

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

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

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

ТРАНСФОРМАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ TiC-ПОКРЫТИЯ. ВАРИАНТ НАГРУЖЕНИЯ — СОСРЕДОТОЧЕННАЯ СИЛОВАЯ НАГРУЗКА

Изучено влияние толщины покрытия из карбида титана на трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики под действием сосредоточенной силы. Установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к уменьшению напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в поверхностном слое нитридной керамики.

Ключевые слова: нитридная керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, сосредоточенная сила, поверхностный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения эксплуатационного ресурса деталей из керамических материалов в условиях экстремальных нагрузок применяют покрытия различного назначения [1–3]. Особая эффективность покрытий выявлена для керамических режущих инструментов, используемых при точении и фрезеровании [4–6]. Керамические инструменты с покрытиями обеспечивают увеличение производительности процесса обработки и повышение точности изготовленных изделий. Причем наибольший технико-экономический эффект обеспечивают покрытия с оптимальными параметрами для конкретных условий эксплуатации [7–9].

Одним из важных параметров покрытия, оказывающего неоднозначное влияние на эксплуатационный ресурс керамических деталей и инструментов, является его толщина [10–12]. Природа этого влияния связана с формированием сложного напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое керамики при внешнем воздействии [13, 14]. Более детально это положение изучено в работах [15–18] на примере TiN-покрытия толщиной 5 мкм, нанесенного на оксидно-карбидную керамику. Влияние толщины этого покрытия на структурную неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики на основе оксида алюминия исследовано в работе [19]. Однако степени влия-

ния толщины TiC-покрытия на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя нитридной керамики не уделено настолько пристального внимания, чтобы сформулировать требования к этому параметру покрытия при проектировании деталей и инструментов.

В работе поставлена цель — исследовать напряженное состояние поверхностного слоя $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики, находящейся под действием сосредоточенной силовой нагрузки при изменении толщины TiC-покрытия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовали методику численных экспериментов, приведенную в работе [20]. Расчетная схема (рис. 1, а) построена с использованием основных структурных элементов керамики. Зерно эллипсической формы размерами 3×2 мкм заделано в матрицу через межзеренную фазу толщиной $\delta_f = 0,2$ мкм. Исследовали керамику системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$, на поверхности которой имеется слой покрытия TiC, который контактирует со слоем чугуна СЧ32. Зерно выполнено из TiC (плотность $\rho = 4,9$ г/см³, модуль упругости $E = 484$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,22$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 7,95 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹), межзеренная фаза состоит из Y_2O_3 ($\rho = 4,9$ г/см³, $E = 250$ ГПа, $\mu = 0,22$, $\alpha = 7,9 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹), матрица — из Si_3N_4 ($\rho = 3,2$ г/см³, $E = 300$ ГПа, $\mu = 0,25$, $\alpha = 3,2 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹). Свойства чугуна СЧ32: $\rho = 5,68$ г/см³, $E = 180$ ГПа, $\mu = 0,2$, $\alpha = 10,5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Теплопроводность λ для TiC, Y_2O_3 , Si_3N_4 и СЧ32 задавали формулами: $\lambda = 23,2 e^{0,0002T}$, $\lambda = 686,05 T^{-0,82}$, $\lambda = 1001,7 T^{-0,63}$ и $\lambda = 44,028 e^{-0,00057T}$ соответственно [21]. Расчеты проводили для TiC-покрытия



