

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**,
к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 621.924.93:666.3

НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ Si_3N_4 -КЕРАМИКИ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗНЫХ ФАЗ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Выявлено влияние силовых и тепловых воздействий, характерных для струйно-абразивной обработки, на распределение напряжений в разных фазах поверхностного слоя Si_3N_4 -керамики. На основе установленных закономерностей предложен подход к выбору режимов этой обработки при предварительных и финишных проходах.

Ключевые слова: Si_3N_4 -керамика, струйно-абразивная обработка, поверхностный слой, напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Струйно-абразивная обработка (САО) — современный метод высокопроизводительного формообразования керамических деталей, который обладает широким технологическим потенциалом, в том числе возможностью управлять состоянием их поверхностного слоя [1–6]. При этом микрорельеф поверхности керамики формируется за счет многочисленных ударных воздействий свободных абразивных зерен, перемещающихся со сверхвысокой скоростью в направлении к заготовке [7]. Под действием этих скоротечных высокоэнергетических контактов припуск с заготовок снимается путем непрерывного локального разрушения поверхностного слоя [8, 9]. Изменение основных параметров режима САО (давление абразивной струи, расстояние от торца фокусирующего сопла до поверхности заготовки, расход абразива, скорость продольного перемещения абразивной головки) позволяет изменять микрорельеф обработанной поверхности [10], а также формировать морфологический рисунок поверхности от сильно разбитого со следами вырыва зерен до сглаженного и практически бездефектного [11].

Вид микрорельефа определяется характером разрушения поверхностного слоя керамики в результате воздействия единичным абразивным зерном; при этом действуют как транскристаллитный, так и межкристаллит-

ный механизмы [10]. При транскристаллитном разрушении формируется сглаженный микрорельеф за счет скалывания фрагментов единичных зерен, а при межкристаллитном — развитый микрорельеф при разрушении локальных объемов поверхности керамики. Правильно выбрать режим САО для предварительных проходов, при которых важно обеспечить снятие наибольшего припуска, и финишных проходов, цель выполнения которых — создание бездефектного поверхностного слоя, возможно с учетом основных закономерностей разрушения керамики под действием высокоэнергетических абразивных зерен [12–14]. Реализовать этот подход можно с использованием методов механики деформируемого твердого тела и исследованием напряженно-деформируемого состояния поверхностного слоя керамической заготовки при САО [15–18]. Поэтому исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя разных керамических материалов при САО, определяющего характер его разрушения, является актуальной научной задачей.

Напряжения в разных фазах поверхностного слоя керамики на основе оксида алюминия при САО изучено ранее [19–21]. В отношении нитридной керамики аналогичные исследования не выполнялись. Цель работы — исследование методом численного моделирования влияния силовых и тепловых воздействий, характерных для САО, на распределение напряжений в разных фазах поверхностного слоя Si_3N_4 -керамики и формирование подхода к выбору режимов этого процесса при предварительных и финишных проходах.



В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе использовали метод математического моделирования, хорошо зарекомендовавший себя в решении разноплановых задач, в том числе исследовании неоднородности напряженного состояния в объемах и поверхностях структурных элементов керамики [22, 23]. При разработке модели напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при САО использовали подход, сформулированный в работах [24, 25]. Расчетная схема представлена в виде асимметричной конструкции, состоящей из горизонтально расположенного зерна эллипсоидной формы, имеющего размер $a = 3$ мкм и $b = 2$ мкм (рис. 1, а). Это зерно частично заделано в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 0,2$ мкм. К участку свободной поверхности зерна прикладывали сосредоточенную силу ($F = 0,005$ Н под углом $\alpha = 30^\circ$), тепловой поток ($Q = 1,2 \cdot 10^9$ Вт/м²), а также комбинированную нагрузку ($F = 0,005$ Н ($\alpha = 30^\circ$) + $Q = 1,2 \cdot 10^9$ Вт/м²). Отвод тепла с поверхностей осуществляли во внутренний объем керамики с коэффициентом $h_a = 6 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град).

