

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 666.3:546.28'171]:621.914.22

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ШЛИФОВАННОЙ Al_2O_3 -TiC-КЕРАМИКИ. СИЛОВОЙ АНАЛИЗ

С использованием базовых положений компьютерной инженерии установлены закономерности изменения интенсивности напряжений в поверхностном слое шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки. Выявлено образование микроструктурных концентраторов напряжений на границе пластически деформированного слоя с исходной керамикой, которые могут являться причиной зарождения эксплуатационных дефектов и последующей деградации структуры керамики.

Ключевые слова: компьютерная инженерия, Al_2O_3 -TiC-керамика, поверхностный слой, напряженное состояние, интенсивность напряжений, концентратор напряжений, эксплуатационный дефект, разрушение.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процесса трансформации структуры керамики на разных стадиях жизненного цикла инструментов важно для обеспечения их эксплуатационной надежности [1–7]. Установлены [8, 9] основные закономерности формирования поверхностного слоя (ПС) на Al_2O_3 -TiC-керамике при шлифовании, характеризующегося особыми структурой и свойствами. Однако при исследовании работоспособности и надежности керамических инструментов факт образования этого модифицированного ПС и его влияния на их износ не учитывался [10–12]. Отсутствие достоверных сведений по этому вопросу не позволяет объяснить высокую интенсивность износа керамических инструментов на этапе приработки и повышенную вероятность их внезапных отказов на начальном этапе нормальной работы. Поэтому изучение разных аспектов влияния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики на состояние инструментов при эксплуатации является актуальной задачей. Важные аспекты этой задачи — изучение напряженного состояния инструментов под действием силовой нагрузки и выявление возможных изменений в структуре керамики [14–18].

Этот подход положен авторами в основу создания керамических инструментов нового поколения [14–18].

Цель настоящей работы — изучение напряженного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки с использованием базовых положений компьютерной инженерии.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На базе основных положений компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики выполнены численные эксперименты с использованием расчетной схемы № 1 и автоматизированной системы термочисленных расчетов KS-SL v.1.0 [19]. Исследовали характер изменения интенсивности напряжений σ_i в структурных элементах, образующих ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики четырех систем: системы № 1 — Al_2O_3 (зерно)-MgO (межзеренная фаза)- Al_2O_3 (матрица)/ Al_2O_3 (слой); системы № 2 — Al_2O_3 -MgO- Al_2O_3 /TiC; системы № 3 — TiC-MgO- Al_2O_3 / Al_2O_3 ; системы № 4 — TiC-MgO- Al_2O_3 /TiC. ПС нагружали сосредоточенной силой ($F = 0,02$ Н, $\beta = 45^\circ$) и распределенной силовой нагрузкой $P = 5 \cdot 10^8$ Па. По результатам расчетов определяли следующие статистические характеристики для σ_i в КТ каждой поверхности: наименьшие σ_{\min} , наибольшие σ_{\max} , средние $\sigma_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение s для σ_i . Статистический анализ данных выполняли с использованием программного комплекса Statistica.

Для сравнительной оценки интенсивности напряжений σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [20]. Выделенные КТ располагались в по-



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

верхности: зерна, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность С1 — КТ1–КТ18); межзеренной фазы, примыкающей к зерну (поверхность С2 — КТ19–КТ34); межзеренной фазы, примыкающей к матрице (поверхность С3 — КТ35–КТ50); матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (поверхность С4 — КТ51–КТ66); зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к пластически деформированному слою (поверхность С5 — КТ67–КТ82); слоя, примыкающего к зерну, межзеренной фазе и матрице (поверхность С6 — КТ83–КТ98).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема деформации ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики системы № 1 под действием сосредоточенной и распределенной силы показана на рис. 1, а. Эту схему вдавливания, принципиально не изменяющуюся для других трех систем, характеризует высокая локальность упругих деформаций с хорошо различимой границей, в пределах которой перемещаются все КТ. В качестве примера стрелкой показано направление перемещения точки 0 (точка приложения сосредоточенной силы) из исходного положения в точке 0¹. Видно, что точка 0 имеет наибольшие горизонтальные u и вертикальные v перемещения; величины u и v для выделенных КТ уменьшаются при увеличении расстояния между ними и точкой 0. Результаты расчетов u и v для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются.