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

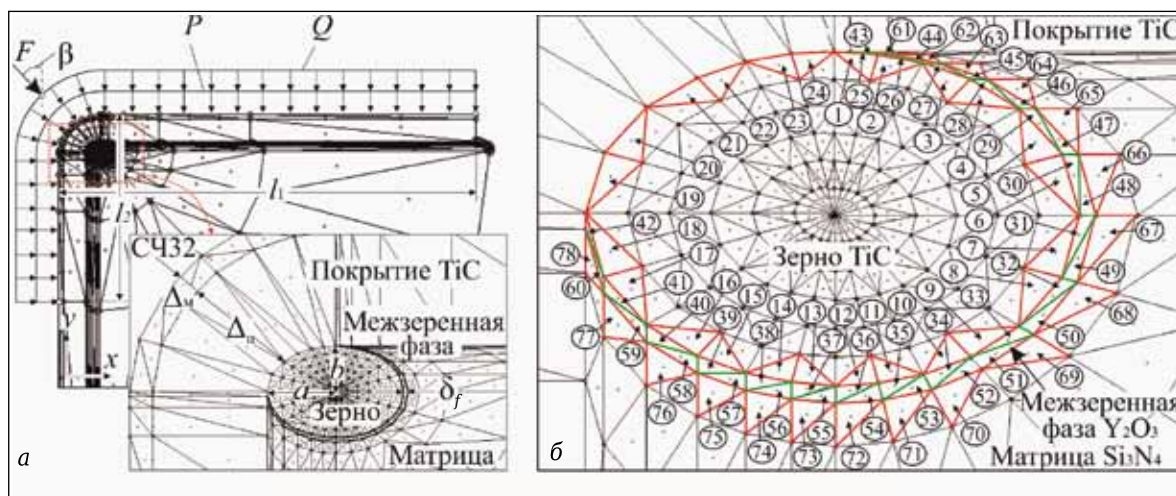


Рис. 1. Расчетная схема (а) и расположение КТ в структурных элементах керамики (б)

толщиной $\Delta_n = 5, 10$ и 15 мкм; толщина Δ_m слоя СЧ32 во всех численных экспериментах не изменялась и составляла 1 мкм.

Последовательно рассмотрели четыре варианта нагружения: 1 — к поверхности слоя СЧ32 приложена сосредоточенная сила $F = 0,1$ Н под углом 45° ; 2 — приложена распределенная сила $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па; 3 — приложен тепловой поток $Q = 3 \cdot 10^7$ Вт/м² при теплоотводе с поверхностей, свободных от теплового потока, в окружающую среду с коэффициентом $h = 10^5$ Вт/(м²·град); 4 — все эти нагрузки приложены одновременно (комбинированная нагрузка). Результаты исследований будут представлены в серии статей.

В расчетной схеме выделены четыре поверхности на основных структурных элементах керамики: поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе (З); поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну (МФЗ); поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице (МФМ); поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе (М). Более подробно этот метод выделения поверхностей изложен в статьях [22, 23]. Для анализа результатов расчета σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i использовали метод контрольных точек (КТ) [24]. Выбранные КТ расположены (рис. 1, б) в поверхностном слое зерна (КТ1–КТ24); в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающем к зерну (КТ25–КТ42); в поверхностном слое межзеренной фазы, примыкающем к матрице (КТ43–КТ60); в поверхностном слое матрицы, примыкающем к межзеренной фазе (КТ61–КТ78). Структурную неоднородность напряжений в поверхностных слоях элементов керамики характеризовали следующими статистическими показателями: наибольшее $\sigma_{\max}$, наименьшее $\sigma_{\min}$ и среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значения, диапазон изменения Σ , стандартное отклонение s и число N изменения знака для σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое 3 под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н показаны на рис. 2. Установлено, что напряжения σ_{11} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 308 МПа — от 224 (КТ23) до -84 МПа (КТ12) при $\sigma_{\text{ср}} = 44$ МПа, $s = 105$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 2, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 185 МПа — от 136 (КТ23) до -49 МПа (КТ11) при $\sigma_{\text{ср}} = 23$ МПа, $s = 58$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 123 МПа — от 90 (КТ23) до -33 МПа (КТ11) при $\sigma_{\text{ср}} = 13$ МПа, $s = 37$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 1082 МПа — от 104 (КТ2) до -978 МПа (КТ19) при $\sigma_{\text{ср}} = -201$ МПа, $s = 305$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 2, б). При $\Delta_n = 10$ мкм в поверхностном слое зерна формируются σ_{22} с диапазоном изменения 683 МПа — от 63 (КТ23) до -620 МПа (КТ19) при $\sigma_{\text{ср}} = -143$ МПа, $s = 186$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 185 МПа — от 136 (КТ23) до -49 МПа (КТ11) при $\sigma_{\text{ср}} = 23$ МПа, $s = 58$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 475 МПа — от 458 (КТ22) до -17 МПа (КТ5) при $\sigma_{\text{ср}} = 145$ МПа, $s = 116$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 286 МПа — от 14 (КТ5) до 300 МПа (КТ22) при $\sigma_{\text{ср}} = 114$ МПа, $s = 72$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} , которые изменяются в диапазоне 203 МПа — от 23 (КТ5) до 226 МПа (КТ22) при $\sigma_{\text{ср}} = 95$ МПа, $s = 52$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 1026 МПа — от 58 (КТ6) до 1084 МПа (КТ19) при $\sigma_{\text{ср}} = 392$ МПа, $s = 309$ МПа (см. рис. 2, г). При $\Delta_n = 10$ мкм диапазон изменения σ_i составляет 663 МПа — от 44 (КТ5) до 707 МПа (КТ19) при $\sigma_{\text{ср}} = 274$ МПа, $s = 196$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диа-

