

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 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

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

В результате выполненных численных экспериментов выявлено сложное влияние толщины покрытия из карбида титана на изменение напряженного состояния поверхностного слоя $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики под действием распределенной силы. Установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к увеличению неоднородности σ , и неоднозначному изменению неоднородности σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в поверхностном слое нитридной керамики.

Ключевые слова: нитридная керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, распределенная силовая нагрузка, поверхностный слой.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности деталей и инструментов из нитридной керамики предполагает создание в их поверхностном слое благоприятных комплекса свойств, структуры и напряженного состояния [1–7]. Особую значимость в этом комплексе имеет напряженное состояние, формирующееся под действием эксплуатационных нагрузок и приводящее к последующему изменению (деградации) структуры и свойств керамики [8]. Наибольшую опасность для керамики имеет напряженное состояние ее поверхностного слоя, образующееся под влиянием интенсивных силовых нагрузок и характеризующееся повышенной структурной неоднородностью напряжений [9–12]. В работах [13–16] показано, что покрытия, присутствующие на поверхности разной керамики, не только изменяют, но и уменьшают структурную неоднородность напряжений под действием силовых нагрузок. Результатом этого благоприятного изменения напряженного состояния поверхностного слоя керамики является снижение частоты внезапных отказов керамических деталей и инструментов [17–19]. Однако степень этого влияния, зависящая от многих факторов, изучена в недостаточной степени. Поэтому детальное изучение роли разных параметров покрытия, в том числе его толщины, в изменении структурной неоднородности напряжений в поверхност-

ном слое деталей и инструментов из нитридной керамики в разных условиях нагружения является актуальной научной задачей.

Вариант нагружения сосредоточенной силой $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамики с покрытием из карбида титана разной толщины изучен в работе [20]. Также представляет интерес изучение трансформации напряженного состояния поверхностного слоя при других вариантах нагружения, что позволит обоснованно подходить к проектированию керамических деталей с покрытием. В настоящей работе поставлена цель — исследовать трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики, находящейся под действием распределенной силы при изменении толщины TiC-покрытия в диапазоне 5–15 мкм.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика выявления и анализа структурной неоднородности напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ в поверхностном слое нитридной керамики с разной толщиной покрытия под действием внешней нагрузки приведена в работе [20]. Исследовали неоднородность напряжений в керамике системы $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$, на поверхности которой имеется слой покрытия TiC толщинами 5, 10 и 15 мкм, контактирующий со слоем чугуна СЧ32 толщиной 1 мкм. Рассматривали вариант нагружения, когда к поверхности слоя СЧ32 приложена распределенная сила $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па. В расчетной схеме выделили четыре поверхности на основных структурных элементах керамики — поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе (3),



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну (МФЗ), поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице (МФМ), и поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе (М). Использовали метод контрольных точек (КТ) [21], причем выбранные КТ расположены на поверхностях основных структурных элементов керамики. Структурную неоднородность напряжений на поверхностях элементов керамики оценивали следующими показателями: наибольшее σ_{\max} , наименьшее σ_{\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 ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое 3 под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па показаны на рис. 1. Установлено, что напряжения σ_{11} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 256 МПа — от 161 (КТ20) до -95 МПа (КТ1) при $\sigma_{\text{ср}} = -7$ МПа, $s = 77$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 1, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 376 МПа — от 156 (КТ20) до -220 МПа (КТ1) при $\sigma_{\text{ср}} = -61$ МПа, $s = 107$ МПа и $N = 4$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 427 МПа — от 118 (КТ20) до -309 МПа (КТ1) при $\sigma_{\text{ср}} = -112$ МПа, $s = 119$ МПа и $N = 4$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 377 МПа — от 163 (КТ23) до -214 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = 22$ МПа, $s = 70$ МПа и $N = 6$ (см. рис. 1, б). При $\Delta_n = 10$ мкм в поверхности зерна формируются σ_{22} с диапазоном изменения 519 МПа — от 231 (КТ23) до -288 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = 18$ МПа, $s = 96$ МПа и $N = 4$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 672 МПа — от 268 (КТ23) до -304 МПа (КТ18) при $\sigma_{\text{ср}} = 23$ МПа, $s = 58$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 217 МПа — от 448 (КТ8) до 665 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 521$ МПа, $s = 70$ МПа и $N = 0$

