

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**,
к. ф.-м. н. **Ю. А. Мельник**

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

УДК 621.924.93:666.3

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Si_3N_4 -КЕРАМИКИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕПЛООБМЕНЕ

Выявлены закономерности влияния рельефа поверхности и тепловой нагрузки на температуру и интенсивность напряжений основных структурных компонентов нитридной керамики, расположенных в ее поверхностном слое. Предложено использовать эти закономерности для формирования конструкторско-технологической базы данных проектирования и изготовления керамических деталей и инструментов.

Ключевые слова: нитридная керамика, развитый рельеф, сглаженный рельеф, тепловой поток, интенсивность напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее полно потенциал керамических деталей и инструментов раскрывается при высокотемпературной эксплуатации, имеющей ключевое значение для инновационного развития многих отраслей промышленности [1–4]. Повышение температурного режима работы установок и их отдельных узлов, а также режущих и деформирующих инструментов гарантирует получение существенного технико-экономического эффекта [5–8]. Однако в ряде случаев результаты эксплуатации этих деталей и инструментов не соответствуют проектным параметрам из-за тесной взаимосвязи состояния их рабочих поверхностей с показателями работоспособности [9–12]. Важной составляющей этой взаимосвязи является влияние рельефа и шероховатости поверхности на напряженно-деформированное (НД) состояние основных структурных компонентов керамики, находящихся в поверхностном слое изделий [13–16]. Это подтверждается результатами комплексного исследования влияния рельефа поверхности оксидной керамики на НД состояние, с использованием которых теоретически обоснована необходимость учета рельефа рабочих поверхностей керамических деталей и инструментов на этапе их проектирования [17–20].

Однако для изделий из Si_3N_4 -керамики влияние морфологии поверхности на распределение температуры и напряжений под действием разной нагрузки изучено не столь детально [21]. Поэтому исследование влияния морфологии поверхности на НД состояние поверхностного слоя Si_3N_4 -керамики является актуальной научной задачей. В работе поставлена задача выявить основные закономерности влияния рельефа поверхности на НД состояние основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики, расположенных в поверхностном слое детали, в условиях установившегося теплообмена для формирования конструкторско-технологической базы данных, используемой при их проектировании и изготовлении.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для анализа и сравнения теплового и НД состояния основных структурных компонентов Si_3N_4 -керамики с разным рельефом поверхности использовали методологический подход, сформулированный в [22–24]. На основе анализа результатов исследования морфологии поверхности [25] и состояния кромок [26] образцов Si_3N_4 -керамики после шлифования построены две расчетные схемы, описывающие поверхность керамики с развитым (рис. 1, а) и сглаженным (рис. 1, б) рельефом. Эти расчетные схемы базируются на симметричном фрагменте неоднородного материала, включающем зерно (З) из нитрида кремния эллипсоидной формы (полуоси $a \times b = 2 \times 3$ мкм), межзеренную фазу (МФ) из оксида иттрия (толщина $h = 0,2$ мкм) и матрицу (М) из нитрида кремния (система $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$). Свойства этих струк-



В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

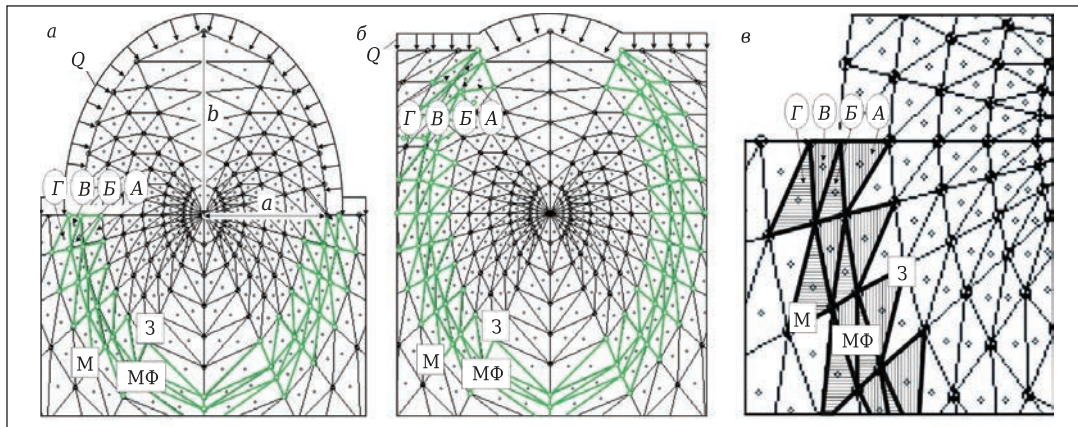


Рис. 1. Расчетные схемы керамики с развитым (а), сглаженным (б) рельефом и детализация поверхностей основных структурных элементов (в)