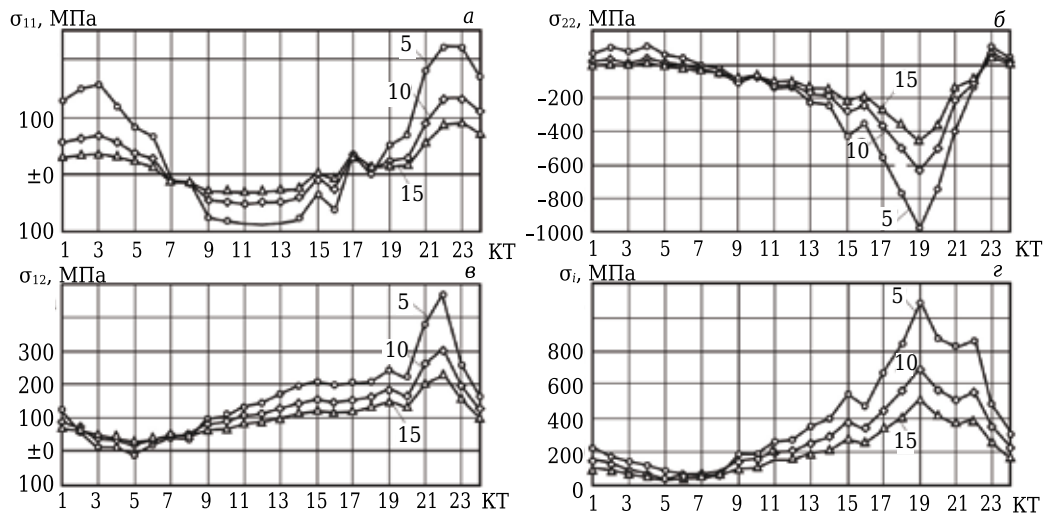


Рис. 2. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности 3 в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике

пазоне 480 МПа — от 50 (КТ5) до 530 МПа (КТ19) при $\sigma_{\text{ср}} = 219$ МПа, $s = 142$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое МФЗ показаны на рис. 3. Установлено, что напряжения σ_{11} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 256 МПа — от 157 (КТ26) до -99 МПа (КТ34) при $\sigma_{\text{ср}} = 16$ МПа, $s = 78$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 3, а). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 134 МПа — от 67 (КТ27) до -67 МПа (КТ34) при $\sigma_{\text{ср}} = 8$ МПа, $s = 45$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 86 МПа — от 42 (КТ41) до -44 МПа (КТ35) при $\sigma_{\text{ср}} = 6$ МПа, $s = 32$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 877 МПа — от 415 (КТ26) до -462 МПа (КТ41) при $\sigma_{\text{ср}} = -114$ МПа, $s = 240$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 3, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 423 МПа — от 130 (КТ26) до -293 МПа (КТ40) при $\sigma_{\text{ср}} = -98$ МПа, $s = 131$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм

образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 268 МПа — от 50 (КТ26) до -218 МПа (КТ40) при $\sigma_{\text{ср}} = -83$ МПа, $s = 89$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 179 МПа — от -4 (КТ31) до 175 МПа (КТ38) при $\sigma_{\text{ср}} = 74$ МПа, $s = 61$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 3, в). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 114 МПа — от 14 (КТ30) до 128 МПа (КТ38) при $\sigma_{\text{ср}} = 64$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются напряжения с диапазоном изменения 84 МПа — от 19 (КТ30) до 103 МПа (КТ38) при $\sigma_{\text{ср}} = 56$ МПа, $s = 28$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i в этом слое поверхности при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 468 МПа — от 35 (КТ31) до 503 МПа (КТ40) при $\sigma_{\text{ср}} = 257$ МПа, $s = 170$ МПа (см. рис. 3, г). При $\Delta_n = 10$ мкм диапазон изменения σ_i составляет 305 МПа — от 39 (КТ31) до 344 МПа (КТ40) при $\sigma_{\text{ср}} = 179$ МПа, $s = 110$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 225 МПа — от 43 (КТ30)

