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 ТІС-ПОКРЫТИЯ. ВАРИАНТ НАГРУЖЕНИЯ — КОМБИНИРОВАННАЯ НАГРУЗКА

В результате выполненных численных экспериментов выявлено благоприятное влияние толщины покрытия из карбида титана на трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамики. Установлено, что увеличение толщины TiC-покрытия приводит к стабильному уменьшению  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностном слое основных структурных элементов.

**Ключевые слова:** нитридная керамика, покрытие, структурная неоднородность напряжений, комбинированная нагрузка, поверхностный слой.

## введение

конструктивные элементы из нитридной кера-мики, обладающие повышенной стабильностью при температурах выше 1000 °С, имеют важное значение для высокотемпературной техники [1-4]. Для их лучшей адаптации к определенным эксплуатационным нагрузкам применяют функциональные покрытия [5-7]. Однако проектирование таких керамических деталей затруднено из-за необходимости создания оригинального композиционного материала со сложным комплексом поверхностных свойств [8]. Накопленный опыт по созданию и применению инструментов из нитридной керамики с покрытием доказал высокую результативность целевого проектирования системы керамика – покрытие с учетом определенных условий эксплуатации [9-11]. Успешная реализации этого подхода предполагает детальное изучение поведения системы керамика – покрытие под действием тепловых и силовых нагрузок, а также выявление взаимосвязи напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики с причинами отказов сложно нагруженных конструктивных элементов [12].

Развитие системы термопрочностых расчетов керамических материалов, созданной на основе их микроструктурной модели [13–15], открывает новые возможности при проведении фундаментальных и прикладных исследований, а также позволяет идентифицировать наиболее «слабые звенья» в керамике — локальные области высоких напряжений, инициирующих разрушение композиционного материала при эксплуатации [16, 17]. Основные

> ⊠ В. В. Кузин E-mail: kyzena@post.ru

результаты исследований, в которых учитывались характер внешнего воздействия, свойства TiNпокрытия, а также размеры, форма и свойства основных структурных элементов оксидно-карбидной керамики, приведены в статьях [18–22]. Важные закономерности трансформации напряженного состояния поверхностного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–TiC–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>керамики при изменении толщины TiC-покрытия под действием силовой и тепловой нагрузок проанализированы в статьях [23–25]. В настоящей работе исследована трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики под действием комбинированной нагрузки при изменении толщины TiC-покрытия с 5 до 15 мкм.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления и анализа структурной неоднородности напряжений о11, о22, о12 и интенсивности напряжений о, в поверхностном слое нитридной керамики с разной толщиной покрытия под действием внешней нагрузки использовали методику, приведенную в статье [23]. Исследовали неоднородность напряжений в керамике системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с покрытием из TiC толщиной 5, 10 и 15 мкм, контактирующим со слоем чугуна СЧЗ2 толщиной 1 мкм. К поверхности конструкции приложена комбинированная нагрузка: F = 0.1 H:  $P = 4.0 \cdot 10^8$  Па и  $O = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> при теплоотводе с коэффициентом  $h = 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>-град). Для анализа результатов расчета  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  использовали метод контрольных точек (КТ) [26]. Выбранные КТ расположены в поверхностных слоях основных структурных элементов керамики — поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (3), поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну (МФЗ), поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице (МФМ), и поверхности матрицы,

примыкающей к межзеренной фазе (М). Структурную неоднородность напряжений в поверхностных слоях элементов керамики характеризовали следующими статистическими показателями: наибольшее  $\sigma_{\text{макс}}$ , наименьшее  $\sigma_{\text{мин}}$  и среднее  $\sigma_{\text{ср}}$  значения, диапазон изменения  $\Sigma$ , стандартное отклонение *s* и число *N* изменения знака для  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием комбинированной нагрузки поверхностный слой керамики системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с покрытием из TiC разной толщины деформируется по однотипной схеме — «расплющенное» зерно вдавливается в матрицу. При этом толщина покрытия оказывает существенное влияние на уровень упругих деформаций. Рассмотрим основные результаты численных экспериментов, подтверждающих этот тезис.