Поле интенсивности напряжений σ_i в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики системы № 1 под действием сосредоточенной и распределенной силы имеет достаточно простой вид (рис. 1, б). Наибольшие напряжения формируются в слое и локальном объеме поверхности зерна, находящегося на траектории действия сосредоточенной силы. Видно, что в этих локальных объемах σ_i изменяется от 966 до 1903 МПа, а во всех других областях — от 0 до 966 МПа.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С1 керамики систем № 1–4 под действием силовой на-

грузки показан на рис. 2, а. Видно, что все кривые имеют однотипную форму; в КТ1 зафиксированы наибольшие σ_i , в КТ12 — наименьшие. В поверхности С1 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 426 ($\sigma_{мин}$) до 780 МПа ($\sigma_{макс}$) при $\sigma_{ср} = 562,2$ МПа и $s = 116,9$; системы № 2 — от 415 до 739 МПа при $\sigma_{ср} = 539$ МПа и $s = 107,7$; системы № 3 — от 450 до 823 МПа при $\sigma_{ср} = 590,3$ МПа и $s = 125,9$; системы № 4 — от 439 до 783 МПа при $\sigma_{ср} = 569$ МПа и $s = 115$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Системы № 1 и 4 имеют практически одинаковые значения $\sigma_{ср}$ и s . Коэффициенты корреляции, значимые на уровне 0,05, для σ_i разных систем имеют значения не менее 0,998, что свидетельствует о высокой степени связи между системами.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С2 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, б. Видно, что в центральной области этой поверхности (КТ23–КТ29) форма кривых для всех систем является идентичной, а на периферийных участках для систем № 1 и 2 заметно отличается от кривых для систем № 3 и 4. В поверхности С2 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 416 до 679 МПа при $\sigma_{ср} = 504$ МПа и $s = 89,2$; системы № 2 — от 407 до 644 МПа при $\sigma_{ср} = 486,5$ МПа и $s = 80,6$; системы № 3 — от 367 до 591 МПа при $\sigma_{ср} = 482$ МПа и $s = 81$; в поверхности С1 керамики системы № 4 — от 358 до 564 МПа при $\sigma_{ср} = 465,9$ МПа и $s = 73,8$. Приведенные показатели σ_i в поверхности С2 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показывают, что наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют практически одинаковые значения $\sigma_{ср}$ и s . Наибольшим коэффициентом корреляции (0,999), значимым на уровне 0,05, для σ_i разных систем характеризуется связь систем № 1 и 2, наименьшим (0,885) — систем № 2 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности С3 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, в. Видно, что большая

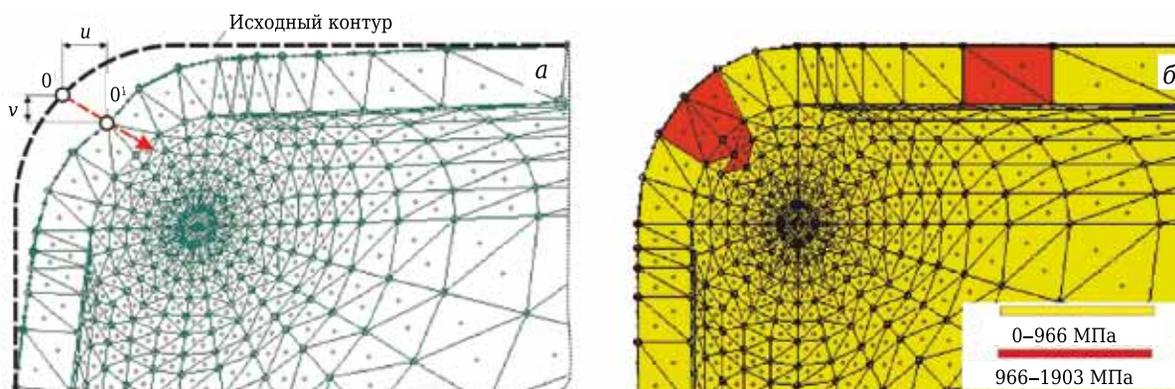


Рис. 1. Схема деформации и поле интенсивности напряжений σ_i в ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки на примере системы № 1