турных элементов керамики, использованные в расчетах, приведены в [27]. В первой расчетной схеме зерно выступает над поверхностью керамики на 50 %, а во второй — полностью заделано в поверхностный слой. К свободным поверхностям З, МФ и М в этих расчетных схемах прикладывали тепловой поток $Q = 1,2\text{--}2,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ на длине $l = 40 \text{ мкм}$. Отвод тепла с поверхности осуществляли во внутренний объем керамики с коэффициентом $h_a = 6 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2\text{·град)}$.

Расчет температур T и интенсивности напряжений σ_i выполняли в автоматизированной системе термпрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [28]. Для анализа T и σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [29]. Выделенные КТ располагались в поверхностях зерна (поверхность А), примыкающей к зерну межзеренной фазы (поверхность Б), примыкающей к матрице межзеренной фазы (поверхность В) и матрицы (поверхность Г). В качестве примера на рис. 1, в показано расположение КТ в этих поверхностях расчетной схемы, описывающей поверхность керамики с развитым рельефом. Число выделенных КТ в двух расчетных схемах отличалось: в первой расчетной схеме использовали 48 КТ, а во второй — 88 КТ. Распределение этих КТ в разных поверхностях приведено в табл. 1.

По результатам расчетов определяли следующие характеристики НД состояния: среднее $\sigma_{\text{ср}}$, наибольшее $\sigma_{\text{макс}}$, наименьшее $\sigma_{\text{мин}}$ значения σ_i , а также диапазон изменения Σ и стандартное отклонение s для σ_i в каждой поверхности. С использованием этих характеристик оценивали влияние рельефа поверхности на напряженно-деформированное состояние основных структурных

компонентов Si_3N_4 -керамики при установившемся теплообмене.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что рельеф поверхности Si_3N_4 -керамики оказывает существенное влияние на тепловое состояние основных структурных элементов, причем меньшие температуры формируются в поверхности керамики со сглаженным рельефом. Например, под действием теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ в поверхностях А, Б, В и Г в условиях установившегося теплообмена формируются максимальные температуры $T_{\text{макс}}^A = 711$ и $389 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{макс}}^B = 630$ и $391 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{макс}}^C = 615$ и $420 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{макс}}^G = 525$ и $407 \text{ }^\circ\text{C}$ керамики с развитым и сглаженным рельефом соответственно. Наибольшее влияние на T рельеф поверхности Si_3N_4 -керамики оказывает в зерне, а наименьшее — в матрице.

Влияние рельефа поверхности на характер изменения σ_i в поверхностях А, Б, В и Г структурных элементов керамики в условиях установившегося теплообмена при действии теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ показано на рис. 2.

Установлено, что интенсивность напряжений в поверхности А керамики с развитым рельефом изменяется в диапазоне 164 МПа — от 372 до 536 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 408 \text{ МПа}$ и $s = 58 \text{ МПа}$ (см. рис. 2, а, слева). Кривая, описывающая изменение σ_i в этой поверхности, имеет два пиковых значения в КТ2 и КТ11. У керамики со сглаженным рельефом в поверхности А σ_i изменяются в диапазоне 168 МПа — от 102 до 270 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 168 \text{ МПа}$ и $s = 50 \text{ МПа}$ (см. рис. 2, а, справа), причем кривая, описывающая изменение σ_i , имеет минимум (102 МПа) в КТ11 и КТ12.

