σ_i использовали выделенные контрольные точки (КТ) [5], имевшие такое же расположение в поверхностях основных структурных элементов керамики, как в статье [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что кривые, определяющие влияние времени нагрева τ на температуру T в КТ керамики систем № 1 и 2, имеют простую форму и состоят из двух характеристических участков. На первом характеристическом участке (этап нестационарной термоупругости) происходит резкое повышение температуры во всех КТ до T_1 за $\tau = 0,04 \text{ с}$, на втором (этап стационарной термоупругости) температура стабилизируется на уровне T_1 и далее не изменяется. При охлаждении керамического лезвия происходит обрат-

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 10 за 2018 г., часть 2 — в № 4 за 2019 г.



В. В. Кузин

E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

ный процесс. Установлено, что значения T_1 для всех КТ керамики системы № 1 выше, чем системы № 2. Например, значение T_1 в КТ1 керамики системы № 1 составляет 1195 °С, а керамики системы № 2 — 917 °С.

Характер изменения T в поверхностях А и Г керамики систем № 1 и 2 при ее выходе на стационарный режим показан на рис. 1. В заштрихованной области расположены кривые, определяющие характер изменения T в поверхностях Б и В. Сопоставление температур в поверхностном слое керамики систем № 1 и 2 выявило их значительную разницу. В керамике системы № 1 разница между наибольшими и наименьшими значениями температур в поверхностях А, Б, В и Г составляет 630, 649, 670 и 688 °С, в керамике системы № 2 эта разница составляет соответственно 300, 388, 471 и 555 °С.

Тепловое состояние лезвия фрезы из керамики систем № 1 и 2 во время нагрева определяет характер его упругой деформации, имеющей вид «выпучивания». Наибольшей деформации подвергается центральный участок на поверхности зерна и соответственно керамического лезвия. Следует отметить, что до нагрева действует только силовая нагрузка ($F = 0,0001$ Н, $\beta = 45^\circ$, $P = 5 \cdot 10^8$ Па), которая приводит к упругой деформации керамического лезвия в виде «вдавливания».

На рис. 2 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 вид кривых, описывающих изменение σ_i в поверхности А, до нагрева практически одинаков для керамики систем № 1 и 2 (см. рис. 2, а, б). Однако нагрев (принципиально не изменяя вид этих кривых) уменьшает значения σ_i для керамики системы № 1 и увеличивает значения σ_i для керамики системы № 2 по сравнению с исходными значениями до нагрева: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 468 до 876 МПа при $\sigma_{cp} = 649,6$ МПа, а после нагрева — от 370 до 892 МПа при $\sigma_{cp} = 598,6$ МПа (рис. 2, а); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 504 до 922

МПа при $\sigma_{cp} = 687,8$ МПа, а после нагрева — от 573 до 910 МПа при $\sigma_{cp} = 707,2$ МПа (см. рис. 2, б).

Форма кривых, определяющих характер изменения σ_i в поверхности Б керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева, существенно различается (см. рис. 2, в, г). При этом средние значения σ_i для керамики системы № 1 до и после нагрева выше, чем у керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 450 до 821 МПа при $\sigma_{cp} = 591,8$ МПа, а после нагрева — от 503 до 703 МПа при $\sigma_{cp} = 595,9$ МПа (см. рис. 2, в); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 411 до 693 МПа при $\sigma_{cp} = 539,6$ МПа, а после нагрева — от 364 до 677 МПа при $\sigma_{cp} = 520$ МПа (см. рис. 2, г).

Характер изменения σ_i в поверхности В керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева практически одинаков (см. рис. 2, д, е). Значения σ_i для керамики системы № 1 до и после нагрева несколько выше, чем у керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 405 до 815 МПа при $\sigma_{cp} = 564,6$ МПа, а после нагрева — от 403 до 794 МПа при $\sigma_{cp} = 559,3$ МПа (см. рис. 2, д); до начала нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 387 до 739 МПа при $\sigma_{cp} = 545,4$ МПа, а после нагрева — от 415 до 657 МПа при $\sigma_{cp} = 525,6$ МПа (см. рис. 2, е).

Характер изменения σ_i в поверхности Г керамики системы № 1 до и после нагрева практически одинаков, а вид этих кривых (до и после нагрева) для керамики системы № 2 существенно различается. Значения σ_i в этой поверхности керамики системы № 1 до нагрева выше и после нагрева ниже, чем у керамики системы № 2: до нагрева керамики системы № 1 они изменяются от 415 до 946 МПа при $\sigma_{cp} = 612,8$ МПа, а после нагрева — от 349 до 959 МПа при $\sigma_{cp} = 566,7$ МПа (см. рис. 2, ж); до нагрева керамики системы № 2 они изменяются от 389 до 904 МПа при $\sigma_{cp} = 574,5$ МПа, а после нагрева — от 389 до 874 МПа при $\sigma_{cp} = 637,1$ МПа (см. рис. 2, з).