Результаты расчетов  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхности 3 под действием комбинированной нагрузки показаны на рис. 1. Установлено, что напряжения  $\sigma_{11}$  при толщине покрытия  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 754 МПа — от 358 (КТ23) до -396 МПа (КТ10) при  $\sigma_{cp} = -110$  МПа, s = 244 МПа и N = 1 (рис.



**Рис. 1.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя 3 в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; толщина покрытия  $\Delta_{\pi}$  указана на кривых, мкм



**Рис. 2.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного при  $\sigma_{cp} = -209$  МПа, s = 87 слоя МФЗ в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; толщина покрытия  $\Delta_{\pi}$  указана на кривых, мкм МПа и N = 0.

1, *а*). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм образуются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 679 МПа — от 270 (КТ23) до -409 МПа (КТ10) при  $\sigma_{cp} = -177$  МПа, s = 224 МПа и N = 1. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются  $\sigma_{11}$  с диапазоном изменения 630 МПа — от 222 (КТ23) до -408 МПа (КТ12) при  $\sigma_{cp} = -205$  МПа, s = 216 МПа и N = 1.

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 1299 МПа от 296 МПа (КТ23) до -1003 МПа (КТ19) при  $\sigma_{cp} = -291$  МПа, s = 310 МПа и N = 3 (рис. 1, б). При  $\Delta_n = 10$  мкм в поверхностном слое зерна формируются  $\sigma_{22}$  с диапазоном изменения 1154 МПа — от 369 (КТ23) до -785 МПа (КТ18) при  $\sigma_{cp} = -207$  МПа, s = 237 МПа и N = 1. При  $\Delta_n = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 1102 МПа — от 437 (КТ23) до -665 МПа (КТ18) при  $\sigma_{cp} = -165$  МПа, s = 221 МПа и N = 1.

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 757 МПа — от 296 (КТ8) до 1053 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 517$  МПа, s = 193 МПа и N = 0(рис. 1, в). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 642 МПа — от 273 (КТ8) до 915 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 457$  МПа, s = 178 МПа и N == 0. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$ , которые изменяются в диапазоне 601 МПа — от 248 (КТ8) до

849 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 414$ МПа, s = 175 МПа и N = 0.

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяется в диапазоне 1288 МПа — от 562 (КТ5) до 1850 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 984$  МПа, s = 382 МПа (рис. 1, г). При  $\Delta_n = 382$  МПа (рис. 1, г). При  $\Delta_n = 10$  мкм диапазон изменения  $\sigma_i$  составляет 1042 МПа — от 554 (КТ8) до 1596 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 866$  МПа, s = 314 МПа. При  $\Delta_n = 15$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 952 МПа — от 520 (КТ8) до 1472 МПа (КТ22) при  $\sigma_{cp} = 792$  МПа, s = 290 МПа. Результаты расчетов  $\sigma_{11}$ ,

 $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхности МФЗ показаны на рис. 2. Установлено, что напряжения  $\sigma_{11}$ при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 478 МПа — от 113 (КТ27) до -365 МПа (КТ34) при σ<sub>ср</sub> = -126 МПа, *s* = 153 МПа и N = 2 (рис. 2, *a*). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм формируются σ<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне 335 МПа — от -21 (КТ28) до –356 МПа (КТЗЗ) при  $\sigma_{cp}$  = = -184 МПа, *s* = 106 МПа и N = 0. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются σ<sub>11</sub> с диапазоном изменения 275 МПа — от -76 (КТ28) до -351 МПа (КТ33)

54

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяются в диапазоне 713 МПа — от 159 (КТ26) до -554 МПа (КТ42) при  $\sigma_{cp} = -221$  МПа, s = 193 МПа и N = 4 (рис. 2, б). При  $\Delta_n = 10$  мкм формируются  $\sigma_{22}$  с диапазоном изменения 422 МПа — от -40 (КТ29) до -462 МПа (КТ42) при  $\sigma_{cp} = -218$  МПа, s = 99 МПа и N == 0. При  $\Delta_n = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 361 МПа — от -51 (КТ29) до -412 МПа (КТ42) при  $\sigma_{cp} = -196$  МПа, s = 87 МПа и N = 0.