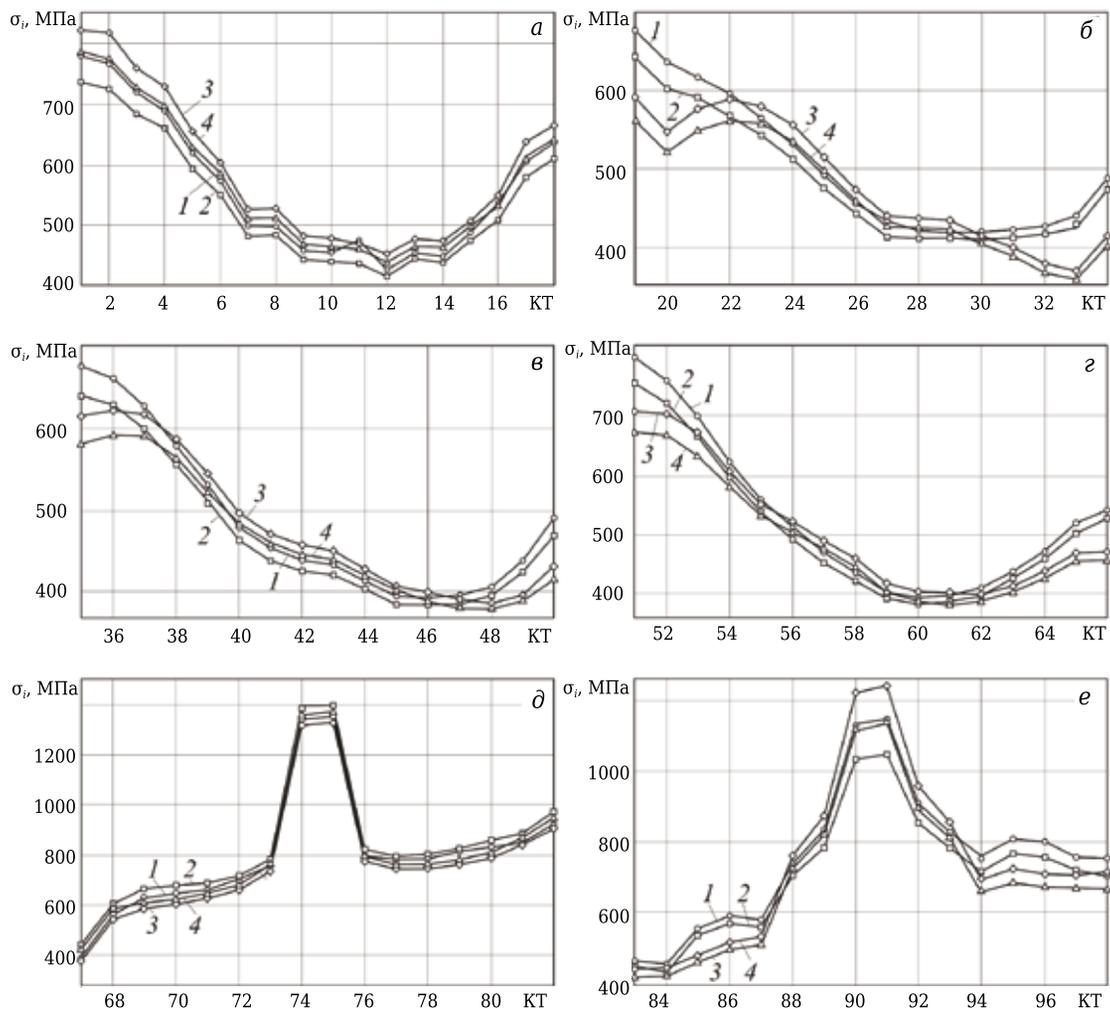


Рис. 2. Характер изменения σ_i в поверхностях C1 (а), C2 (б), C3 (в), C4 (г), C5 (д) и C6 (е) керамики систем № 1–4 (1–4) под действием силовой нагрузки