В поверхности Б керамики с развитым рельефом σ_i изменяется в диапазоне 39 МПа — от 398 до 437 МПа при $\sigma_{\text{ср}} = 416 \text{ МПа}$ и $s = 17 \text{ МПа}$ (рис. 2, б, слева). Кривая, описывающая изменение σ_i в этой поверхности, имеет сложный характер с тремя пиками максимальных значений в КТ13, КТ18 / КТ19 и КТ24, а также с двумя пиками минималь-

Таблица 1

Поверхность	Номера КТ в поверхностях с	
	развитым рельефом	сглаженным рельефом
А	КТ1–КТ12	КТ1–КТ22
Б	КТ13–КТ24	КТ23–КТ44
В	КТ25–КТ36	КТ45–КТ66
Г	КТ37–КТ48	КТ67–КТ88

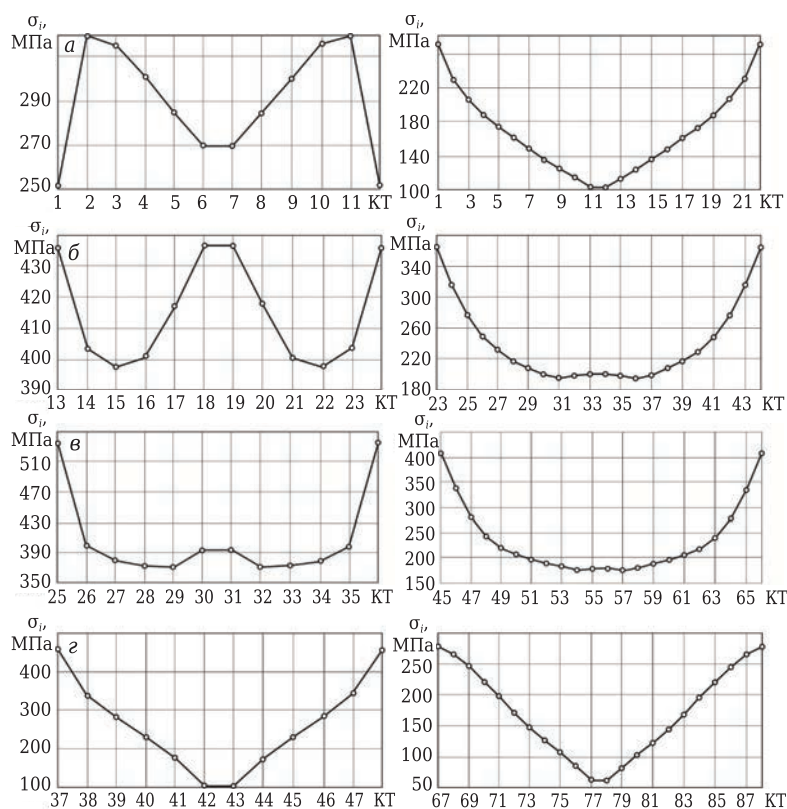


Рис. 2. Характер изменения σ_i в поверхности А (а), Б (б), В (в), Г (г) керамики с развитым (слева) и сглаженным (справа) рельефом в условиях установившегося теплообмена при действии теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^9$ Вт/м²

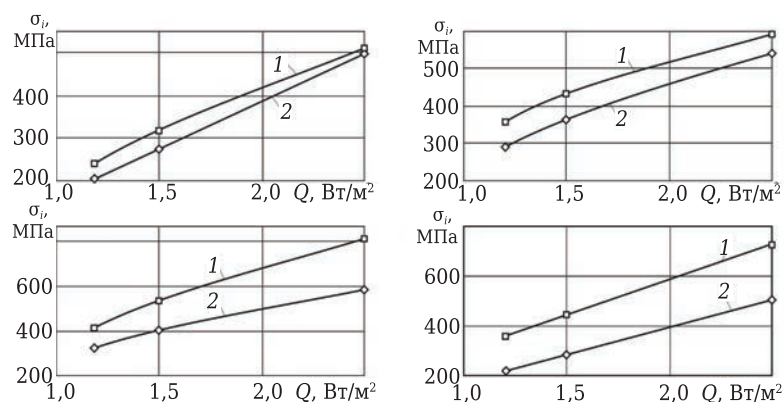


Рис. 3. Влияние Q на σ_i в поверхностях А (а), Б (б), В (в) и Г (г) керамики с развитым (1) и сглаженным (2) рельефом в условиях установившегося теплообмена

ных значений в КТ15 и КТ22. У керамики со сглаженным рельефом σ_i изменяется в поверхности Б в диапазоне 169 МПа — от 195 до 364 МПа при $\sigma_{ср} = 241$ МПа и $s = 54$ МПа (см. рис. 2, б, справа).