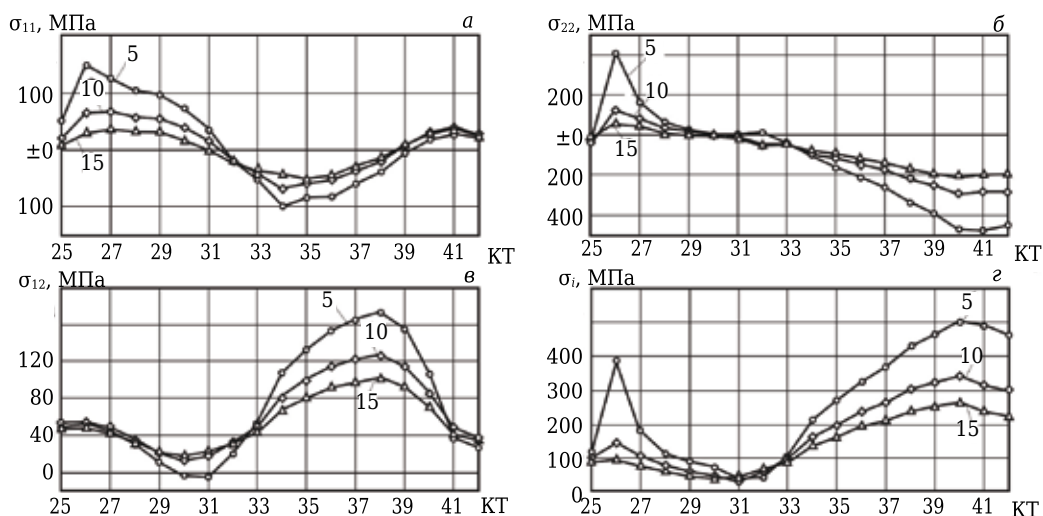


Рис. 3. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности МФЗ в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике

до 268 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 145$ МПа, $s = 82$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое МФМ показаны на рис. 4. При $\Delta_n = 5$ мкм в этой поверхности формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 258 МПа — от 173 (КТ60) до -85 МПа (КТ51) при $\sigma_{cp} = 23$ МПа, $s = 78$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 4, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 182 МПа — от 123 (КТ60) до -59 МПа (КТ51) при $\sigma_{cp} = 14$ МПа, $s = 53$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 143 МПа — от 97 (КТ60) до -46 МПа (КТ51) при $\sigma_{cp} = 11$ МПа, $s = 41$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 490 МПа — от 58 (КТ45) до -432 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = -141$ МПа, $s = 78$ МПа и $N = 3$ (см. рис. 4, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 287 МПа — от 10 (КТ45) до -277 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = -103$ МПа, $s = 96$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяю-

щиеся в диапазоне 204 МПа — от -3 (КТ47) до -207 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = -85$ МПа, $s = 69$ МПа и $N = 0$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 171 МПа — от -6 (КТ48) до 165 МПа (КТ57) при $\sigma_{cp} = 77$ МПа, $s = 60$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 4, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 107 МПа — от 14 (КТ47) до 121 МПа (КТ57) при $\sigma_{cp} = 67$ МПа, $s = 37$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 79 МПа — от 18 (КТ47) до 97 МПа (КТ57) при $\sigma_{cp} = 59$ МПа, $s = 27$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 504 МПа — от 37 (КТ48) до 541 МПа (КТ60) при $\sigma_{cp} = 236$ МПа, $s = 169$ МПа (см. рис. 4, г). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 333 МПа — от 34 (КТ48) до 367 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = 176$ МПа, $s = 111$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 242 МПа — от 42 (КТ4) до 284 МПа (КТ59) при $\sigma_{cp} = 146$ МПа, $s = 81$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое М показаны на рис. 5. Установле-