Анализ результатов численных экспериментов показал, что керамика на основе оксида алюминия систем № 1 ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$) и № 2 ($\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$) выходит на стационар-

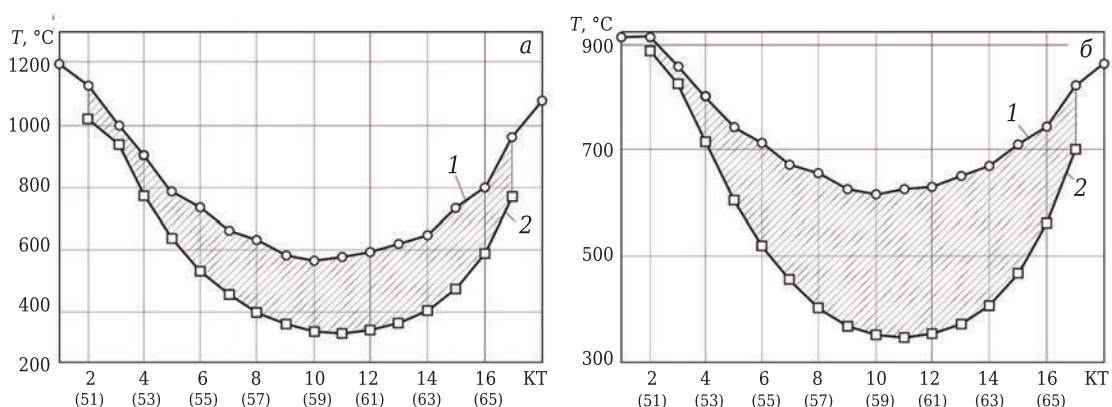


Рис. 1. Характер изменения T в поверхностях А (1) и Г (2) керамики систем № 1 (а) и № 2 (б) после нагрева

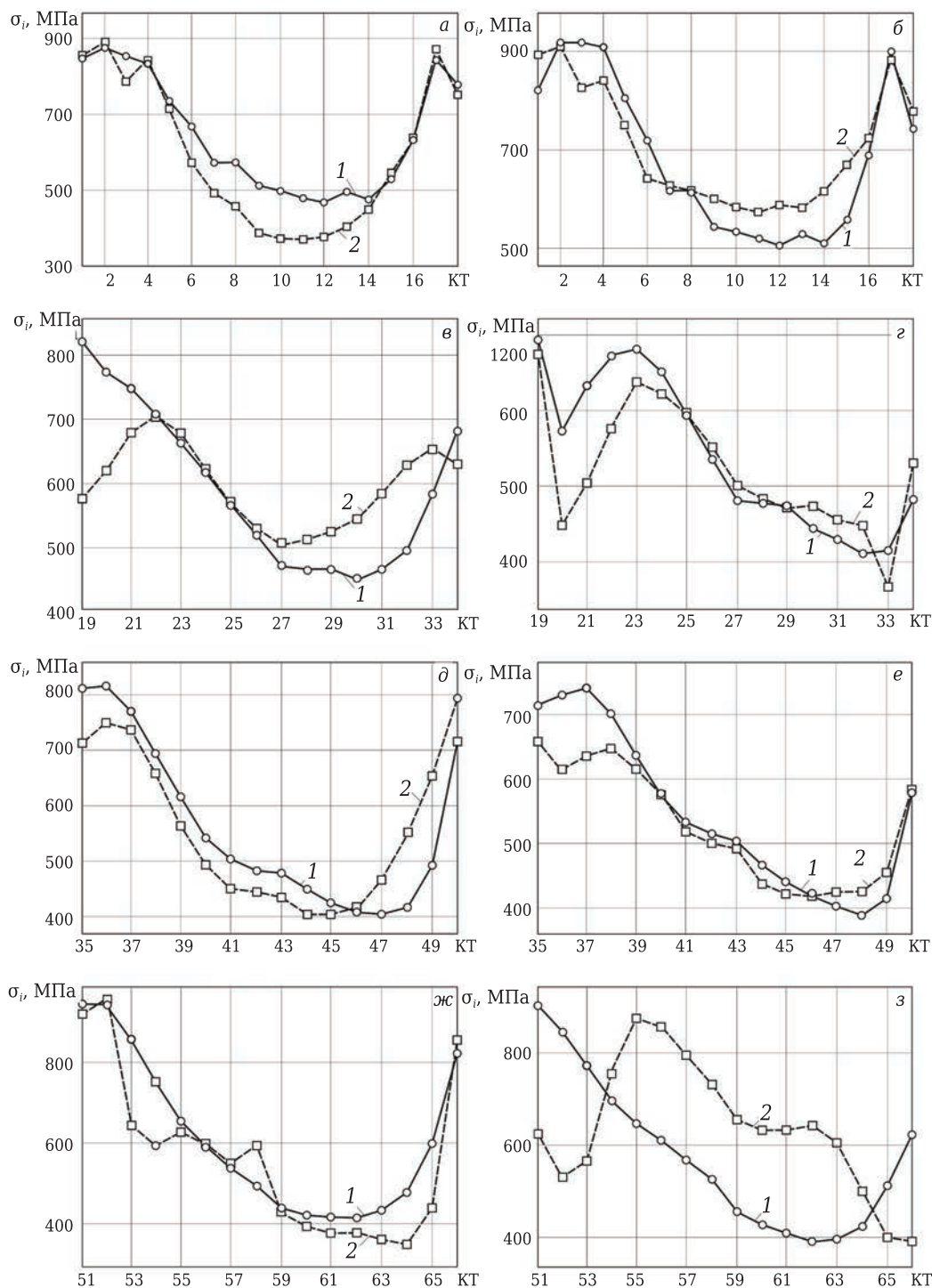


Рис. 2. Характер изменения σ_t в поверхностях А (а, б), Б (в, г), В (д, е) и Г (ж, з) керамики систем № 1 (а, в, д, ж) и № 2 (б, г, е, з) до (1) и после нагрева (2)