(см. рис. 1, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 306 МПа — от 439 (КТ10) до 745 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 542$ МПа, $s = 106$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} , которые изменяются в диапазоне 346 МПа — от 433 (КТ10) до 779 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 552$ МПа, $s = 122$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 382 МПа — от 779 (КТ8) до 1161 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 907$ МПа, $s = 124$ МПа (см. рис. 1, г). При $\Delta_n = 10$ мкм диапазон изменения σ_i составляет 528 МПа — от 770 (КТ10) до 1298 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 951$ МПа, $s = 183$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 584 МПа — от 770 (КТ10) до 1354 МПа (КТ20) при $\sigma_{\text{ср}} = 976$ МПа, $s = 209$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} , и σ_i в поверхностном слое МФЗ показаны на рис. 2. Установлено, что напряжения σ_{11} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 340 МПа — от 148 (КТ28) до -192 МПа (КТ33) при $\sigma_{\text{ср}} = -8$ МПа, $s = 112$ МПа и $N = 4$ (см. рис. 2, а). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 348 МПа — от 114 (КТ40) до -234 МПа (КТ33) при $\sigma_{\text{ср}} = -53$ МПа, $s = 111$ МПа и $N = 4$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 364 МПа — от 94 (КТ40) до -270 МПа (КТ33) при $\sigma_{\text{ср}} = -87$ МПа, $s = 117$ МПа и $N = 4$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 369 МПа — от 160 (КТ29) до -209 МПа (КТ32) при $\sigma_{\text{ср}} = -9$ МПа, $s = 103$ МПа и $N = 4$ (см. рис. 2, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 364 МПа — от 152 (КТ29) до -212 МПа (КТ32) при $\sigma_{\text{ср}} = -26$ МПа, $s = 102$ МПа и $N = 4$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 359 МПа — от 150 (КТ29) до -209 МПа (КТ32) при $\sigma_{\text{ср}} = -26$ МПа, $s = 89$ МПа и $N = 4$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 124 МПа — от 323 (КТ41) до 447 МПа (КТ37) при $\sigma_{\text{ср}} = 384$ МПа, $s = 42$ МПа и $N = 0$ (см. рис. 2, в). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 127 МПа — от 312 (КТ29) до 439 МПа (КТ37) при $\sigma_{\text{ср}} = 383$ МПа, $s = 40$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются напряжения с диапазоном изменения 121 МПа — от 302 (КТ29) до 441 МПа (КТ25) при $\sigma_{\text{ср}} = 382$ МПа, $s = 40$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i в этом поверхностном слое при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 214 МПа — от 562 (КТ41) до 776 МПа (КТ36) при $\sigma_{\text{ср}} = 676$ МПа, $s = 69$ МПа (см. рис. 2, г). При $\Delta_n = 10$ мкм диапазон изменения σ_i составляет

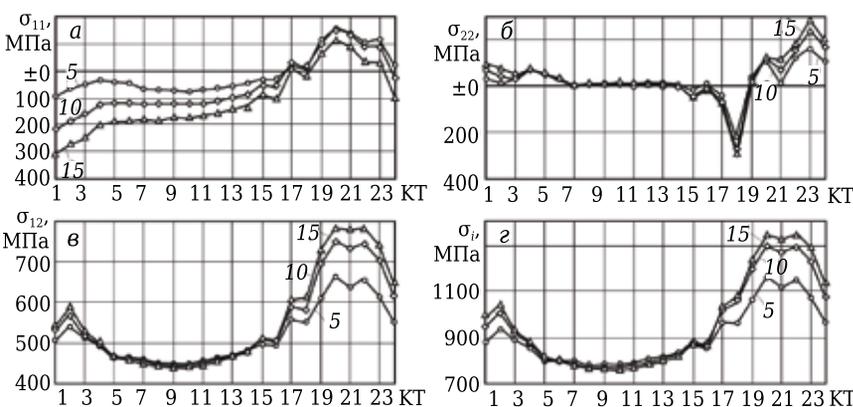


Рис. 1. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности 3 в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике

207 МПа — от 557 (КТ29) до 764 МПа (КТ36) при $\sigma_{cp} = 677$ МПа, $s = 65$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 225 МПа — от 551 (КТ29) до 776 МПа (КТ25) при $\sigma_{cp} = 679$ МПа, $s = 65$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое МФМ показаны на рис. 3. При $\Delta_n = 5$ мкм в этой поверхности формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 417 МПа — от 206 (КТ59) до -211 МПа (КТ51) при $\sigma_{cp} = 17$ МПа, $s = 137$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 3, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 452 МПа — от 201 (КТ59) до -251 МПа (КТ50) при $\sigma_{cp} = -26$ МПа, $s = 143$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 477 МПа — от 184 (КТ59) до -293 МПа (КТ50) при $\sigma_{cp} = 64$ МПа, $s = 148$ МПа и $N = 3$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 308 МПа — от -74 (КТ50) до 234 МПа (КТ47) при $\sigma_{cp} = 49$ МПа, $s = 86$ МПа и $N = 2$ (см. рис. 3, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 314 МПа — от -78 (КТ50) до 236 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 43$ МПа, $s = 97$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 340 МПа — от -75 (КТ50) до 265 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 46$ МПа, $s = 103$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 290 МПа — от 343 (КТ50) до 633 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 428$ МПа, $s = 68$ МПа и $N = 0$ (см. рис. 3, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} , изменяющиеся в диапазоне 310 МПа — от 340 (КТ50) до 650 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 424$ МПа, $s = 74$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 312 МПа — от 339 (КТ46) до 651 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 421$ МПа, $s = 76$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 488 МПа — от 620 (КТ50) до 1108 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 755$ МПа, $s = 115$ МПа (см. рис. 3, г). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 529 МПа — от 621 (КТ49) до 1150 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 753$ МПа, $s = 124$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 541 МПа — от 623 (КТ46) до 1164 МПа (КТ43) при $\sigma_{cp} = 754$ МПа, $s = 126$ МПа.

Результаты расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном

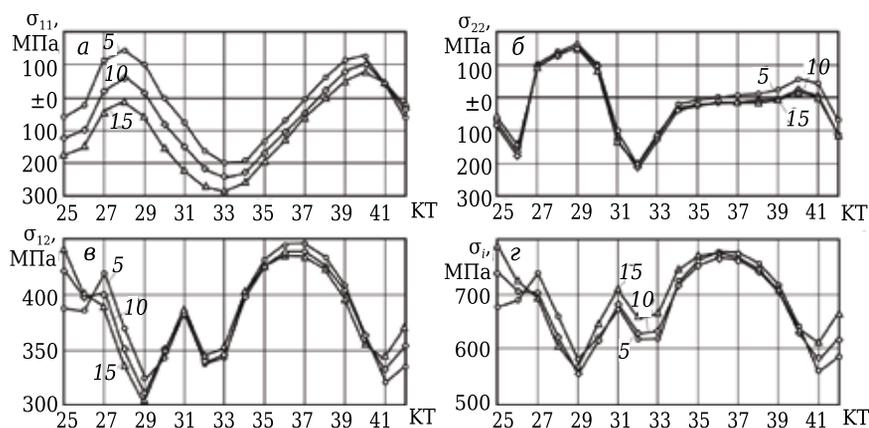


Рис. 2. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности МФЗ в Si_3N_4 -TiC- Y_2O_3 -керамике

слое М показаны на рис. 4. Установлено, что при $\Delta_n = 5$ мкм в нем формируются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 243 МПа — от 98 (КТ77) до -145 МПа (КТ69) при $\sigma_{cp} = -9$ МПа, $s = 85$ МПа и $N = 4$ (см. рис. 4, а). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 270 МПа — от 79 (КТ77) до -191 МПа (КТ69) при $\sigma_{cp} = -60$ МПа, $s = 84$ МПа и $N = 4$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{11} с диапазоном изменения 297 МПа — от 61 (КТ77) до -236 МПа (КТ68) при $\sigma_{cp} = -99$ МПа, $s = 91$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{22} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 236 МПа — от -95 (КТ69) до 141 МПа (КТ64) при $\sigma_{cp} = 9$ МПа, $s = 74$ МПа и $N = 4$ (см. рис. 4, б). При $\Delta_n = 10$ мкм формируются σ_{22} с диапазоном изменения 260 МПа — от -126 (КТ78) до 134 МПа (КТ64) при $\sigma_{cp} = 7$ МПа, $s = 78$ МПа и $N = 2$. При $\Delta_n = 15$ мкм образуются σ_{22} , изменяющиеся в диапазоне 259 МПа — от -126 (КТ78) до 133 МПа (КТ64) при $\sigma_{cp} = -8$ МПа, $s = 78$ МПа и $N = 2$.