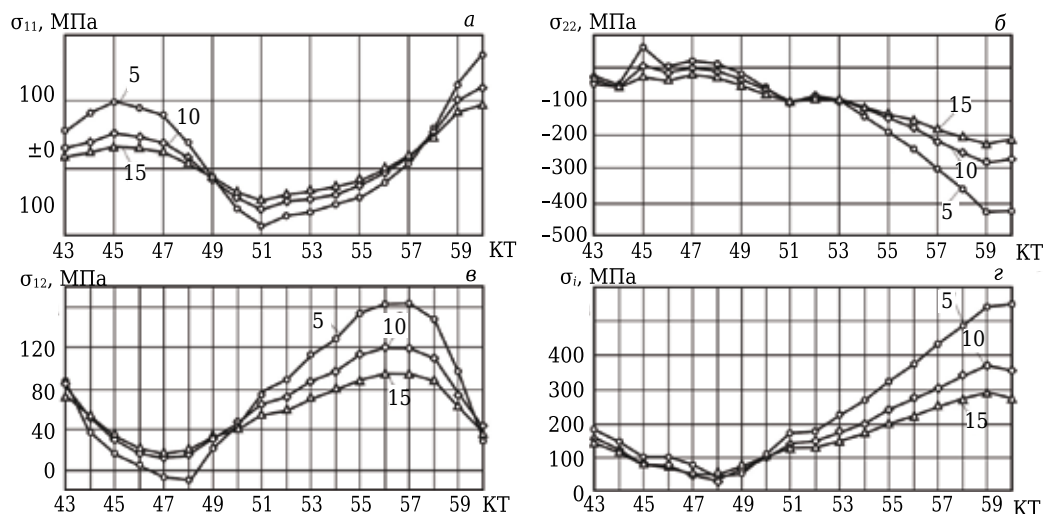


Рис. 4. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности МФМ в Si_3N_4 -TiC- Y_2O_3 -керамике

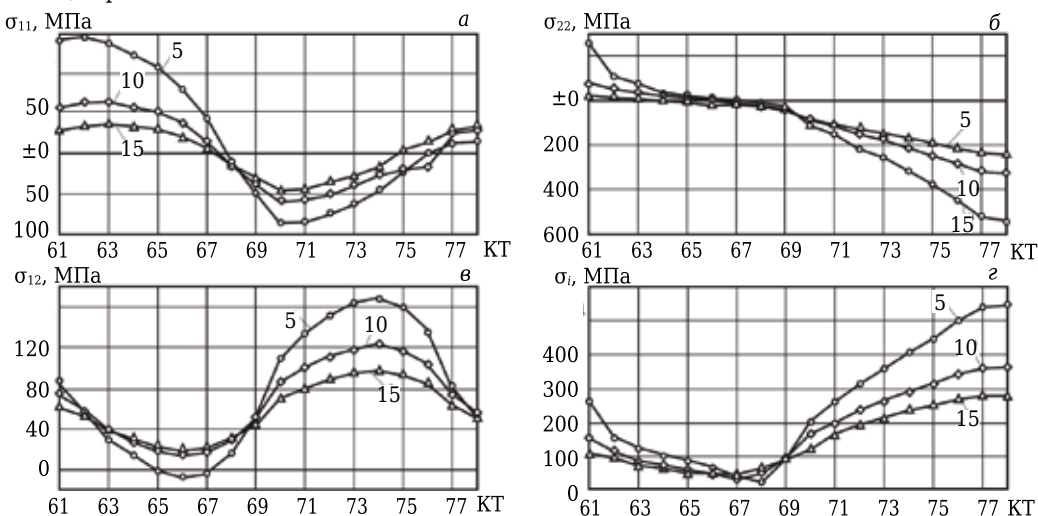


Рис. 5. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности М в Si_3N_4 -TiC- Y_2O_3 -керамике

но, что при $\Delta_n = 5$ мкм в этом слое поверхности формируются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 231 МПа — от 141 (КТ62) до -90 МПа (КТ70) при $\sigma_{ср} = 17$ МПа, $s = 83$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 5, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 132 МПа — от 65 (КТ62) до -67 МПа (КТ75) при $\sigma_{ср} = 3$ МПа, $s = 48$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 83 МПа — от 39 (КТ63) до -44 МПа (КТ70) при $\sigma_{ср} = 6$ МПа, $s = 30$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 791 МПа — от 256 (КТ61) до -535 МПа (КТ78) при $\sigma_{ср} = -133$ МПа, $s = 230$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 5, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 407 МПа — от 75 (КТ61) до -332 МПа (КТ78) при $\sigma_{ср} = -104$ МПа, $s = 132$ МПа и $N = 1$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 262 МПа — от 22 (КТ61) до -240 МПа (КТ78) при $\sigma_{ср} = -87$ МПа, $s = 91$ МПа и $N = 1$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 178 МПа — от -10 (КТ66) до 168 МПа (КТ74) при $\sigma_{ср} = 76$ МПа, $s = 63$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 5, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 110 МПа — от 11 (КТ66) до 121 МПа (КТ74) при $\sigma_{ср} = 66$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 78 МПа — от 18 (КТ66) до 96 МПа (КТ74) при $\sigma_{ср} = 57$ МПа, $s = 28$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 520 МПа — от 28 (КТ68) до 548 МПа (КТ78) при $\sigma_{ср} = 256$ МПа, $s = 178$ МПа (см. рис. 5, г). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 325 МПа — от 36 (КТ67) до 361 МПа (КТ77) при $\sigma_{ср} = 180$ МПа, $s = 118$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 231 МПа — от 44 (КТ67) до 275 МПа (КТ59) при $\sigma_{ср} = 145$ МПа, $s = 87$ МПа.