часть кривых от КТ38 до КТ48 имеет одинаковую форму, а их периферийные участки несколько различаются, причем в КТ35 фиксируется наибольшая разница σ_i между разными системами. Наибольшие σ_i в этой поверхности формируются в КТ1и КТ2, наименьшие — в КТ46–КТ48. В поверхности C3 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 390 до 677 МПа при $\sigma_{ср} = 487,5$ МПа и $s = 99$; системы № 2 — от 382 до 640 МПа при $\sigma_{ср} = 470,6$ МПа и $s = 89,4$; системы № 3 — от 383 до 623 МПа при $\sigma_{ср} = 480,7$ МПа и $s = 88,9$; системы № 4 — от 377 до 592 МПа при $\sigma_{ср} = 464,7$ МПа и $s = 80,2$. Приведенные показатели σ_i в поверхности C3 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показывают, что наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\sigma_{ср}$ и s , причем у системы № 3 эти значения несколько выше, чем у системы № 2. Наибольшим коэффициентом корреляции (0,999), значимым на уровне 0,05, для σ_i разных систем характеризуется связь систем № 2 и 3, наименьшим (0,952) — систем № 1 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C4 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, г. Видно, что форма всех кривых является практически идентичной форме кривых для поверхности C3. В поверхности C4 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 393 до 799 МПа при $\sigma_{ср} = 526,8$ МПа и $s = 131,2$; системы № 2 — от 384 до 758 МПа при $\sigma_{ср} = 508$ МПа и $s = 120,7$; системы № 3 — от 394 до 710 МПа при $\sigma_{ср} = 504,6$ МПа и $s = 108,2$; системы № 4 — от 386 до 674 МПа при $\sigma_{ср} = 488,9$ МПа и $s = 100,6$. Наибольшими значениями $\sigma_{ср}$ и s характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4. Системы № 2 и 3 имеют промежуточные значения $\sigma_{ср}$ и s , причем у системы № 2 эти значения несколько выше, чем у системы № 3. Для σ_i разных систем наибольшим коэффициентом корреляции (0,999), значимым на уровне 0,05, характеризуется связь систем № 1 и 2, наименьшим (0,97) — систем № 2 и 3.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C5 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, д. Видно, что форма кривых отличается от формы кривых поверхно-

стей C1–C4 наличием пика, характеризующего резкое увеличение σ_i в КТ73–КТ76. Образование микроструктурных концентраторов напряжений в этой поверхности вполне может быть причиной зарождения эксплуатационных дефектов и последующей деградации структуры керамики, приводящей к разрушению инструмента (детали).

Во всех КТ значения σ_i для разных систем имеют очень близкие значения. В поверхности C5 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 375 до 1348 МПа при $\sigma_{cp} = 793,1$ МПа и $s = 250,9$; системы № 2 — от 433 до 1389 МПа при $\sigma_{cp} = 826,6$ МПа и $s = 251$; системы № 3 — от 367 до 1312 МПа при $\sigma_{cp} = 765,6$ МПа и $s = 247,9$; системы № 4 — от 420 до 1346 МПа при $\sigma_{cp} = 789,9$ МПа и $s = 248,9$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s характеризуется система № 2, а наименьшими — система № 3. Системы № 1 и 4 имеют промежуточные значения σ_{cp} и s , причем у системы № 1 эти значения несколько выше, чем у системы № 4. Для σ_i разных систем наибольшим коэффициентом корреляции (0,998), значимым на уровне 0,05, характеризуется связь систем № 1 и 2, наименьшим (0,995) — систем № 1 и 4.