Напряжения σ_{12} при $\Delta_n = 5$ мкм изменяются в диапазоне 102 МПа — от 361 (КТ67) до 463 МПа (КТ62) при $\sigma_{cp} = 403$ МПа, $s = 29$ МПа и $N = 0$ (см. рис. 4, в). При $\Delta_n = 10$ мкм образуются σ_{12} ,

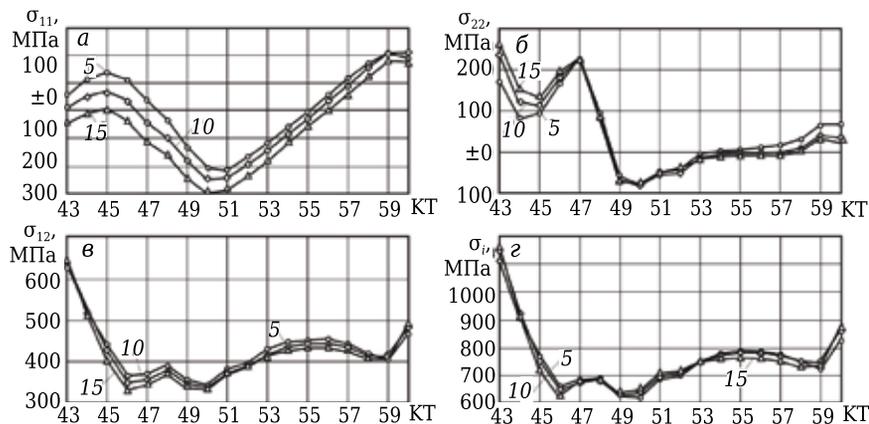


Рис. 3. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности МФМ в Si_3N_4 -TiC- Y_2O_3 -керамике

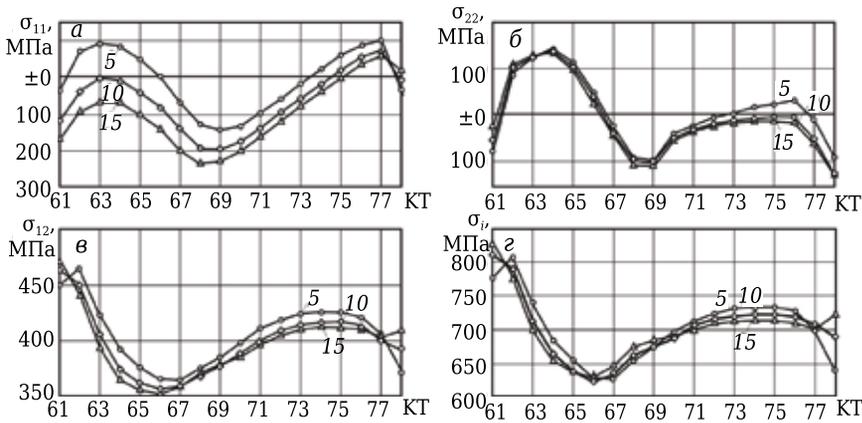


Рис. 4. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n (указана на кривых, мкм) на напряженное состояние поверхности М в $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC-Y}_2\text{O}_3$ -керамике

изменяющиеся в диапазоне 108 МПа — от 356 (КТ66) до 464 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 399$ МПа, $s = 30$ МПа и $N = 0$. При $\Delta_n = 15$ мкм формируются σ_{12} с диапазоном изменения 119 МПа — от 352 (КТ66) до 471 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 396$ МПа, $s = 31$ МПа и $N = 0$.