Анализ полученных данных показывает, что значения показателей неоднородности σ_{11} , σ_{22} ,

σ_{12} и σ_i в поверхностном слое керамики существенно уменьшаются с увеличением толщины покрытия. Степень этого влияния зависит от поверхности элементов нитридной керамики и расположения КТ в ней. В качестве примера на рис. 6 показаны зависимости изменения σ_i в КТ разных поверхностей структурных элементов нитридной керамики. Видно, что с увеличением Δ_n от 5 до 15 мкм в КТ19 поверхности 3 значения σ_i уменьшаются более чем в 2 раза (с 1084 до 530 МПа), в КТ10 — только в 1,4 раза (со 176 до 123 МПа), в КТ6 практически не изменяются (см. рис. 6, а). В КТ26 поверхности МФЗ при увеличении Δ_n от 5 до 15 мкм значения σ_i уменьшаются в 4 раза (с 375 до 96 МПа), в КТ40 — в 1,9 раза (с 503 до 268 МПа), в КТ31 — практически не изменяются (см. рис. 6, б). В КТ59 поверхности МФМ σ_i уменьшается в 1,9 раза (с 538 до 284 МПа), в КТ53 — в 1,5 раза (с 217 до 143 МПа), в КТ50 — только в 1,1 раза (со 102 до 91 МПа (см. рис. 6, в). В КТ78 поверхностного слоя М σ_i уменьшаются в 2 раза (с 548 до 274 МПа), в КТ71 — в 1,6 раза (с 264 до 165 МПа) а в КТ69 — практически не изменяются (см. рис. 6, г).

В систематизированном виде показатели структурной неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , и σ_i в поверхностях элементов нитридной керамики с разной толщиной TiC-покрытия под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н приведены в таблице.

Анализ приведенных данных показывает, что наиболее чувствительными к изменению толщины TiC-покрытия являются максимальные значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i . Максимальные значения напряжений σ_{11} уменьшаются в 2,5, 3,6, 1,8 и 3,2 раза, σ_{22} — в 7,2, 2,2, 2,1 и 2,2 раза, σ_{12} — в 2,0, 1,7, 1,7 и 1,8 раза и σ_i — в 2,0, 1,9, 1,9 и 2,0 раза в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М соответственно. Диапазон изменения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i также уменьшается с увеличением тол-

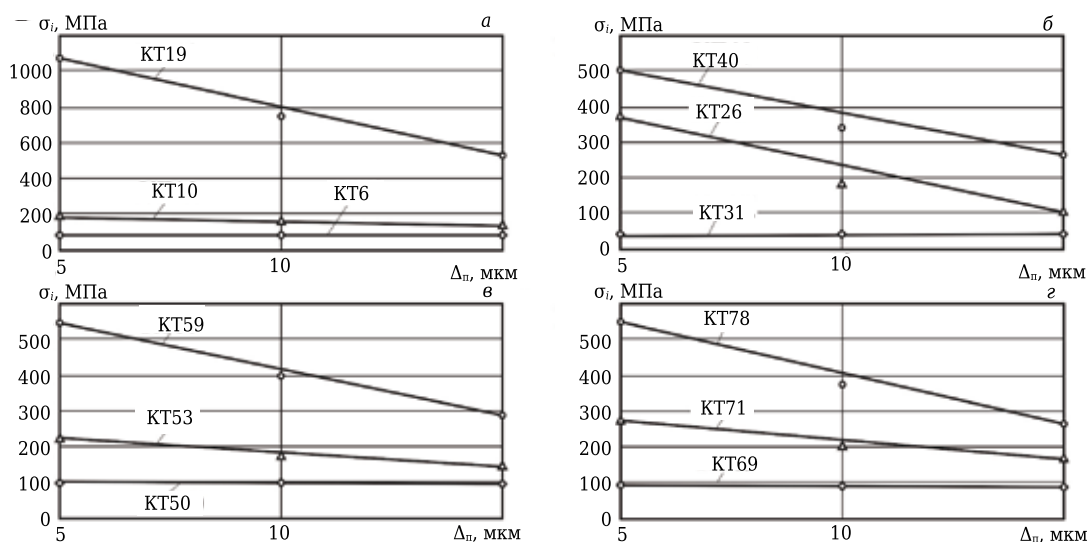


Рис. 6. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n на σ_i в КТ поверхностей 3 (а), МФЗ (б), МФМ (в) и М (г)

