

Д. т. н. **В. В. Кузин**¹ (✉), к. т. н. **М. Ю. Фёдоров**¹, к. т. н. **Предраг Дашич**²

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² SaTCIP Publisher Ltd, г. Врнячка Баня, Сербия

УДК 621.778.1.073:666.3]:669.018.25

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ СЛОЯМИ TiC/TiN-ПОКРЫТИЯ, НАНЕСЕННОГО НА НИТРИДНУЮ КЕРАМИКУ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Установлены основные закономерности напряженного состояния границы между слоями двухслойного TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием сосредоточенной и распределенной силы. Определено влияние материала основного структурного элемента керамики на напряжения, формируемые в контактирующих подслоях TiC/TiN-покрытия, под действием силовых нагрузок.

Ключевые слова: нитридная керамика, покрытие, слой, граница, напряжения, силовая нагрузка.

ВВЕДЕНИЕ

Присутствие тонких слоев из тугоплавких соединений на поверхности керамики благоприятно влияет на эксплуатационные характеристики керамических инструментов, причем наиболее эффективны многослойные покрытия [1–5]. Несмотря на относительную простоту этого метода совершенствования инструментов, ряд его аспектов остается недостаточно изученным. Это связано с многофакторностью процесса разрушения покрытия на керамике, что определяет повышенный научный интерес к его исследованию с использованием экспериментальных и расчетных методик.

Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что правильный выбор свойств покрытий и оптимизация технологических параметров их нанесения обеспечивают повышение стойкости керамических инструментов [6]. На выход этих инструментов из работоспособного состояния значительное влияние оказывает процесс разрушения покрытия [7]. Авторы работы [8] выделили основные причины разрушения покрытий на керамике в разных условиях эксплуатации. Установлено, что одной из основных причин разрушения покрытий и отслоения их от керамики являются высокие напряжения, образующиеся на границах между керамикой и покрытием, а также между слоями покрытия, под действием нагрузок, ге-

нерируемых процессом резания [9]. На основе экспериментальных результатов исследования роста трещин в покрытиях на рабочих поверхностях инструментов создан метод расчета циклической трещиностойкости многослойных покрытий для выбора их оптимальных параметров [10].

С использованием метода микроструктурного моделирования деформационных процессов в структурно-неоднородных средах выявлены основные закономерности влияния покрытия из нитрида титана на напряженное состояние оксидно-карбидной керамики под действием силовых, тепловых и комбинированных нагрузок [11–14]. Установлено, что TiN-покрытие толщиной 5 мкм принципиально не изменяет схему деформирования структурных элементов керамики, но уменьшает напряжения в их поверхностном слое и сокращает диапазон их изменения.

Роль теплопроводности, температурного коэффициента линейного расширения, коэффициента удельной теплоемкости, модуля упругости, коэффициента Пуассона и плотности покрытия в процессе формирования напряжений в керамике определена в работе [15]. Результаты исследования [16] свидетельствуют об уменьшении и стабилизации напряжений в поверхностных слоях структурных элементов оксидно-карбидной керамики при увеличении толщины покрытия из нитрида титана. Толщина TiC-покрытия также позитивно влияет на напряженно-деформированное состояние нитридной керамики при нагреве и охлаждении [17]. Результаты численных экспериментов убедительно доказывают возможность управления напряженным состоянием поверхностного слоя



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

разных керамических материалов за счет изменения свойств и толщины покрытия.

Другим важным аспектом анализируемой проблемы является напряженно-деформированное состояние границ в композиционном материале керамика – покрытие. Частично вопрос рассмотрен в работах [18, 19], выполненных с использованием оригинальной методики численных экспериментов. Выявлено значительное влияние состава нитридной керамики на напряженное состояние границы между ней и покрытием из нитрида титана под действием разных нагрузок. Установлено, что значительно меньшие напряжения образуются на границе зерно Si_3N_4 – TiN -покрытие, чем на границе зерно TiC – TiN -покрытие, что вносит определенную ясность в начальный этап разрушения покрытия за счет появления структурных дефектов на границе керамика – покрытие. Однако отсутствие сведений о напряженном состоянии границы между слоями в многослойных покрытиях, нанесенных на керамику, затрудняет анализ процесса разрушения структурно сложных композиционных материалов.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния двухслойного TiC/TiN -покрытия, нанесенного на нитридную керамику, на напряженное состояние границы между его слоями под действием силовых нагрузок.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Численные исследования напряженного состояния границы между слоями двухслойного покрытия выполнены с использованием методики, созданной в работе [18]. При разработке расчетной схемы принято допущение — граница между слоями TiC и TiN двухслойного покрытия является бесконечно узкой областью. Расчетная схема, построенная на основе микроструктурной модели [20], с выделенными контрольными точками (КТ) показана на рис. 1. В этой схеме зерно эллипсной формы ($ab = 3 \times 2$ мкм) заделано в матрицу через межзеренную фазу тол-