Таблица 2

Поверхность	Развитый рельеф	Сглаженный рельеф
А	КТ2	КТ1
Б	КТ18	КТ23
В	КТ25	КТ45
Г	КТ37	КТ67

ва). На этой кривой имеются три характерных участка: на участке от КТ23 до КТ31 σ_i уменьшаются с 364 до 195 МПа, на участке от КТ31 до КТ36 σ_i практически не изменяются, а на участке от КТ36 до КТ44 σ_i увеличиваются до 364 МПа.

В поверхности В керамики с развитым рельефом σ_i изменяется в диапазоне 164 МПа — от 372 до 536 МПа при $\sigma_{ср} = 408$ МПа и $s = 58$ МПа (см. рис. 2, в, слева). На кривой, описывающей изменение σ_i в этой поверхности, имеются три характерных участка: от КТ25 до КТ26 σ_i уменьшаются с 536 до 399 МПа, от КТ26 до КТ35 σ_i изменяются в узком диапазоне и на участке от КТ35 до КТ36 увеличиваются до 526 МПа. В поверхности В керамики со сглаженным рельефом σ_i изменяются в диапазоне 233 МПа — от 172 до 405 МПа при $\sigma_{ср} = 234$ МПа и $s = 73$ МПа (рис. 2, в, справа). Кривая, описывающая изменение σ_i , имеет очень простой параболический вид.

В поверхности Г керамики с развитым рельефом σ_i изменяется в диапазоне 350 МПа — от 104 до 454 МПа при $\sigma_{ср} = 264$ МПа и $s = 118$ МПа (рис. 2, г, слева). В этой же поверхности керамики со сглаженным рельефом σ_i изменяется в диапазоне 216 МПа — от 61 до 277 МПа при $\sigma_{ср} = 171$ МПа и $s = 73$ МПа (рис. 2, г, справа). Кривые, описывающие изменение σ_i в этой поверхности обеих керамик, имеют сходный вид — первоначально σ_i уменьшаются, а затем увеличиваются.

Результаты численных экспериментов, определяющих влияние теплового потока на НДС состояние основных структурных элементов керамики с разным рельефом, показаны на рис. 3. Для получения этих зависимостей использовали по одной КТ в поверхностях А, Б,

В и Г (табл. 2), в которых были зафиксированы максимальные значения σ_i под действием теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^9$ Вт/м².

Установлено, что при увеличении Q с $1,2 \cdot 10^9$ до $2,5 \cdot 10^9$ Вт/м² значения σ_i в поверхностях А, Б, В и Г увеличиваются, причем степень этого влияния в этих поверхностях керамики с развитым и сглаженным рельефом существенно отличается. Увеличение σ_i в поверхности А (см. рис. 3, а) керамики с развитым и сглаженным рельефом составляет 2,1 и 2,4 раза соответственно; в по-

верхности *Б* (см. рис. 3, б) керамики с развитым и сглаженным рельефом 1,7 и 1,9 раза соответственно; в поверхности *В* (см. рис. 3, в) керамики с развитым и сглаженным рельефом 1,9 и 1,8 раза соответственно; в поверхности *Г* (см. рис. 3, г) керамики с развитым и сглаженным рельефом 2,1 и 2,4 раза соответственно. Эти данные свидетельствуют о неоднозначном влиянии рельефа поверхности на НД состояние основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики при изменении теплового потока.

Результаты сравнительного анализа НД состояния основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики с разным рельефом поверхности в условиях установившегося теплообмена при действии теплового потока $Q = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$ показаны на рис. 4. В поверхностях *А*, *Б*, *В* и *Г* структурных элементов наименьшие значения $\sigma_{\text{ср}}$, $\sigma_{\text{мин}}$ и $\sigma_{\text{макс}}$ имеет керамика со сглаженным рельефом, причем разница изменяется в диапазоне от 1,2 до 2,5 раза. В отношении значений Σ и s однозначной зависимости не выявлено. Наименьшие значения Σ в поверхности *А*, *Б* и *В* зафиксированы у керамики с развитым рельефом, а в поверхности *Г* — у керамики со сглаженным рельефом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены основные закономерности влияния рельефа поверхности на НД состояние основных структурных элементов Si_3N_4 -керамики, расположенных в поверхностном слое детали и инструмента, в условиях установившегося теплообмена. Установлено, что под действием теплового потока меньшие температуры образуются в поверхностном слое керамики со сглаженным рельефом. Наиболее существенное влияние рельеф поверхности оказывает на температуры в зерне, при-