Пока- затели	σ_{11}			σ_{22}			σ_{12}			σ_i		
	При толщине покрытия Δ_n , мкм											
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе												
Σ	308	185	123	1082	683	185	475	286	203	1026	663	480
$\sigma_{\text{макс}}$	224	136	90	-978	-620	136	458	300	226	1084	707	530
$\sigma_{\text{мин}}$	-84	-49	-33	104	63	-49	-17	14	23	58	44	50
$\sigma_{\text{ср}}$	44	23	13	-201	-143	23	145	114	95	392	274	219
N	2	2	2	2	2	2	1	0	0	-	-	-
s	105	58	37	305	186	58	116	72	52	309	196	142
Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну												
Σ	256	134	86	877	423	268	179	114	84	468	305	225
$\sigma_{\text{макс}}$	157	67	-44	-462	-293	-218	175	128	103	503	344	268
$\sigma_{\text{мин}}$	-99	-67	42	415	130	50	-4	14	19	35	39	43
$\sigma_{\text{ср}}$	16	8	6	-144	-98	-83	74	64	56	257	179	145
N	2	2	1	2	2	2	2	0	0	-	-	-
s	78	45	32	240	131	89	61	38	28	170	110	82
Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице												
Σ	258	182	143	490	287	204	171	107	79	504	333	242
$\sigma_{\text{макс}}$	173	123	97	-432	-277	-207	165	121	97	541	367	284
$\sigma_{\text{мин}}$	-85	-59	-46	58	10	-3	-6	14	18	37	34	42
$\sigma_{\text{ср}}$	23	14	11	-141	-103	-85	77	67	59	236	176	146
N	2	2	2	3	2	0	2	0	0	-	-	-
s	78	53	41	78	96	69	60	37	27	169	111	81
Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе												
Σ	231	132	83	791	407	262	178	110	78	520	352	231
$\sigma_{\text{макс}}$	141	-67	-44	-535	-332	-240	168	121	96	548	361	275
$\sigma_{\text{мин}}$	-90	65	39	256	75	22	-10	11	18	28	36	44
$\sigma_{\text{ср}}$	17	3	6	-133	-104	-87	76	66	57	256	180	145
N	2	2	2	1	1	1	2	0	0	-	-	-
s	83	48	30	230	132	91	63	39	28	178	118	87

щины покрытия: σ_{11} уменьшаются в 2,5, 3,0, 1,8, 2,8 раза; σ_{22} — в 5,8, 3,3, 2,4, 3,0 раза; σ_{12} — в 2,3, 2,1, 2,2, 2,3 раза и σ_i — в 2,1, 2,1, 2,1, 2,3 раза в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М соответственно. Средние значения σ_{11} уменьшаются в 3,4, 2,7, 2,0, 1,9 раза, σ_{22} — в 8,7, 1,7, 1,7, 1,5 раза, σ_{12} — в 1,5, 1,3, 1,3, 1,3 раза и σ_i — в 1,8, 1,8, 1,6, 1,8 раза в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М соответственно. Стандартное отклонение σ_{11} уменьшается в 2,8, 2,4, 1,9 и 2,8 раза, σ_{22} — в 5,3, 2,7, 1,1 и 2,5 раза, σ_{12} — в 2,2, 2,2, 2,2 и 2,3 раза, σ_i — в 2,2, 2,1, 2,1 и 2,0 раза в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М соответственно. С увеличением толщины покрытия также уменьшается число смен знака σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в поверхностных слоях структурных элементов керамики, причем в наибольшей степени это проявляется в отношении σ_{12} . Если при толщине покрытия 5 мкм число смен знака 1, 2, 2 и 2 раза в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М соответственно, то при $\Delta_n = 10$ и 15 мкм смены знака σ_{12} не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия от 5 до 15 мкм приводит к существенной трансформации напряженного состояния поверхностного слоя керамики системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$. Значения показателей неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i уменьшаются с увеличением толщины