Характер изменения σ_i в КТ поверхности C6 керамики систем № 1–4 под действием силовой нагрузки показан на рис. 2, е. Видно, что форма кривых сходна с формой кривых поверхности C5 при значительно большей ширине основания пика, характеризующего резкое увеличение σ_i в КТ87–КТ94. В поверхности C6 керамики системы № 1 σ_i изменяются от 449 до 1147 МПа при $\sigma_{cp} = 754,5$ МПа и $s = 202,2$; системы № 2 — от 428 до 1047 МПа при $\sigma_{cp} = 711,6$ МПа и $s = 177,6$; системы № 3 — от 437 до 1246 МПа при $\sigma_{cp} = 745,8$ МПа и $s = 247,1$; системы № 4 — от 426 до 1144 МПа при $\sigma_{cp} = 704,9$ МПа и $s = 221,3$. Наибольшими значениями σ_{cp} и s характеризуется система № 1, наименьшими — система № 4; наибольшими значениями s характеризуется система № 3, наименьшими — система № 2. Для σ_i разных систем наибольшим коэффициентом корреляции (0,999), значимым на уровне 0,05, характеризуется связь систем № 3 и 4, наименьшим (0,977) — систем № 2 и 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием основных положений компьютерной инженерии ПС шлифованной керамики, автоматизированной системы термочислотных расчетов KS-SL v.1.0 и метода КТ изучен характер изменения интенсивности напряжений σ_i в поверхности: зерна, примыкающей к межзеренной фазе (C1); межзеренной фазы, примыкающей к зерну (C2); межзеренной фазы, примыкающей к матрице (C3); матрицы, примыкающей к межзеренной фазе (C4); зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающих к слою (C5); слоя, примыкающего к зерну, межзеренной фазе и матрице (C6).

Установлено, что под действием силовой нагрузки происходит локальное вдавливание материала, причем область упругих деформаций имеет хорошо различимую границу, в пределах которой перемещаются все КТ. Результаты расчетов горизонтальных u и вертикальных v перемещений для одинаковых КТ в ПС керамики разных систем существенно различаются. Наибольшие напряжения формируются в пластически деформированном слое и локальном объеме поверхности зерна, находящихся на траектории действия сосредоточенной силы. Напряженные состояния поверхностей C1–C4 и C5–C6 керамики систем № 1–4, сформированные под действием силовой нагрузки, принципиально различаются. Характер изменения σ_i в КТ поверхностей C1–C4 описывается простой кривой, в соответствии с которой наименьшие σ_i фиксируются в ее центральной части, наибольшие — на начальном участке, средние — на конечном участке. Кривые, определяющие характер изменения σ_i в КТ поверхностей C5–C6, имеют более сложную форму из-за пика в ее центральной части, что свидетельствует об образовании мощных микроструктурных концентраторов напряжений в этих поверхностях.

Сравнительный анализ статистических характеристик напряженного состояния ПС шлифованной Al_2O_3 -TiC-керамики по классифицированным группам поверхностей показал их достаточно высокую стабильность. В первой группе поверхностей (C1–C4) σ_i изменяются от 358 (поверхность C2, система № 4) до 823 МПа (поверхность C1, система № 3) при среднем σ_i по 16 поверхностям 518 МПа, во второй группе поверхностей — от 358 (поверхность C5, система № 3) до 1389 МПа (поверхность C5, система № 2) при среднем σ_i по 16 поверхностям 761,5 МПа. В первой группе поверхностей наименьшее значение s (73,8) зафиксировано в поверхности C2 системы № 4, наибольшее (131,2) — в поверхности C4 системы № 1 при среднем s по 16 поверхностям 106,4. Во второй группе поверхностей наименьшее значение s (177,6) зафиксировано в поверхности C6 системы № 2, наибольшее (251) — в поверхности C5 системы № 2 при среднем s по 16 поверхностям 230,9.

Интерпретируя эти данные, можно с высокой вероятностью утверждать, что эксплуатационные дефекты в виде несплошностей в ПС детали из Al_2O_3 -TiC-керамики под действием силовой нагрузки образуются на границе керамики (поверхность C5) и пластически деформированного слоя (поверхность C6). На следующем этапе происходит деградация керамики, приводящая к внезапному отказу инструмента.