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 214 МПа — от 218 (КТ29) до 432 МПа (КТ37) при  $\sigma_{cp} = 325$  МПа, s = 76 МПа и N = 0 (рис. 2, е). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм формируются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 172 МПа — от 176 (КТ42) до 348 МПа (КТ37) при  $\sigma_{cp} = 274$  МПа, s = 57 МПа и N = 0. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются напряжения с диапазоном изменения 157 МПа — от 141 (КТ42) до 298 МПа (КТ36) при  $\sigma_{cp} = 237$  МПа, s = 49 МПа и N = 0.

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  в этом поверхностном слое при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяется в диапазоне 420 МПа — от 380 (КТ29) до 800 МПа (КТ38) при  $\sigma_{cp} = 631$  МПа, s = 132 МПа (рис. 2, г). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм диапазон изменения  $\sigma_i$  составляет 320 МПа — от 332 (КТ29) до 652 МПа (КТ34) при  $\sigma_{cp} = 532$  МПа, s = 96 МПа. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диа-

пазоне 273 МПа — от 299 (КТ29) до 572 МПа (КТ34) при  $\sigma_{\rm cp}$  = 470 МПа, s = = 84 МПа.

Результаты расчетов σ<sub>11</sub>, σ<sub>22</sub>, σ<sub>12</sub> и σ<sub>i</sub> в поверхностном слое МФМ показаны на рис. З. При  $\Delta_{\pi} = 5$ мкм в этом слое формируются напряжения о<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне 511 МПа — от 126 (КТ60) до –385 МПа (КТ51) при  $\sigma_{cp}$  = = -118 МПа, *s* = 176 МПа и N = 2 (рис. 3, *a*). При Δ<sub>п</sub> = = 10 мкм образуются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 420 МПа — от 45 (КТ60) до -375 МПа (КТ51) при  $\sigma_{cp}$  = = -165 МПа, *s* = 140 МПа и *N* = 1. При  $\Delta_{\pi}$  = 15 мкм формируются  $\sigma_{11}$  с диапазоном изменения 378 МПа — от 7 (КТ60) до -371 МПа (КТ50) при σ<sub>ср</sub> = -184 МПа, s = 120 МПа и N = 1.

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_n =$ = 5 мкм изменяются в диапазоне 460 МПа — от 32 (КТ47) до -428 МПа (КТ60) при  $\sigma_{cp} = -216$  МПа, s = 136МПа и N = 2 (рис. 3,  $\delta$ ). При  $\Delta_n = 10$  мкм формируются  $\sigma_{22}$ с диапазоном изменения 414 МПа — от 105 (КТ43) до -309 МПа (КТ60) при  $\sigma_{cp} = -169$  МПа, s = 106 МПа и N = 1. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 442 МПа — от 199 (КТ43) до -243 МПа (КТ60) при  $\sigma_{cp} = -127$  МПа, s = 103 МПа и N = 1.

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 302 МПа — от 227 (КТ47) до 529 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 366$  МПа, s = 83 МПа и N = 0 (рис. 3, е). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 257 МПа — от 204 (КТ47) до 461 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 315$  МПа, s = 64 МПа и N = 0. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$  с диапазоном изменения 219 МПа — от 182 (КТ46) до 401 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 278$  МПа, s = 53 МПа и N = 0.

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_n = 5$  мкм изменяется в диапазоне 512 МПа — от 403 (КТ47) до 918 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 692$  МПа, s = 150 МПа (рис. 3, *г*). При  $\Delta_n = 10$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 439 МПа — от 371 (КТ46) до 810 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 592$  МПа, s = 109 МПа. При  $\Delta_n = 15$  мкм  $\sigma_i$ изменяется в диапазоне 408 МПа — от 328 (КТ46) до 736 МПа (КТ43) при  $\sigma_{cp} = 527$  МПа, s = 94 МПа.

Результаты расчетов  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностном слое М показаны на рис. 4. Установлено, что при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм в этом слое формируются  $\sigma_{11}$ , изменяющиеся в диапазоне 553 МПа — от



**Рис. 3.** Влияние толщины TiC-покрытия на напряженное состояние поверхностного слоя  $M\Phi M$  в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-керамике; толщина покрытия  $\Delta_{n}$  указана на кривых, мкм





-139 (КТ68) до 414 МПа (КТ61) при  $\sigma_{cp}$  = 129 МПа, *s* = 169 МПа и *N* = 3 (рис. 4, *a*). При Δ<sub>п</sub> = 10 мкм образуются σ<sub>11</sub>, изменяющиеся в диапазоне 492 MПа — от -169 (КТ67) до 323 МПа (КТ62) при σ<sub>ср</sub> = 128 МПа, *s* = 153 МПа и *N* = 3. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм формируются  $\sigma_{11}$  с диапазоном изменения 461 MПа — от -184 (КТ67) до 277 МПа (КТ62) при σ<sub>ср</sub> = 128 МПа, *s* = 150 МПа и *N* = 3.