Исследовали керамику системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Si}_3\text{N}_4$, в которой зерно и матрица выполнены из нитрида кремния, а межзеренная фаза — из оксида иттрия. Свойства этих материалов приведены в статье [26]. Для анализа напряжений использовали метод контрольных точек (КТ) [27]. Выделенные КТ располагались (рис. 1, б) в объеме зерна (объем А), в поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность В), в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность В), в поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхности Г) и в поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхности Д). В объеме А зерна были выделены КТ1–КТ6, в поверхности В — КТ7–КТ23, в поверхности В — КТ24–КТ40, в поверхности Г — КТ41–КТ57 и в поверхности Д — КТ58–КТ74.

Численные эксперименты выполняли в автоматизированной системе термпрочностных расчетов RKS-ST v.1.0 [26]. Рассчитывали напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивность напряжений σ_i . С использованием результатов расчетов

определяли распределение интенсивности напряжений σ_i в объеме зерна А и поверхностях В, В, Г и Д (диапазон изменения $\Sigma\sigma_i$) и средние значения σ_{ic} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в объеме А и поверхностях В, В, Г и Д под действием сосредоточенной силы $F = 0,005$ Н, действующей под углом $\alpha = 30^\circ$, показаны на рис. 2. Видно, что в объеме А (см. рис. 2, а) значения всех напряжений уменьшаются от его поверхности к центру: σ_{11} — от -2025 до -380 МПа, σ_{22} — от -960 до -10 МПа, σ_{12} — от 680 до 170 МПа и σ_i — от 2120 до 480 МПа. В поверхности В (см. рис. 2, б) σ_{11} изменяются от -175 до 80 МПа, σ_{22} — от -1050 до 80 МПа, σ_{12} — от -35 до 220 МПа и σ_i — от 155 до 975 МПа. В поверхности В (см. рис. 2, в) σ_{11} изменяются от -165 до 65 МПа, σ_{22} — от -920 до 10 МПа, σ_{12} — от -245 до 205 МПа и σ_i — от 1010 до 115 МПа. В поверхности Г (см. рис. 2, г) σ_{11} изменяются от -210 до 90 МПа, σ_{22} — от -665 до 15 МПа, σ_{12} — от -700 до 185 МПа и σ_i — от 1265 до 120 МПа. В поверхности Д (см. рис. 2, д) напряжения σ_{11} изменяются от -165 до 40 МПа, σ_{22} — от -570 до 5 МПа, σ_{12} — от -130 до 190 МПа и σ_i — от 110 до 590 МПа.

Установлено, что под действием теплового потока $Q = 1,2 \cdot 10^9$ Вт/м² в объеме А и поверхностях В, В, Г и Д температура снижается по мере удаления от участка приложенного теплового потока (рис. 3). Например, в объеме А (см. рис. 3, а) температура равномерно снижается от 2247 до 1056 °С. В поверхности зерна (см. рис. 3, б) температура изменяется по более сложному закону — на участке КТ7–КТ16 температура снижается с 1291 до 593 °С, а на участке КТ16–КТ23 повышается с 593 до 719 °С. По аналогичному закону изменяется температура в других поверхностях (В, Г и Д); на участке КТ24–КТ34 поверхности В температура снижается с 1079 до 550 °С, а на участке КТ34–КТ40 этой поверхности повышается с 550 до 658 °С. На участке КТ41–КТ50 поверхности Г температура снижается с 963 до 524 °С, а на участке КТ51–КТ57 повышается с 524 до 646 °С. На участке КТ58–КТ68 поверхности Д температура снижается с 740 до 485 °С, а на участке КТ68–КТ74 повышается с 485 до 585 °С.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в объеме А и поверхностях В, В, Г и Д под действием теплового потока $Q = 1,2 \cdot 10^9$ Вт/м², действующего на участке зерна, показаны на рис. 4. Видно, что под действием тепловой нагрузки напряжения имеют более сложное распределение как в объеме А, так и в поверхностях В, В, Г и Д. В объеме А (см. рис. 4, а) σ_{11} из-