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0707-2020-0025.

Библиографический список

1. **Волосова, М. А.** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // *Металловедение и термическая обработка*. — 2012. — № 1. — С. 40–46.
Volosova, M. A. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / M. A. Volosova, V. V. Kuzin // *Metal Science and Heat Treatment*. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.
2. **Yin, Zengbin.** Friction and wear behaviors of Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic sliding against metals and hard materials / Zengbin Yin, Juntang Yuan, Chuanzhen Huang [et al.] // *Ceram. Int.* — 2016. — Vol. 42, № 1. — P. 1982–1989.
3. **Xing, Youqiang.** Fabrication and tribological properties of Al₂O₃/TiC ceramic with nano-textures and WS₂/Zr soft-coatings / Youqiang Xing, Jianxin Deng, Yonghui Zhou [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. — 2014. — Vol. 258. — P. 699–710.
4. **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.
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.
5. **Zhao, Jun.** Cutting performance and failure mechanisms of an Al₂O₃/WC/TiC micro-nano-composite ceramic tool / Jun Zhao, Xunliang Yuan, Yonghui Zhou // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. — 2010. — Vol. 28, № 3. — P. 330–337.
6. **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.
7. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
Кузин, В. В. Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // *Новые огнеупоры*. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
8. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with Al₂O₃-TiC-ceramic surface condition / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 57, № 5. — P. 520–525.
Кузин, В. В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-TiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 9. — С. 63–68.
9. **Kuzin, V. V.** Features of Al₂O₃-TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // *Refract. Ind. Ceram.* — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.
Кузин, В. В. Закономерности формирования морфологии кромок образцов Al₂O₃-TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, С. Н. Григорьев // *Новые огнеупоры*. — 2017. — № 5. — С. 63–67.
10. **Кузин, В. В.** Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин / В. В. Кузин, В. Н. Аникин, С. Ю. Федоров [и др.] // *Вестник машиностроения*. — 2010. — № 11. — С. 50–56.
Kuzin, V. V. Wear and failure of ceramic cutting plates / V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov [et al.] // *Russian Engineering Research*. — 2010. — Vol. 30, № 11. — P. 1116–1123.
11. **Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / В. В. Кузин // *Вестник машиностроения*. — 2004. — № 5. — С. 39–43.
Kuzin, V. V. Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / V. V. Kuzin // *Russian Engineering Research*. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.
12. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // *Трение и износ*. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.
Kuzin, V. V. Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov // *Journal of Friction and Wear*. — 2013. — Vol. 34, № 3. — P. 199–203.
13. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // *Вестник машиностроения*. — 2012. — № 1. — С. 67–71.
Grigor'ev, S. N. Influence of loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, A. D. Batako [et al.] // *Russian Engineering Research*. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.
14. **Kuzin, V. V.** Stress Inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 1. Effect of complex mechanical loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.
Кузин, В. В. Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // *Новые огнеупоры*. — 2013. — № 10. — С. 47–51.
15. **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 // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 1. — P. 36–39.
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.
16. **Kuzin, V. V.** The stressed state of the boundary between ceramic and a coating under the effect of power loads / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 192–198.
Кузин, В. В. Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием силовых нагрузок / В. В. Кузин, М. Ю. Федоров // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 4. — С. 38–44.
17. **Kuzin, V.** Designing of details taking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. — 2015. — Vol. 752/753. — P. 268–271.
18. **Kuzin, Valery V.** A new generation of ceramic tools / Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton [et al.] // *Proc. of the 10th International Conference on Manufacturing Research ICMR 2012*. — 2012. — P. 523–528.
19. **Кузин, В. В.** Основы компьютерной инженерии поверхностного слоя шлифованной керамики / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // *Новые огнеупоры*. — 2020. — № 6. — С. 64–69.
20. **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 07.06.20

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова, 2020 г.