Напряжения  $\sigma_{22}$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 595 МПа — от 276 (КТ66) до -319 МПа (КТ75) при  $\sigma_{cp}$  = -76 МПа, s = 222 МПа и N = 1 (рис. 4, б). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм формируются  $\sigma_{22}$  с диапазоном изменения 507 МПа — от -183 (КТ73) до 324 МПа (КТ66) при σ<sub>ср</sub> = -23 МПа, *s* = 167 МПа и *N* = = 2. При  $\Delta_{\pi}$  = 15 мкм образуются  $\sigma_{22}$ , изменяющиеся в диапазоне 471 МПа — от -121 (КТ61) до 350 МПа (КТ66) при  $\sigma_{cp} = 22$  МПа, s = 154 МПа и N = 3.

Напряжения  $\sigma_{12}$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяются в диапазоне 401 МПа — от 102 (КТ65) до 503 МПа (КТ69) при σ<sub>ср</sub> = 313 МПа, *s* = 128 МПа и *N* = 0 (рис. 4, в). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм образуются  $\sigma_{12}$ , изменяющиеся в диапазоне 469 МПа — от 37 (КТ65) до 506 МПа (КТ69) при σ<sub>ср</sub> = 248 МПа, *s* = 144 МПа и *N* = 0. При  $\Delta_{\pi} = 15$  мкм формируются  $\sigma_{12}$  с диапазоном изменения 480 МПа — от 9 (КТ65) до 489 МПа (КТ69) при  $\sigma_{cp} = 207 \text{ MПа}, s = 152 \text{ МПа и } N = 0.$ 

Интенсивность напряжений  $\sigma_i$  при  $\Delta_{\pi} = 5$  мкм изменяется в диапазоне 609 МПа — от 262 (КТ65) до 871 МПа (КТ69) при  $\sigma_{\rm cp} = 642$  МПа, s = 190 МПа (рис. 4, *г*). При  $\Delta_{\pi} = 10$  мкм  $\sigma_i$  изменяется в диапазоне 664 МПа — от 210 (КТ65) до 874 МПа (КТ69) при σ<sub>ср</sub> = 529 МПа, *s* = 219 МПа. При Δ<sub>п</sub> = 15 мкм σ<sub>i</sub> изменяется в диапазоне 731 МПа — от 119 (КТ77) до 850 МПа (КТ69) при σ<sub>ср</sub> = 467 МПа, s = 232 МПа.

Зависимости, характеризующие общую тенденцию влияния толщины покрытия на трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины TiC-покрытия под действием комбинированной нагрузки, показаны на рис. 5. Видно, что о, уменьшается в КТ разных поверхностных слоев структурных элементов нитридной керамики при увеличении толщины покрытия, причем степень этого влияния изменяется в достаточно широком диапазоне, зависящем от поверхности структурного элемента керамики и расположения КТ.

Например, в поверхностном слое 3 (рис. 5, а) о; изменяются следующим образом: в КТ6, КТ11 и КТ19 значения о<sub>i</sub> уменьшаются в 1,1, 1,3 и 1,4 раза соответственно при увеличении  $\Delta_{\pi}$  с 5 до 15 мкм. В КТЗ1 поверхностного слоя МФЗ значения о, практически не изменяются (рис. 5, б), а в КТЗЗ и КТЗ8 *σ*<sup>*i*</sup> уменьшаются в 1,1 и 1,5 раза соответственно. В КТ48 поверхностного слоя МФМ значения *σ*<sub>i</sub> практически не изменяются (рис. 5, в), а в КТ51 и КТ57 *σ*<sup>*i*</sup> уменьшаются в 1,2 и 1,5 раза соответственно. Наиболее чувствителен к изменению о, поверхностный слой М (рис. 5, г): значения о, в нем уменьшаются в 1.3. 1.8 и 4.0 раза в КТ65. КТ75 и КТ77 соответственно при увеличении  $\Delta_{\pi}$  с 5 до 15 мкм.