Интенсивность напряжений σ_i при $\Delta_n = 5$ мкм изменяется в диапазоне 178 МПа — от 629 (КТ66) до 807 МПа (КТ62) при $\sigma_{cp} = 703$ МПа, $s = 50$ МПа (см. рис. 4, г). При $\Delta_n = 10$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 187 МПа — от 624 (КТ66) до 811 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 700$ МПа, $s = 49$ МПа. При $\Delta_n = 15$ мкм σ_i изменяется в диапазоне 200 МПа — от 630 (КТ66) до 830 МПа (КТ61) при $\sigma_{cp} = 702$ МПа, $s = 48$ МПа.

Анализ результатов показывает, что влияние толщины покрытия на показатели неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностном слое керамики неоднозначно. Характер этого влияния зависит от состояния поверхности элементов нитридной керамики и расположения КТ на ней. В качестве примера на рис. 5 показаны зависимости изменения σ_i в КТ разных поверхностей структурных элементов нитридной керамики. Видно, что увеличение Δ_n с 5 до 15 мкм в КТ20 поверхности 3 приводит к возрастанию

σ_i в 1,2 раза (с 1161 до 1354 МПа), в КТ11 — к некоторому уменьшению (с 789 до 778 МПа), а в КТ16 σ_i практически не изменяется (см. рис. 5, а). В КТ42 поверхности МФЗ при увеличении Δ_n с 5 до 15 мкм значения σ_i увеличиваются в 1,1 раза (с 589 до 653 МПа), в КТ34 практически не изменяются, а в КТ38 уменьшаются с 755 до 732 МПа (см. рис. 5, б). В КТ43 поверхности МФМ σ_i увеличивается в 1,1 раза (с 1108 до 1164 МПа), в КТ47 напряжения σ_i практически не изменяются, в КТ45 уменьшаются с 765 до 720 МПа (см. рис. 5, в). В КТ61 поверхности М σ_i увеличиваются в 1,1 раза (с 779 до 830 МПа), в КТ70 практически не изменяются, в КТ73 уменьшаются от 731 до 714 МПа (см. рис. 5, г).

В систематизированном виде показатели структурной неоднородности σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в поверхностных элементах нитридной керамики с разной толщиной TiC-покрытия под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па приведены в таблице. Анализ приведенных данных показывает, что толщина покрытия оказывает сложное влияние на изменение напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики под действием распределенной силы. Наиболее чувствительным к увеличению толщины TiC-покрытия является напряжение σ_{11} . В поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М максимальные значения σ_{11} увеличиваются в 1,9, 1,4, 1,4 и 1,6 раза; диапазон изменения в 1,7, 1,1, 1,1 и 1,2 раза; средние значения в 16, 11, 3,8 и 11 раз и стандартное отклонение в 1,5, 1,04, 1,1 и 1,07 раза соответственно. Изменение Δ_n приводит к увеличению числа смен знака для напряжений σ_{11} в поверхностных 3 и МФМ с 1 до 4 и с 2 до 3 соответственно.

В МФЗ этот показатель не изменяется, а на поверхности М уменьшается с 4 до 2. Положительное влияние увеличения Δ_n проявляется также в изменении максимальных напряжений σ_{11} с растягивающих на сжимающие в поверхностном слое 3.

С увеличением толщины покрытия максимальные напряжения σ_{22} в поверхностных слоях 3 и МФМ увеличиваются в 1,4 и 1,1 раза. В МФЗ этот по-