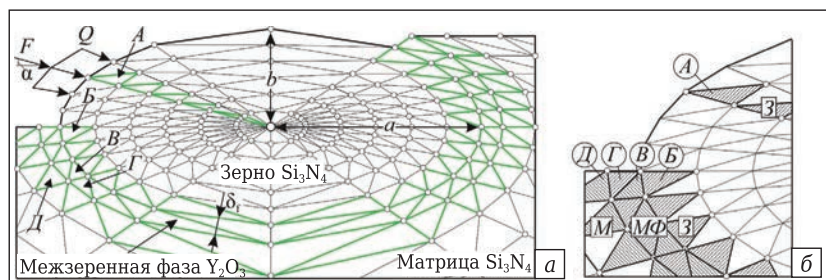


Рис. 1. Расчетная схема (а) и ее фрагмент с выделенными объемом и поверхностями (б)

меняются от -156 до -221 МПа, σ_{22} — от -320 до 92 МПа, σ_{12} — от 90 до -16 МПа и σ_i — от 213 до 315 МПа. В поверхности Б (см. рис. 4, б) σ_{11} изменяются от -216 до -399 МПа, σ_{22} — от -198 до 76 МПа, σ_{12} — от -170 до 67 МПа и σ_i — от 215 до 388 МПа. В поверхности В (см. рис. 4, в) σ_{11} изменяются от -300 до 534 МПа, σ_{22} — от -436 до 36 МПа, σ_{12} — от

-164 до 154 МПа и σ_i — от 387 до 550 МПа. В поверхности Г (см. рис. 4, г) σ_{11} изменяются от -248 до -278 МПа, σ_{22} — от -517 до 61 МПа, σ_{12} — от -168 до 151 МПа и σ_i — от 313 до 766 МПа. В поверхности Д (см. рис. 4, д) σ_{11} изменяются от -119 до -497 МПа, σ_{22} — от 156 до -29 МПа, σ_{12} — от 58 до -148 МПа и σ_i — от 132 до 629 МПа.

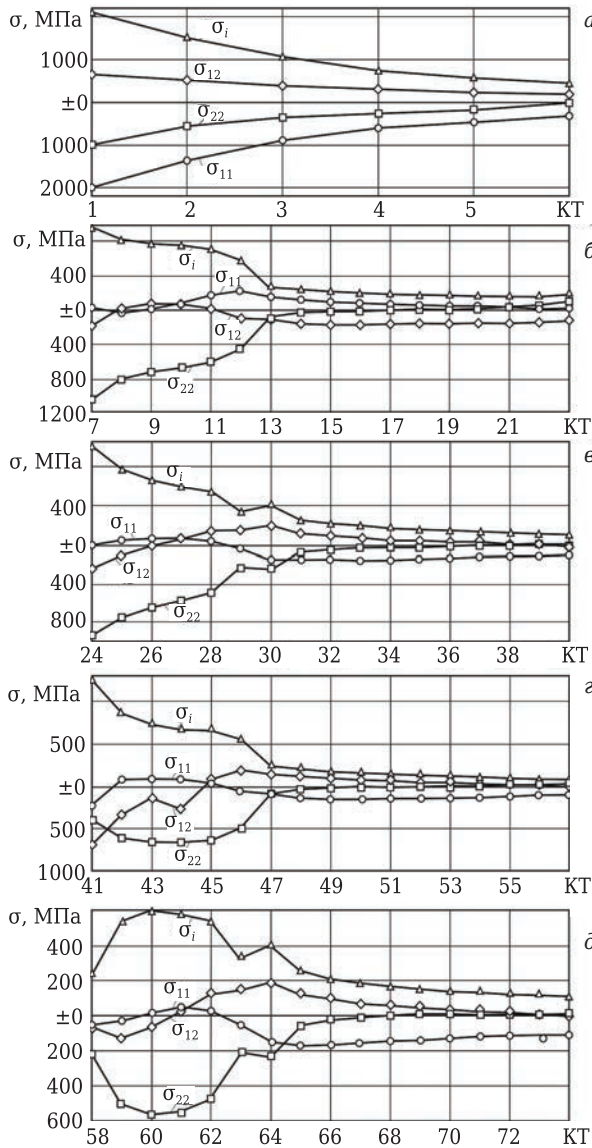


Рис. 2. Характер изменения напряжений в объеме А (а), поверхностях Б (б), В (в), Г (г) и Д (д) под действием $F = 0,005 \text{ Н}$ ($\alpha = 30^\circ$)