В систематизированном виде показатели структурной неоднородности  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностных слоях основных структурных элементов нитридной керамики с ТіС-покрытием разной толщины под действием комбинированной нагрузки приведены в таблице. Анализ табличных данных подтверждает существенное влияние толщины TiC-покрытия на изменение напряженного состояния поверхностного слоя керамики под действием комбинированной нагрузки.

Видно, что с увеличением  $\Delta_{\pi}$  с 5 до 15 мкм диапазон изменения  $\sigma_{11}$  в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М уменьшается в 1,2, 1,7, 1,4 и 1,2 раза; стандартное отклонение  $\sigma_{11}$  уменьшается в 1,05, 1,8, 1,5 и 1,1 раза соответственно; максимальные значения о11 в поверхностных слоях МФЗ, МФМ и М уменьшаются в 1,05, 1,05 и 1,5 раза соответственно (в поверхностном слое 3 изменения практически отсутствуют); средние значения σ<sub>11</sub> в поверхностных слоях 3, МФЗ и МФМ увеличиваются в 1,9, 1,7 и 1,6 раза соответственно (в поверхностном слое М изменения отсутствуют).

> Увеличение  $\Delta_{\pi}$  приводит к уменьшению числа смен знака  $\sigma_{11}$  в поверхностном слое МФЗ с 2 до 0, а МФМ с 2 до 1; в поверхностных слоях З и М о<sub>11</sub> не изменяет знака.

Увеличение  $\Delta_{\pi}$  с 5 до 15 мкм приводит к уменьшению в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М: диапазона изменения σ<sub>22</sub> в 1,2, 2,0, 1,05 и 1,3 раза; среднего значения σ<sub>22</sub> в 1,8, 1,1, 1,7 и 3,5 раза; стандартного отклонения σ<sub>22</sub> в 1,4, 2,2, 1,3 и 1,4 раза соответственно. При этом максимальные значения  $\sigma_{22}$  в поверхност-



σ,,

МΠа

1400

1200

1000

800

600

400

σ,,

800

700

600

500

400

МΠа

**KT19** 

KT11

KT6

KT57

KT51

**KT48** 

10

10

	σ <sub>11</sub>			σ <sub>22</sub>			<b>σ</b> <sub>12</sub>			σ		
Показатели				при толщине покрытия Δ <sub>п</sub> , мкм								
	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе (3)												
Σ	754	679	630	1299	1154	1102	757	642	601	1288	1042	952
$\sigma_{\text{makc}}$	-396	-409	-408	-1003	-785	-665	1053	915	849	1850	1596	1472
$\sigma_{\rm MHH}$	358	270	222	296	369	437	296	273	248	562	554	520
$\sigma_{\rm cp}$	-110	-177	-205	-291	-207	-165	517	457	414	984	866	792
Ν	1	1	1	3	1	1	0	0	0	-	-	-
S	224	224	216	310	237	221	193	178	175	382	314	290
Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну (МФЗ)												
Σ	478	335	275	713	422	361	214	172	157	420	320	273
σмакс	-365	-356	-351	-554	-462	-412	432	348	298	800	652	572
$\sigma_{\rm muh}$	113	-21	-76	159	-40	-51	218	176	141	380	332	299
$\sigma_{\rm cp}$	-126	-184	-209	-221	-218	-196	325	274	237	631	532	470
N	2	0	0	4	0	0	0	0	0	-	-	-
S	153	106	87	193	99	87	76	57	49	132	96	84
Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице (МФМ)												
Σ	511	420	378	460	414	442	302	257	219	512	439	408
$\sigma_{\text{макс}}$	-385	-375	-371	-428	-309	-243	529	461	401	918	810	736
$\sigma_{\rm muh}$	126	45	7	32	105	199	227	204	182	403	371	328
$\sigma_{\rm cp}$	-118	-165	-184	-216	-169	-127	366	315	278	692	592	527
N	2	1	1	2	1	1	0	0	0	-	-	-
S	176	140	120	136	106	103	83	64	53	150	109	94
Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе (М)												
Σ	553	492	461	595	507	471	401	469	480	609	664	731
$\sigma_{\text{makc}}$	414	323	277	-319	324	350	503	506	489	871	874	850
$\sigma_{\rm muh}$	-139	-169	-184	276	-183	-121	102	37	9	262	210	119
$\sigma_{cp}$	129	128	128	-76	-23	22	313	248	207	642	529	467
N	3	3	3	1	2	3	0	0	0	-	-	-
S	169	153	150	222	167	154	128	144	152	190	219	232