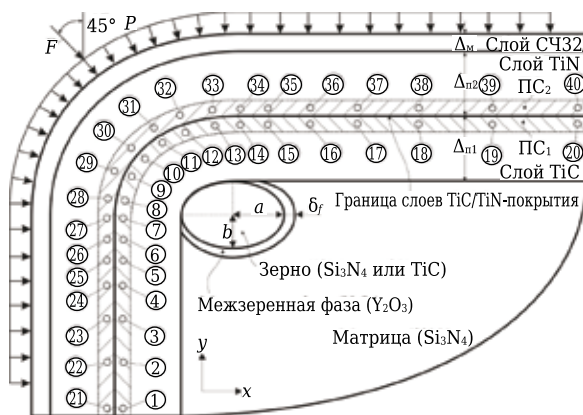


Рис. 1. Расчетная схема и расположение КТ

щиной $\delta_f = 0,2$ мкм. На свободных поверхностях этих структурных элементов керамики последовательно расположены слои TiC и TiN толщиной 5 мкм (толщина двухслойного TiC/TiN -покрытия 10 мкм) и слой чугуна СЧ32 толщиной 1 мкм.

Численные эксперименты выполняли с использованием автоматизированной системы термомеханических расчетов RKS-ST v.1.0 [21]. Исследовали две системы керамики на основе нитрида кремния: система № 1 — Si_3N_4 (зерно)– Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица); система № 2 — TiC (зерно) – Y_2O_3 (межзеренная фаза) – Si_3N_4 (матрица). КТ, выделенные по методике [21], были симметрично расположены в контактирующих подслоях слоя TiC (PC_1) — KT1-KT20 и в подслое слоя TiN (PC_2) — KT21-KT40 . Свойства тугоплавких соединений и СЧ32, необходимые для расчетов, приведены в работе [21]. К наружному слою прикладывали сосредоточенную силу $F = 0,1$ Н под углом 45° и распределенную силу $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па.

Структурную неоднородность напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в PC_1 и PC_2 характеризовали следующими статистическими характеристиками: наибольшее $\sigma_{\text{макс}}$, наименьшее $\sigma_{\text{мин}}$ и среднее $\sigma_{\text{ср}}$ значения, диапазон Σ изменения, стандартное отклонение s и число N изменения знака. Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN -покрытия оценивали характеристиками, рассчитанными как среднее арифметическое $\sigma_{\text{макс}}$, $\sigma_{\text{мин}}$, $\sigma_{\text{ср}}$, Σ и s , интенсивности напряжений σ_i в PC_1 и PC_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов напряжений в PC_1 и PC_2 двух систем под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45° , свидетельствуют о незначительном влиянии вида системы на их напряженное состояние — кривые σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i для PC_1 и PC_2 двух разных систем имеют практически идентичный вид (рис. 2).

Кривые σ_{11} и σ_{12} для PC_1 систем № 1 и 2 имеют сглаженный вид, причем наибольшие значения σ_{11} зафиксированы в KT18 , а наибольшие значения σ_{12} — в KT11 (рис. 2, а). Вид кривых σ_{22} и σ_i для PC_1 систем № 1 и 2 значительно более нестабилен, наблюдаются максимумы в KT9 , которая находится на траектории приложения сосредоточенной силы. Также видно, что значения напряжений σ_{22} и σ_i на вертикальном участке PC_1 (KT1-KT10) значительно превышают значения напряжений на горизонтальном участке этого подслоя. Кривые, характеризующие изменение σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в PC_2 систем № 1 и 2, имеют максимальные значения напряжений в KT31 , KT30 , KT31 и KT30 (рис. 2, б).

Установлено, что в PC_1 системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются

напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 132 МПа — от -57 (КТ11) до 75 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср} = 9$ МПа, стандартном отклонении $s = 37$ МПа и числе изменений знака $N = 1$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 391 МПа — от 32 (КТ11) до -359 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = -135$ МПа, $s = 145$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 156 МПа — от -14 (КТ20) до 142 МПа (КТ11) при $\sigma_{ср} = 49$ МПа, $s = 36$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 316 МПа — от 51 (КТ20) до 367 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = 195$ МПа и $s = 109$ МПа.