ный тепловой режим за время $\tau = 0,04$ с. Установлено, что высокие температуры формируются в поверхностном слое керамики системы № 1.

Характер изменения σ_t в поверхностях А, Б и В керамики систем № 1 и 2 до и после нагрева практически одинаков. В поверхности Г керамики системы № 1 до и после нагрева характер изменения σ_t также практически одинаков, однако в поверхности Г керамики системы № 2

характер изменения σ_t до и после нагрева существенно различается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные рекомендации по выбору рациональной керамики для изготовления концевых керамических фрез, предназначенных для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов,

основаны на результатах сравнения температур и неоднородности напряжений в поверхностях А, Б, В и Г керамики четырех систем ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$, $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ [2], $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ и $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$) в условиях нестационарной термоупругости.

Спозиций теплового состояния Si_3N_4 -керамика является более подходящим материалом для изготовления монолитных керамических фрез, чем Al_2O_3 -керамика. Прежде всего, это связано с тем, что наибольшая температура при выходе на стационарный тепловой режим в керамике системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ на 20 % ниже, чем в керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$. Разница между наибольшей и наименьшей температурой в поверхностях А, Б, В и Г керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ на 42, 31, 19 и 10 % соответственно ниже, чем в керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$. Учитывая одинаковые расстояния, на которых формируются эти температуры в поверхностях структурных элементов керамики, можно утверждать, что температурные градиенты в поверхностном слое керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ также на 10–40 % ниже, чем в керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$.

В керамике, в которой зерно выполнено из TiC, разница в температурном режиме не столь однозначная и очевидная. Наибольшие температуры при выходе на стационарный тепловой режим в керамике систем $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ и $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ практически одинаковы и составляют 716 и 735 °C соответственно. При этом разница между наибольшей и наименьшей температурой в поверхности А керамики системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ на 10 % ниже, чем в керамике системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$. Однако в поверхностях Б, В и Г эта разница в керамике системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ на 7, 23 и 27 % соответственно ниже, чем в керамике системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$.

С позиций напряженного состояния Si_3N_4 -керамика также наиболее предпочтительна для изготовления монолитных керамических фрез, чем Al_2O_3 -керамика. Этот вывод сделан на осно-

ве сравнения наибольших значений σ_i и разницы между наибольшим и наименьшим значением σ_i в поверхностях А, Б, В и Г керамики четырех систем. Установлено, что наибольшие значения σ_i и разница между наибольшим и наименьшим значением σ_i в поверхностях А, Б, В и Г до нагрева в керамике систем $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ и $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ практически одинаковы и разница не превышает 1 %. После нагрева эти показатели в керамике системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ меньше, чем в керамике $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$, на 6, 14, 31 и 11 % соответственно. При этом разница между наибольшим и наименьшим значением σ_i в поверхности А после нагрева в керамике систем $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ и $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ практически одинакова, а в поверхностях Б, В и Г керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ ниже, чем в керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$, на 85, 72 и 13 % соответственно.

При анализе керамики систем $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ и $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ выявлено, что до нагрева наибольшие значения σ_i и разница между наибольшим и наименьшим значением σ_i в поверхностях А, Б, В и Г этих систем практически одинаковы и разница не превышает 4 %. Однако после нагрева наибольшие значения σ_i в поверхностях Б и В керамики системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ меньше, чем в керамике системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$, на 73 и 62 % соответственно. В поверхностях А и Г керамики системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ после нагрева наибольшие значения σ_i меньше, чем в керамике $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$, на 12 и 7 % соответственно. При этом разница между наибольшим и наименьшим значением σ_i в поверхностях Б и В керамики системы $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$ меньше, чем в керамике $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$, на 58 и 53 % соответственно. В поверхностях А и Г керамики системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3\text{--ЭП741Н-П}$ после нагрева наибольшие значения σ_i меньше, чем в керамике $\text{TiC--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4\text{--ЭП741Н-П}$, на 31 и 9 % соответственно.

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. Кузин, В. В. Проектирование концевых керамических фрез для инновационных технологических процессов с учетом их напряженно-деформированного состояния. Выбор керамики. Часть 2 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2019. — № 4. — С. 65–69.
3. Кузин, В. В. Инструменты с керамическими режущими пластинами / В. В. Кузин. — М.: Янус-К, 2006. — 160 с.

4. 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.

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

5. 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. ■

Получено 14.05.19

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, 2019 г.