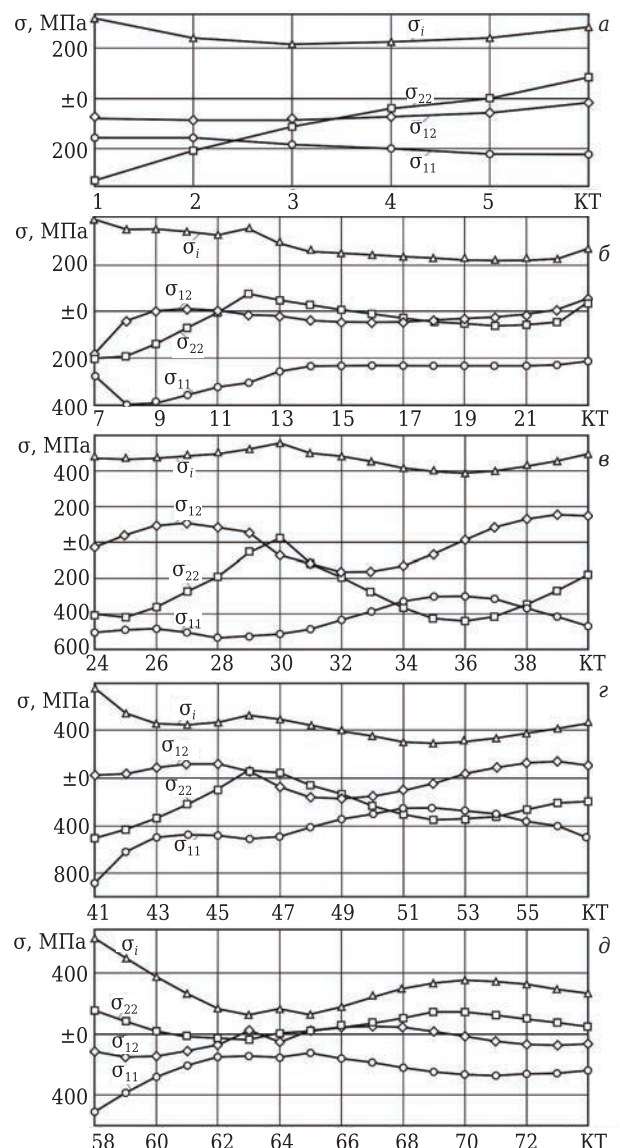


Рис. 4. Характер изменения напряжений в объеме А (а), поверхностях Б (б), В (в), Г (г) и Д (д) под действием $Q = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$

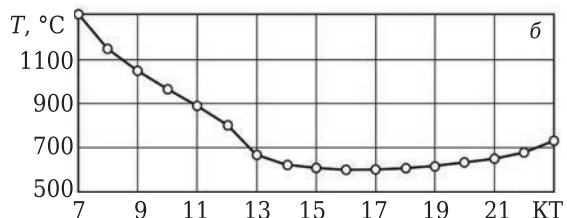
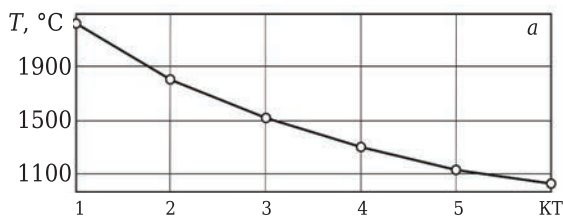


Рис. 3. Изменение температуры в объеме А (а) и поверхности Б (б) под действием $Q = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в объеме А и поверхностях Б, В, Г и Д под действием комбинированной нагрузки ($F = 0,005 \text{ Н}$ ($\alpha = 30^\circ$) + $Q = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$) показаны на рис. 5. Установлено, что под действием этой нагрузки в объеме А (см. рис 5, а) σ_{11} изменяются от -602 до -2168 МПа, σ_{22} — от -1239 до 91 МПа, σ_{12} — от 149 до 634 МПа и σ_i — от 682 до 2180 МПа. В поверхности Б (см. рис. 5, б) σ_{11} изменяются от -318 до -439 МПа, σ_{22} — от -1410 до 137 МПа, σ_{12} — от -136 до 222 МПа и σ_i — от 355 до 1272 МПа. В поверхности В (см. рис. 5, в) σ_{11} изменяются от -369