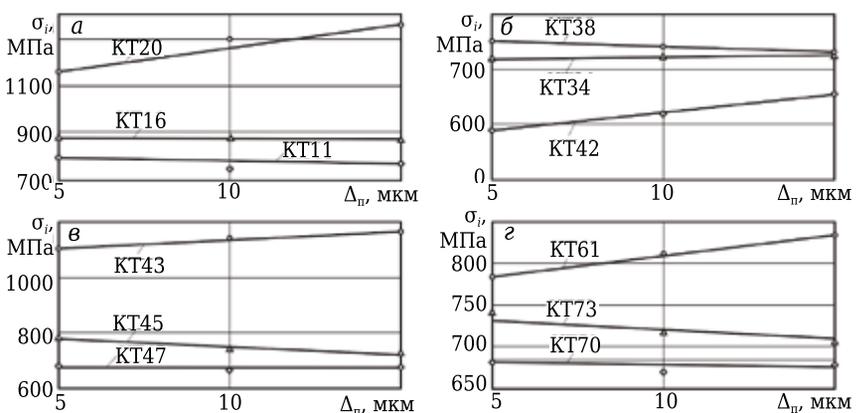


Рис. 5. Влияние толщины TiC-покрытия Δ_n на σ_i в КТ поверхностей 3 (а), МФЗ (б), МФМ (в) и М (г)

Показатели	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
<i>Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе (З)</i>												
Σ	256	376	427	377	519	672	217	306	346	382	528	584
σ_{\max}	161	-220	-309	-214	-288	-304	665	745	779	1161	1298	1354
σ_{\min}	-95	156	118	163	231	268	448	439	433	779	770	770
$\sigma_{\text{ср}}$	-7	-61	-112	22	18	23	521	542	552	907	951	976
N	1	4	4	6	4	2	0	0	0	-	-	-
s	77	107	119	70	96	58	70	106	122	124	183	209
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну (МФЗ)</i>												
Σ	340	348	364	369	364	359	124	127	121	214	207	225
σ_{\max}	-192	-234	-270	-209	-212	-209	447	439	441	776	764	776
σ_{\min}	148	114	94	160	152	150	323	312	302	562	557	551
$\sigma_{\text{ср}}$	-8	-53	-87	-9	-26	-26	384	383	382	676	677	679
N	4	4	4	4	4	4	0	0	0	-	-	-
s	112	111	117	103	102	89	42	40	40	69	65	65
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице (МФМ)</i>												
Σ	417	452	477	308	314	340	290	310	312	488	529	541
σ_{\max}	-211	-251	-293	234	236	265	633	650	651	1108	1150	1164
σ_{\min}	206	201	184	-74	-78	-75	343	340	339	620	621	623
$\sigma_{\text{ср}}$	17	-26	64	49	43	46	428	424	421	755	753	754
N	2	2	3	2	2	2	0	0	0	-	-	-
s	137	143	148	86	97	103	68	74	76	115	124	126
<i>Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе (М)</i>												
Σ	243	270	297	236	260	259	102	108	119	178	187	200
σ_{\max}	-145	-191	-236	141	134	133	463	464	471	807	811	830
σ_{\min}	98	79	61	-95	-126	-126	361	356	352	629	624	630
$\sigma_{\text{ср}}$	-9	-60	-99	9	7	-8	403	399	396	703	700	702
N	4	4	2	4	2	2	0	0	0	-	-	-
s	85	84	91	74	78	78	29	30	31	50	49	48

казатель не изменяется, а в М уменьшается в 1,1 раза. Диапазон изменения σ_{22} увеличивается в 3, МФМ и М в 1,8, 1,1 и 1,1 раза, в МФЗ этот показатель уменьшается в 1,03 раза. Увеличиваются средние значения σ_{22} в МФЗ в 3 раза, а в 3, МФМ и М средние значения σ_{22} практически не изменяются. Стандартное отклонение σ_{22} в 3 и МФЗ уменьшается в 1,2 и 1,2 раза, в МФМ этот показатель увеличивается в 1,2 раза, а в М практически не изменяется. Изменение толщины покрытия уменьшает число смен знака σ_{22} в 3 и М с 6 до 2 и с 4 до 2 соответственно.

С увеличением Δ_n увеличиваются максимальные значения σ_{12} в 3 в 1,2 раза, в МФЗ, МФМ и М этот показатель практически не изменяется. Диапазон изменения σ_{12} увеличивается в 3, МФМ и М в 1,6, 1,1 и 1,2 раза, в МФЗ этот показатель уменьшается в 1,02 раза. Средние значения σ_{12} в 3 увеличиваются в 1,06 раза, а в МФМ, МФЗ и М практически не изменяются, имея тенденцию к уменьшению. Стандартное отклонение σ_{12} в 3 и МФМ увеличивается в 1,7 и 1,1 раза, а в МФЗ и М этот показатель практически не изменяется.