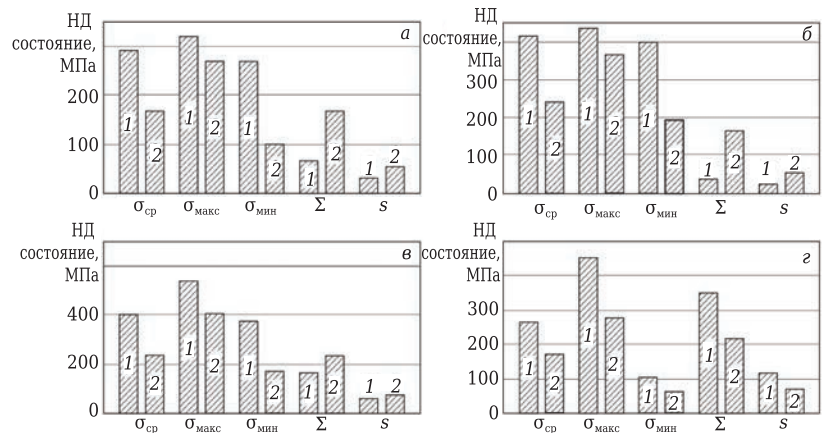


Рис. 4. НД состояние поверхностей *А* (а), *Б* (б), *В* (в) и *Г* (г) основных структурных элементов керамики с развитым (1) и сглаженным (2) рельефом в условиях установившегося теплообмена при $Q = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$

чем разница $T_{\text{макс}}$ в этом структурном элементе нитридной керамики со сглаженным и развитым рельефом составляет 1,8 раза. В поверхностях *А*, *Б*, *В* и *Г* структурных элементов Si_3N_4 -керамики меньшие значения $\sigma_{\text{ср}}$, $\sigma_{\text{мин}}$ и $\sigma_{\text{макс}}$ имеет керамика со сглаженным рельефом, причем в поверхности *А* эта разница составляет 1,7, 2,5 и 1,2 раза соответственно, в поверхности *Б* — 1,7, 2 и 1,2; в поверхности *В* — 1,7, 2,2 и 2,2 и в поверхности *Г* — 1,5, 1,7 и 1,6 раза соответственно. Для Σ и s однозначного преимущества одного из рельефов не выявлено. Выявленные закономерности использованы для формирования конструкторско-технологической базы данных, ориентированной на проектирование и изготовление керамических деталей и инструментов, что обеспечило расширение функциональных возможностей системы, описанной в [30].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 9.7453.2017/6.7.

Библиографический список

1. Эванс, А. Г. Конструкционная керамика ; пер. с англ. / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдон. — М. : Металлургия, 1980. — 256 с.
2. Гаршин, А. П. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев [и др.]. — М. : Научтехлитиздат, 2003. — 384 с.
3. Кузин, В. В. Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46–50.
4. 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.
4. Матренин, С. В. Техническая керамика : учебное пособие / С. В. Матренин, А. И. Слосман. — Томск : Изд-во ТПУ, 2004. — 75 с.

5. Fahrenholtz, W. G. Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environments / W. G. Fahrenholtz, G. E. Hilmas // Scripta Mater. — 2017. — Vol. 129. — P. 94–99.
6. Wang, R. Characterization models for thermal shock resistance and fracture strength of ultra-high temperature ceramics at hightemperatures / R. Wang, W. Li // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. — 2017. — Vol. 90. — P. 1–13.
7. Savino, R. Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications / R. Savino, L. Criscuolo, G. D. D. Martino [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. — 2018. — Vol. 38. — P. 2937–2953.
8. Jiménez, C. Joining of ceramic matrix composites to high temperature ceramics for thermal protection systems / C. Jiménez, K. Mergia, M. Lagos [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. — 2016. — Vol. 36. — P. 443–449.