В ПС₁ системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 119 МПа — от -51 (КТ11) до 78 МПа (КТ18) при $\sigma_{ср} = 10$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, а). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 384 МПа — от 26 (КТ11) до -358 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = -131$ МПа, $s = 140$ МПа и $N = 1$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 163 МПа — от -14 (КТ20) до 149 МПа (КТ11) при $\sigma_{ср} = 52$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 330 МПа — от 41 (КТ20) до 371 МПа (КТ9) при $\sigma_{ср} = 191$ МПа и $s = 110$ МПа.

В ПС₂ системы № 1 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 182 МПа — от 78 (КТ29) до -104 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 25$ МПа, $s = 39$ МПа и $N = 1$ (см. рис. 2, б). Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 475 МПа — от -6 (КТ39) до -481 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = -171$ МПа, $s = 144$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 225 МПа — от -33 (КТ38) до 192 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 22$ МПа, $s = 61$ МПа и $N = 1$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 521 МПа — от 49 (КТ40) до 570 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = 207$ МПа и $s = 152$ МПа.

В ПС₂ системы № 2 под действием сосредоточенной силы формируются напряжения σ_{11} , которые изменяются в диапазоне 178 МПа — от 80 (КТ29) до -98 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 27$ МПа, $s = 38$ МПа и $N = 1$. Диапазон изменения напряжений σ_{22} составляет 473 МПа — от -5 (КТ40) до -478 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = -166$ МПа, $s = 142$ МПа и $N = 0$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 234 МПа — от -37 (КТ38) до 197 МПа (КТ31) при $\sigma_{ср} = 23$ МПа, $s = 63$ МПа и $N = 1$. Интенсив-

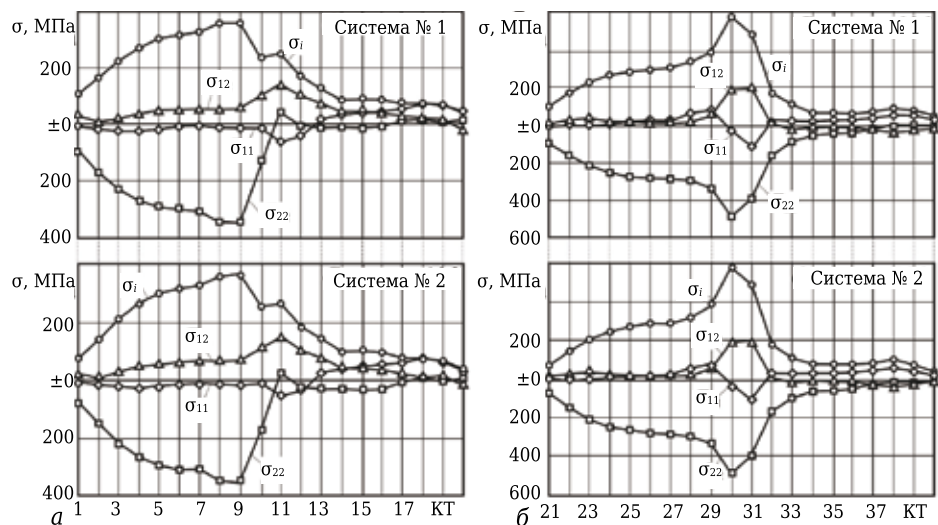


Рис. 2. Напряжения в ПС₁ (а) и ПС₂ (б) TiC/TiN-покрытия под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45°

ность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 535 МПа — от 40 (КТ40) до 575 МПа (КТ30) при $\sigma_{ср} = 204$ МПа и $s = 152$ МПа.

Анализ приведенных данных показывает, что значения диапазона изменения Σ , $\sigma_{макс}$ и s напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Значения $\sigma_{ср}$ напряжений σ_{11} , σ_{22} и σ_i в ПС₁ также ниже по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Однако значения $\sigma_{ср}$ напряжений σ_{12} в ПС₁ выше по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Это соотношение справедливо как для системы № 1, так и для системы № 2.

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику под действием сосредоточенной силы $F = 0,1$ Н, приложенной под углом 45° , определяется следующими характеристиками $\Sigma^{гр} = 418,5$ и $432,5$ МПа, $\sigma_{макс}^{гр} = 468,5$ и 473 МПа, $\sigma_{мин}^{гр} = 50$ и $40,5$ МПа, $\sigma_{ср}^{гр} = 201$ и $197,5$ МПа и $s^{гр} = 130,5$ и 131 МПа для керамики систем № 1 и 2 соответственно. При практическом совпадении $\Sigma^{гр}$, $\sigma_{макс}^{гр}$, $\sigma_{ср}^{гр}$ и $s^{гр}$ для двух систем значение $\sigma_{мин}^{гр}$ для керамики системы № 1 выше на 25 % по сравнению с аналогичным показателем для керамики системы № 2.