до -677 МПа, σ_{22} — от -157 до -855 МПа, σ_{12} — от -274 до 209 МПа и σ_i — от 444 до 807 МПа. В поверхности Г (см. рис. 5, г) σ_{11} изменяются от -355 до -980 МПа, σ_{22} — от -923 до -54 МПа, σ_{12} — от -509 до 242 МПа и σ_i — от 376 до 1250 МПа. В поверхности Д (см. рис. 5, д) σ_{11} изменяются от -108 до -514 МПа, σ_{22} — от 162 до -552 МПа, σ_{12} — от 163 до -268 МПа и σ_i — от 362 до 594 МПа.

Диапазон изменения $\Sigma\sigma_i$ и средние значения $\sigma_{\text{ср}}$ интенсивности напряжений в объеме А и поверхностях Б, В, Г и Д под действием разных нагрузок приведены в таблице.

Данные таблицы свидетельствуют о высокой неоднородности напряжений в поверхностном слое Si_3N_4 -керамики при САО и разном характере влияния нагрузок на напряжения в ее разных фазах. Установлено, что под действием сосредоточенной силы наибольшие значения интенсивности напряжений формируются во внутреннем объеме зерна Si_3N_4 -керамики. В поверхностях зерна, межзеренной фазы и матрицы этой керамики напряжения, сформированные действием сосредоточенной силы, меньше в 1,4–2,0 раза. Под действием теплового потока, формирующегося на поверхности Si_3N_4 -керамики температуру выше 2000 °С, в объеме А и поверхностях Б, В, Г и Д создается напряженное состояние с интенсивностью напряжений в 2–16 раз меньше, чем в случае действия сосредоточенной силы. Более того, тепловая нагрузка оказывает благоприятное влияние на напряженное состояние в объеме А и поверхностях Б, В, Г и Д за счет уменьшения σ_i до трех раз (в поверхности зерна тепловой поток уменьшает σ_i на 9 %). Однако в поверхности Б значения σ_i увеличиваются на 12 %.

Учитывая эти результаты, можно отметить, что локальный участок поверхности Si_3N_4 -керамики и разные фазы, образующие ее поверхностный слой, находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии под действием силовых, тепловых и комбинированных нагрузок. Во всех этих случаях нагружения локального участка поверхности Si_3N_4 -керамики наибольшие напряжения формируются в объеме зерна, что позволяет предположить действие транскристаллитного механизма формирования поверхностного слоя нитридной керамики при САО. Вероятность разрушения поверхностного слоя керамики по межкристаллитному механизму по границам «зерно – межзеренная фаза» или «межзеренная фаза – матрица» под действием этих нагрузок значительно меньше и возможна при наличии структурных дефектов на этой границе. Изменение соотношения этих нагрузок при переходе на другой режим САО будет определен-