Увеличение толщины покрытия приводит к увеличению максимальных значений интенсивности напряжений σ_i в 3, МФМ и М в 1,2, 1,05 и 1,03 раза, в МФЗ $\sigma_{i\max}$ не изменяются. Диапазон изменения σ_i увеличивается в 3, МФЗ, МФМ и М в 1,5, 1,05, 1,1 и 1,1 раза. Средние значения σ_i

в 3 увеличиваются в 1,1 раза, а в МФМ, МФЗ и М практически не изменяются. Стандартное отклонение σ_i в 3 и МФМ увеличивается в 1,7 и 1,1 раза, а в МФЗ и М этот показатель практически не изменяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных численных экспериментов установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм приводит к сложной трансформации напряженного состояния поверхностного слоя керамики системы Si_3N_4 -TiC- Y_2O_3 под действием распределенной силовой нагрузки. Выявлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к повышению показателей неоднородности σ_i и неоднозначному изменению показателей неоднородности σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} в поверхностном слое нитридной керамики. Столь сложный характер влияния толщины TiC-покрытия на изменение напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики под действием распределенной силы требует его более детального изучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения 14-29-00297 от 6 августа 2014 г..

Библиографический список

1. **Pakuła, D.** Structure and properties of the Si₃N₄ nitride ceramics with hard wear resistant coatings / *D. Pakuła, L. A. Dobrzański, K. Gołombek [et al.] // J. Materials Processing Technology.* — 2004. — Vol. 157/158. — P. 388–393.
2. **Supancic, P.** Strength tests on silicon nitride balls / *P. Supancic, R. Danzer, W. Harrer [et al.] // Key Engineering Materials.* — 2009. — Vol. 409. — P. 193–200.
3. **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.
4. **Telle, R.** Design, construction and performance of silicon nitride tool parts in steel thixoforming / *R. Telle, S. Muenstermann, C. Beyer // Solid State Phenomena.* — 2006. — Vols. 116/117. — P. 690–695.
5. **Huang, Y.** Flexure creep behaviors of Si₃N₄/BN laminated ceramic composites produced by rollin / *Y. Huang, S. K. Zhao, C. W. Li [et al.] // Key Engineering Materials.* — 2003. — Vol. 249. — P. 15–24.
6. **Tian, X.** Friction and wear characteristics of SiC and Si₃N₄ ceramics against ZrO₂ ceramic under dry friction / *X. Tian, B. Lin, W. L. Zhang // Key Engineering Materials.* — 2005. — Vols. 280–283. — P. 1319–1322.
7. **Danzer, R.** Silicon nitride tools for hot rolling of high-alloyed steel and superalloy wires / *R. Danzer, M. Lengauer, D. Rubeša [et al.] // Key Engineering Materials.* — 2009. — Vol. 409. — P. 43–54.
8. **Kuzin, V.** Designing of detailstaking into account degradation of structural ceramics at exploitation / *V. Kuzin, S. Grigoriev, M. Volosova, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials.* — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.
9. **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.
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 // Refractories and Industrial Ceramics.* — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.
10. **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.
11. **Балохонов, Р. Р.** Иерархическое моделирование неоднородной деформации и разрушения материалов композиционной структуры / *Р. Р. Балохонов // Физическая мезомеханика.* — 2009. — Т. 12, № 5. — С. 45–55.
12. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / *С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [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, D. Burton [et al.] // Russian Engineering Research.* — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.
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. **Grigoriev, S.** The stress-strained state of ceramic tools with coating / *S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton, D. Batako // Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference 2013.* — С. 181–184.
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. **Zhijian, P.** Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma / *P. Zhijian, M., Hezhuo, W. Wei [et al.] // Surface and Coatings Technology.* — 2003 — Vol. 166, № 2. — P. 183–188.
18. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated Si₃N₄ ceramic tools in turning grey cast iron / *V. Kuzin, S. Grigoriev // Key Engineering Materials.* — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.
19. **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.
20. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия. Вариант нагружения — сосредоточенная силовая нагрузка / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры.* — 2016. — № 8. — С. 59–65.
21. **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 07.09.16

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова, 2016 г.