ных слоях 3, МФЗ и МФМ уменьшаются в 1,5, 1,3 и 1,8 раза соответственно, а в поверхностном слое М — максимальное значение  $\sigma_{22}$ увеличивается в 1,1 раза. Уменьшается число смен знака  $\sigma_{22}$  также в поверхностных слоях 3, МФЗ и МФМ с 3 до 1, с 4 до 0 и с 2 до 1 соответственно при увеличении  $\Delta_{\pi}$ . Однако в поверхности М число смен знака  $\sigma_{22}$ увеличивается с 1 до 3.

С увеличением  $\Delta_n$  с 5 до 15 мкм максимальное значение  $\sigma_{12}$  в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М уменьшается в 1,2, 1,4, 1,3 и 1,03 раза, среднее значение  $\sigma_{12}$  уменьшается в 1,2, 1,4, 1,3 и 1,5 раза соответственно. Диапазон изменения  $\sigma_{12}$  в поверхностных слоях 3, МФЗ и МФМ уменьшается в 1,3, 1,4 и 1,4 раза соответственно, а в поверхностном слое М увеличивается в 1,2 раза. Стандартное отклонение  $\sigma_{12}$  в поверхностных слоях 3, МФЗ и МФМ уменьшается в 1,1, 1,6 и 1,6 раза соответственно, а в поверхностном слое М увеличивается в 1,2 раза. На число смен знака  $\sigma_{12}$  изменение толщины покрытия влияние не оказывает.

Увеличение  $\Delta_{\pi}$  с 5 до 15 мкм приводит к уменьшению максимального значения  $\sigma_i$  в поверхностных слоях 3, МФЗ, МФМ и М в 1,3, 1,4, 1,2 и 1,02 раза и среднего значения  $\sigma_i$  в 1,2, 1,3, 1,3 и 1,4 раза соответственно. В поверхностных слоях 3, МФЗ и МФМ уменьшается диапазон изменения  $\sigma_i$  в 1,4, 1,5 и 1,3 раза, стандартное отклонение  $\sigma_i$  уменьшается в 1,3, 1,6 и 1,6 раза соответственно. В поверхностном слое М диапазон изменения и стандартное отклонение о, увеличивается 1,2 раза.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных численных экспериментов установлено, что увеличение толщины ТіС-покрытия от 5 до 15 мкм при одновременном действии силовой и тепловой нагрузок приводит к благоприятной трансформации напряженного состояния поверхностного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>керамики. Это проявляется в стабильном уменьшении  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и  $\sigma_i$  в поверхностях 3, МФЗ, МФМ и М. Более сложным образом изменяются их максимальные, средние и минимальные значения, а также диапазоны изменения, стандартное отклонение и число смен знака при увеличении толщины покрытия, причем характер этого изменения зависит от структурного элемента керамики и расположения КТ в его поверхностном слое. Значения большинства показателей неоднородности  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  и о, уменьшаются с увеличением толщины покрытия. Этот факт позволяет предположить, что изделия из нитридной керамики с ТіС-покрытием толщиной 15 мкм будут иметь больший эксплуатационный ресурс по сравнению с изделиями, на поверхности которых имеется ТіС-покрытие толщиной 5 мкм.

\* \* \*

Настоящая работа поддерживается Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания МГТУ «СТАНКИН» в сфере научной деятельности (регистрационный номер проекта 9.1372.2017).

#### Библиографический список

1. *Huang, Changming*. Study on friction characterization and wear-resistance properties of  $Si_3N_4$  ceramic sliding against different high-temperature alloys / *Changming Huang, Bin Zou, Yanan Liu* [et al.] // Ceramics International. — 2016. — Vol. 42, № 15. — P. 17210–17221.