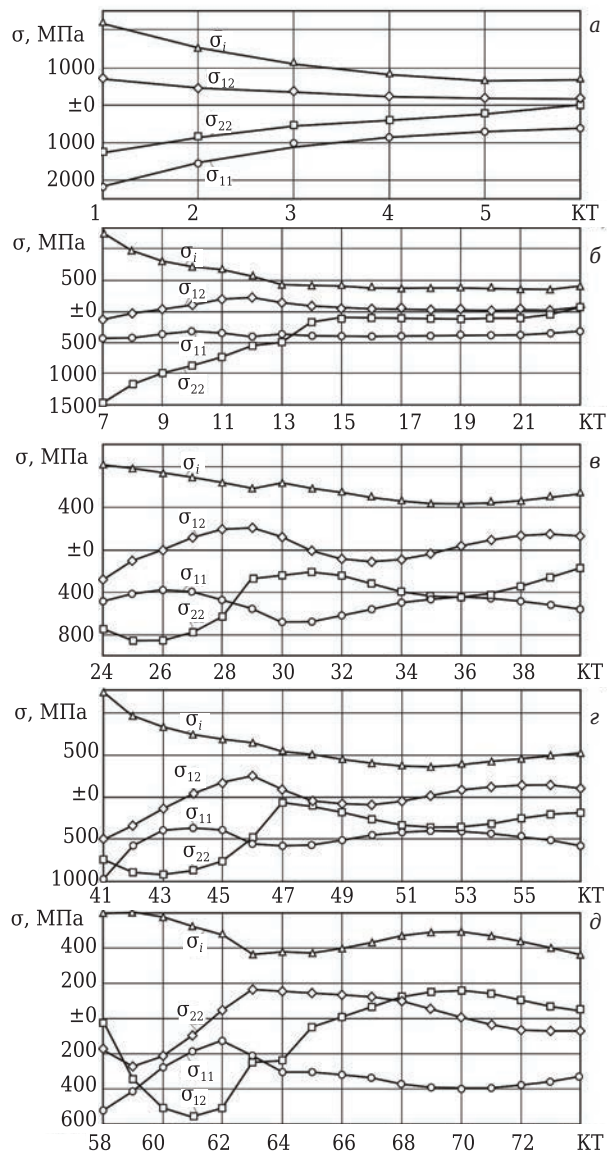


Рис. 5. Характер изменения напряжений в объеме А (а), поверхностях Б (б), В (в), Г (г) и Д (д) под действием комбинированной нагрузки ($F = 0,005 \text{ Н}$ ($\alpha = 30^\circ$) + $Q = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$)

Показатели	Объем А			Поверхность Б			Поверхность В			Поверхность Г			Поверхность Д		
	F	Q	F+Q	F	Q	F+Q	F	Q	F+Q	F	Q	F+Q	F	Q	F+Q
$\Sigma\sigma_i$	1640	102	1498	820	173	917	1125	163	363	1145	453	874	480	497	232
$\sigma_{\text{ср}}$	1095	251	1182	394	277	546	354	458	582	395	454	604	279	300	456

ным образом влиять на напряжения, формирующиеся в зерне, в разных фазах и на их границах в поверхностном слое Si_3N_4 -керамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных экспериментов выявлено заметное влияние силовых и тепловых воздействий, характерных для CAO, на распределение напряжений в разных фазах поверхностного слоя Si_3N_4 -керамики. Установлено, что под действием сосредоточенной нагрузки во всех фазах поверхностного слоя формируются наибольшие напряжения, которые несколько уменьшаются

в случае добавления теплового потока. Полученные результаты позволили предложить комплекс решений по прогнозированию наиболее вероятного механизма разрушения поверхностного слоя Si_3N_4 -керамики под действием нагрузок, генерируемых процессом CAO. На этой основе сформирован подход к выбору режимов CAO при предварительных и финишных проходах, причем контрольные эксперименты подтвердили правильность выбранного направления решения существующей проблемы и получения дополнительного экономического эффекта с улучшением производственной экологии.