9. **Moshtaghioun, B. M.** High-temperature deformation of fully-dense fine-grained boron carbide ceramics: Experimental facts and modeling / *B. M. Moshtaghioun, D. G. García, A. D. Rodríguez* // *Materials & Design*. — 2015. — Vol. 88. — P. 287–293.
10. **Li, Dingyu.** Thermal shock resistance of ultra-high temperature ceramics including the effects of thermal environment and external constraints / *Dingyu Li, Weiguo Li, Wenbo Zhang* [et al.] // *Materials & Design*. — 2012. — Vol. 37. — P. 211–214.
11. **Boniecki, M.** Fracture toughness, strength and creep of transparent ceramics at high temperature / *M. Boniecki, Z. Librant, A. Wajler* [et al.] // *Ceram. Int.* — 2012. — Vol. 38. — P. 4517–4524.
12. **Monteverde, F.** Processing and properties of ultra-high temperature ceramics for space applications / *F. Monteverde, A. Bellosi, L. Scatteia* // *Mater. Sci. Eng.* — 2008. — Vol. 485. — P. 415–421.
13. **Кузин, В. В.** Контактные процессы при резании керамическими инструментами / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров* // *Вестник МГТУ «Станкин»*. — 2010. — № 4. — С. 85–94.
14. **Панин, В. Е.** Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле / *В. Е. Панин, А. В. Панин* // *Физическая мезомеханика*. — 2018. — Т. 8, № 5. — С. 87–95.
15. **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.
16. **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.
17. **Кузин, В. В.** Влияние теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности оксидной керамики с развитым рельефом / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Р. Портной* // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 6. — С. 66–68.
- Kuzin, V. V.** The influence of heat flow on the nonuniformity of the stresses in the surface of oxide ceramic with fully developed relief / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. R. Portnoi* // *Refract. Indust. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 3. — P. 314–317.
18. **Портной, М. Р.** Влияние асимметричного теплового потока на неоднородность напряжений в поверхности элементов структуры оксидной керамики при глухой заделке сферического зерна / *М. Р. Портной, В. В. Кузин* // *Вестник МГТУ «Станкин»*. — 2016. — № 2. — С. 21–26.
19. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхности элементов структуры оксидной керамики под действием симметричного теплового потока при глухой заделке сферического зерна / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, М. Ю. Федоров* // *Вестник МГТУ «Станкин»*. — 2015. — № 1 (32). — С. 27–33.
20. **Кузин, В. В.** Влияние эксплуатационных нагрузок на локальные напряжения в волокне из оксида циркония / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // *Вестник машиностроения*. — 2014. — № 4. — С. 79–83.
21. **Kuzin, V.** Modelling of influence of intensive heat flow on stress inhomogeneity in ceramic system $\text{TiC-Y}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$ / *V. Kuzin, M. Fedorov, P. Dašić, M. Portnoy* // *Applied Mechanics and Materials*. — 2015. — Vol. 806. — P. 99–103.
22. **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.
23. **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.
24. **Кузин, В. В.** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / *В. В. Кузин* // *Вестник машиностроения*. — 2006. — № 9. — С. 87, 88.
25. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Si_3N_4 -керамики / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, С. Н. Григорьев* // *Новые огнеупоры*. — 2017. — № 1. — С. 67–70.
- Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Si_3N_4 -ceramic surface quality / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev* // *Refract. Indust. Ceram.* — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 78–81.
26. **Кузин, В. В.** Проектирование технологических процессов изготовления деталей из Si_3N_4 -керамики с учетом требуемой дефектности кромок / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, С. Н. Григорьев* // *Новые огнеупоры*. — 2017. — № 9. — С. 65–68.
- Kuzin, V. V.** Production process planning for preparing Si_3N_4 -ceramic objects taking account of edge defectiveness / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev* // *Refract. Indust. Ceram.* — 2018. — Vol. 58, № 4. — P. 562–565.
27. **Кузин, В. В.** Инструменты с керамическими режущими пластинами / *В. В. Кузин*. — М. : Янус-К, 2006. — 160 с.
28. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термостойкости 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.
29. **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.
30. **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. ■

Получено 13.05.18

© В. В. Кузин, М. Ю. Федоров,
Ю. А. Мельник, 2018 г.