2. **Nakatani**, **M.** Oxidation behaviour of  $Si_3N_4/Y_2O_3$  system ceramics and effect of crack-healing treatment on oxidation / *M. Nakatani*, *K. Ando*, *K. Houjou* // J. Europ. Ceram. Soc. -2008. -Vol. 28, N = 6. -P. 1251-1257.

3. *Zheng, Guangming.* Thermal shock and thermal fatigue resistance of Sialon–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> graded composite ceramic materials / *Guangming Zheng, Jun Zhao, Chao Jia* [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. -2012. - Vol. 35. - P. 55–61.

4. *Lin, H. T.* Characterization of mechanical reliability of silicon nitride microturbine rotor / *H. T. Lin, M. K. Ferber* // Key Engineering Materials. — 2005. — Vol. 287. — P. 393–403.

5. *Zuo, Kai-hui.* The mechanical and dielectric properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based sandwich ceramics / *Kai-hui Zuo, Yu-ping Zeng, Dongliang Jiang //* Materials & Design. — 2012— Vol. 35. — P. 770–773.

6. *Xing, Youqiang.* Fabrication and dry cutting performance of  $Si_3N_4$ /TiC ceramic tools reinforced with the PVD WS<sub>2</sub>/Zr soft-coatings / *Youqiang Xing, Jianxin Deng, Kedong Zhang* [et al.] // Ceramics International. — 2015. — Vol. 41, No 8. — P. 10261–10271.

7. *Minatto, F. D.* Multilayered ceramic composites : a review / *F. D. Minatto, P. Milak, E. S. Gislon* [et al.] // Materials Science Forum. — 2015. — Vol. 820. — P. 393–398.

8. *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.

*Grigor'ev, S. N.* Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / *S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin //* Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

9. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, М. Ю. Фёдоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46-50.

*Kuzin, V. V.* Tooling for high-speed cutting / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, M. Yu. Fedorov* [et al.] / Russian Engineering Research. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.

10. Kuzin, V. Tool life and wear mechanism of coated  $Si_3N_4$  ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigor'ev // Key Engineering Materials. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.

11. *Grigoriev, S.* The stress-strained state of ceramic tools with coating / *S. Grigor'ev, V. Kuzin, D. Burton, D. Batako //* Proceedings of the 37th International Conference MATADOR. — 2012–2013. — P. 181–184.

12. *Kuzin, V.* Applications of multi-level method of stress-strain state analysis in ceramic tools design / *V. Kuzin, S. Grigor'ev, M. Fedorov //* Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 173–176.

13. Григорьев, С. Н. Автоматизированная система термопрочностных 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

**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.

14. **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, No 5. - P. 479-483.

15. **Кузин, В. В.** Математическая модель напряженнодеформированного 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.

16. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 6. — С. 728-734.

*Kuzin, V. V.* The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 1. Macrolevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova //* J. Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.

17. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 1. — С.50-55.

**Kuzin, V. V.** Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. Yu. Fedorov // J. Friction and Wear. -2015. - Vol. 36,  $N \ge 1. - P. 40-44$ .

18. **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 tinaium 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.

19. **Волосова, М. А.** Влияние покрытия из нитрида титана на структурную неоднородность напряжений в оксидно-карбидной керамике. Часть З. 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.

20. 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, N $_{2}$  1. - P. 91–96.

21. **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, No 2, — P. 197–200.

22. **Кузин, В. В.** Влияние покрытия ТіС 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 stressstrain 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, No 5. -P. 376-380.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

23. **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.

**Kuzin, V. V.** Transformation of the stressed state of a surface layer of nitride ceramic with a change in TiC-coating thickness. Loading version — concentrated force load / V. V. Kuzin, M. Yu. Fedorov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57,  $\mathbb{N} \oplus 4$ . — P. 427–433.

24. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины ТіС-покрытия. Вариант нагружения — распределенная силовая нагрузка / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 10. — С. 58-63.

25. **Кузин, В. В.** Трансформация напряженного состояния поверхностного слоя нитридной керамики при изменении толщины ТіС-покрытия. Вариант нагружения — тепловой поток / *В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 58-63.

26. *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 06.10.16 © В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров, М. А. Волосова, 2017 г.

<sup>&</sup>lt;image><section-header>