Библиографический список

1. **Kowsari, K.** Erosive smoothing of abrasive slurry-jet micro-machined channels in glass, PMMA, and sintered ceramics: experiments and roughness model / K. Kowsari, J. Schwartzentruber, J. K. Spelta [et al.] // Precision Engineering. — 2017. — Vol. 49. — P. 332–343.
2. **Кузин, В. В.** Влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 9. — С. 62–67.
3. **Kuzin, V. V.** Effect of air-abrasive treatment on oxide-carbide ceramic object operating properties / V. V. Kuzin, N. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 517–521.
4. **Srikanth, D. V.** Application of taguchi & response surface methodology in optimization for machining of ceramics with abrasive jet machining / D. V. Srikanth, M. Sreenivasa Rao // Materials Today : Proceedings. — 2015. — Vol. 2. — P. 3308–3317.
5. **Кузин, В. В.** Анализ надежности керамических деталей после гидроабразивной обработки / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 63–68.
6. **Kuzin, V. V.** Analysis of the reliability of ceramic parts after hydroabrasive machining / V. V. Kuzin, N. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 631–636.
7. **Mohankumar, V.** Review on machining aspects in metal matrix and ceramic matrix composites using abrasive waterjet / V. Mohankumar [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 766/767. — P. 643–648.
8. **Wang, J.** The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics / J. Wang, D. M. Guo // Journal of Materials Processing Technology. — 2003. — Vol. 133. — P. 371–377.
9. **Choi, Gi Sang.** Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics / Gi Sang Choi, Gi Heung Choi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 1997. — Vol. 37. — P. 295–307.
10. **Zeng, Jiyue.** An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics / Jiyue Zeng, Thomas J. Kim // Wear. — 1996. — Vol. 199. — P. 275–282.
11. **Wang, J.** A new model for predicting the depth of cut in abrasive waterjet contouring of alumina ceramics / J. Wang // Journal of Materials Processing Technology. — 2009. — Vol. 209. — P. 2314–2320.
12. **Григорьев, С. Н.** Морфология поверхности высокоплотной керамики после гидроабразивной обработки / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 123–126.
13. **Grigor'ev, S. N.** Morphology of the surface of a highdensity ceramic after hydroabrasive machining / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 164–167.
14. **Григорьев, С. Н.** Модель формирования профиля реза при гидроабразивной обработке высокоплотной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 51–56.
15. **Grigor'ev, S. N.** Model of the formation of the profile of a cut in the hydroabrasive machining of a high-density ceramic / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 48–53.
16. **Srinivasu, D. S.** Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics / D. S. Srinivasu, D. A. Axinte, P. H. Shipway [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2009. — Vol. 49. — P. 1077–1088.
17. **Shanmugam, D. K.** Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique / D. K. Shanmugam, J. Wang, H. Liu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2008. — Vol. 48. — P. 1527–1534.
18. **Gudimetla, P.** Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics / P. Gudimetla, J. Wang, W. Wong // Journal of Materials Processing Technology. — 2002. — Vol. 128. — P. 123–129.
19. **Paul, S.** Analytical modelling of the total depth of cut in the abrasive water jet machining of polycrystalline brittle material / S. Paul, A. M. Hoogstrate, C. A. van Luttervelt [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 1998. — Vol. 73. — P. 206–212.
20. **Shafiei, N.** Computer simulation of developing abrasive jet machined profiles including particle interference / N. Shafiei, H. Getu, A. Sadeghian [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2009. — Vol. 209. — P. 4366–4378.

17. **Kumar, Naresh.** Finite element analysis of multi-particle impact on erosion in abrasive waterjet machining of titanium alloy / *Naresh Kumar, Mukul Shukla* // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2012. — Vol. 236. — P. 4600–4610.

18. **Liu, Dun.** Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box-Behnken design / *Dun Liu, Chuanzhen Huang, Jun Wang* [et al.] // Ceramics International. — 2014. — Vol. 40. — P. 7899–7908.

19. **Кузин, В. В.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики при струйно-абразивной обработке / *В. В. Кузин, Е. Д. Коршунова, Н. Р. Портной* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 51–55.

Kuzin, V. V. Numerical modeling of the stress-strained state of a surface layer of oxide-carbide ceramic with jet-abrasive treatment / *V. V. Kuzin, E. D. Korshunova, N. R. Portnoi* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 674–678.

20. **Кузин, В. В.** Анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики при струйно-абразивной обработке / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, Н. Р. Портной* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 2. — С. 56–61.

Kuzin, V. V. Analysis of oxide-carbide ceramic surface layer stress-strained state with jet-abrasive treatment / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, N. R. Portnoi* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 98–103.

21. **Портной, Н. Р.** Модель напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя керамики при абразивно-струйной обработке / *Н. Р. Портной, В. В. Кузин* // Вестник Станкин. — 2016. — № 1 (36). — С. 59–63.

22. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 2.

Effect of thermal loading / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.

23. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 3. Влияние распределенной силовой нагрузки / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин* // Новые огнеупоры. — 2014. — № 1. — С. 42–46.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 3. Effect of a distributed force load / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 36–39.

24. **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.

25. **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.

26. **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.

27. **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 04.07.18

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров,
М. А. Волосова, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ceramitec 2021
Technologies · Innovations · Materials

■ 16–19 ноября 2021 г.
■ г. Мюнхен, Германия

Hot spot for the ceramics industry

www.ceramitec.com