покрытия, причем степень этого влияния зависит от поверхностного слоя элементов нитридной керамики и расположения в нем КТ. Это обстоятельство позволяет предположить, что изделия из нитридной керамики с большей толщиной TiC-покрытия будут иметь повышенный ресурс в условиях эксплуатации, характеризующихся действием высоких сосредоточенных силовых нагрузок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. **Вержанский, А. П.** Износостойкость конструкционной керамики в горном оборудовании / А. П. Вержанский, М. С. Островский, Н. Б. Шубина // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — Т. 3, № 12. — С. 340–348.
2. **Zhao, Z. Y.** Near net forming of metal-ceramic parts by plasma spraying / Z. Y. Zhao, L. Wang, J. C. Fang, W. J. Xu // Key Engineering Materials. — 2005 — Vol. 280–283. — P. 1815–1818.
3. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
4. **Kuzin, V. V.** Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.
5. **Volosova, M. A.** New approach to study and research of causes of operational characteristics disturbance for ceramic tool materials / M. A. Volosova, N. Y. Cherkasova, P. Y. Peretyagin [et al.] // Materials Science Forum. — 2015. — Vol. 834. — P. 35–39.
6. **Grigoriev, S.** Cutting ceramic materials: influence of abrasive machining and coating deposition on the performance potential / S. Grigoriev, M. Volosova, Y. Melnik [et al.] // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1025/1026. — P. 317–324.
7. **Grigoriev, S.** High-strength ceramic cutting tools with multipurpose coatings for highly effective processing of tempered steel / S. Grigoriev, M. Volosova, A. A. Vereschaka [et al.] // Advanced Materials Research. — 2015. — Vol. 1064. — P. 148–153.
8. **Uhlmann, E.** Development and application of coated ceramic cutting tools / E. Uhlmann, T. Hühns, S. Richarz [et al.] // Advances in Science and Technology. — 2006. — Vol. 45. — P. 1155–1162.
9. **Pakuła, D.** Structure and properties of the Si_3N_4 nitride ceramics with hard wear resistant coatings / D. Pakuła, L. A. Dobrzański, K. Gotombek [et al.] // J.

Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 157/158. — P. 388–393.

9. **Souza, J. V. C.** Turning of compacted graphite iron using commercial TiN coated Si₃N₄ under dry machining conditions / J. V. C. Souza, M. C. A. Nono, M. V. Ribeiro [et al.] // Materials Science Forum. — 2008. — Vol. 591–593. — P. 604–609.

10. **Long, Y.** Cutting performance and wear mechanism of Ti–Al–N/Al–Cr–O coated silicon nitride ceramic cutting inserts / Y. Long, J. Zeng, W. Shanghua // Ceramics International. — 2014. — Vol. 40, № 7. — Part A. — P. 9615–9620.

11. **Vereschaka, A. A.** Control of temperature in cutting zone in machining of alloyed case-hardened steels by applying a ceramic tool with wear-resistant coatings / A. A. Vereschaka, J. Prilukova, A. S. Vereschaka [et al.] // Materials Science Forum. — 2016 — Vol. 857. — P. 199–205.

12. **Qin, J.** Continuous and varied depth-of-cut turning of gray cast iron by using uncoated and TiN/Al₂O₃ coated silicon nitride-based ceramic tools / J. Qin, Ying. L., Junjie. Z., Shanghua. W // Ceramics International. — 2014. — Vol. 40, № 8 — Part A. — P. 12245–12251.

13. **Григорьев, С. Н.** Напряженно-деформированное состояние инструментов из нитридной керамики с покрытием / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2012. — № 6. — С. 64–69.

Grigor'ev, S. N. Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — P. 561–566.

14. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 9. — С. 52–57.

Kuzin, V. V. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteady thermoelastic conditions / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

15. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 2. Действует сосредоточенная сила / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 10. — С. 77–82.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 2. Concentrated force action / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 487–491.

16. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 3. Действует распределенная силовая нагрузка / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 12. — С. 35–40.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 3. Action of distributed force load / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 565–569.

17. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений

в оксидно-карбидной керамике. Часть 4. Действует тепловой поток / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 47–52.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 4. Action of heat flow / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 91–96.

18. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 5. Действует комбинированная нагрузка / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 4. — С. 49–53.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coating on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 5. A combined load operates / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 197–200.

19. **Кузин, В. В.** Основные закономерности влияния толщины покрытия на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики / В. В. Кузин, М. А. Волосова // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2015. — № 6. — С. 12–17.

20. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть 1. Методика исследования / М. А. Волосова, С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 28–31.

Volosova, M. A. Effect of titanium nitride coatings on stress structural inhomogeneity in oxide-carbide ceramic. Part 1. Research procedure / M. A. Volosova, S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 338–340.

21. **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.

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. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 19.07.16
© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, 2016 г.