Результаты численных расчетов σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ и ПС₂ под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па для систем № 1 и 2 показаны на рис. 3. Видно, что в этом случае материал зерна также не влияет на характер кривых для ПС₁ и ПС₂.

Установлено, что в ПС₁ системы № 1 (рис. 3, а) формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 680 МПа — от 40 (КТ10) до -640 МПа (КТ20) при $\sigma_{ср} = -66$ МПа, $s = 151$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 349 МПа — от 83 (КТ19) до -266 МПа (КТ2) при

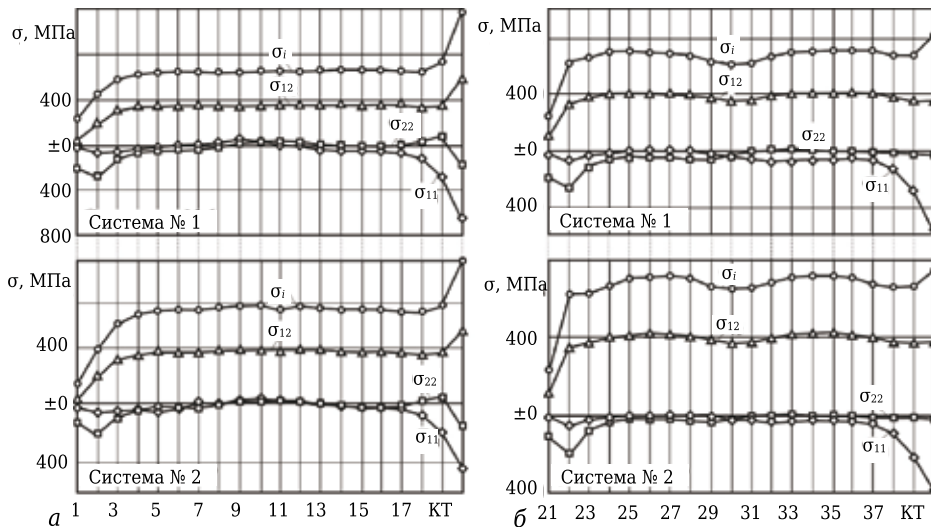


Рис. 3. Напряжения в ПС₁ (а) и ПС₂ (б) TiC/TiN-покрытия под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па

$\sigma_{cp} = -33$ МПа, $s = 87$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 523 МПа — от 61 (КТ1) до 584 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 352$ МПа, $s = 93$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 948 МПа — от 214 (КТ1) до 1165 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 632$ МПа и $s = 164$ МПа.

В ПС₁ системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 488 МПа — от 40 (КТ10) до -448 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = -50$ МПа, $s = 107$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 272 МПа — от 56 (КТ19) до -216 МПа (КТ2) при $\sigma_{cp} = -27$ МПа, $s = 69$ МПа и $N = 4$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 487 МПа — от 41 (КТ1) до 528 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 357$ МПа, $s = 94$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 855 МПа — от 141 (КТ1) до 996 МПа (КТ20) при $\sigma_{cp} = 631$ МПа и $s = 155$ МПа.

В ПС₂ системы № 1 (см. рис. 3, б) формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 568 МПа — от 13 (КТ28) до -555 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -63$ МПа, $s = 131$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 260 МПа — от 17 (КТ33) до -243 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -36$ МПа, $s = 66$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 309 МПа — от 102 (КТ21) до 411 МПа (КТ36) при $\sigma_{cp} = 372$ МПа, $s = 67$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 577 МПа — от 247 (КТ21) до 824 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 664$ МПа и $s = 107$ МПа.

В ПС₂ системы № 2 формируются напряжения σ_{11} , изменяющиеся в диапазоне 387 МПа — от 6 (КТ28) до -381 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = -46$ МПа, $s = 90$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{22} изменяются в диапазоне 203 МПа — от 6 (КТ32) до -197 МПа (КТ22) при $\sigma_{cp} = -28$ МПа, $s = 49$ МПа и $N = 2$. Напряжения σ_{12} изменяются в диапазоне 305 МПа — от 110 (КТ21) до 415 МПа (КТ34) при

$\sigma_{cp} = 377$ МПа, $s = 66$ МПа и $N = 0$. Интенсивность напряжений σ_i изменяется в диапазоне 524 МПа — от 223 (КТ21) до 747 МПа (КТ40) при $\sigma_{cp} = 663$ МПа и $s = 109$ МПа.

Анализ результатов расчетов показывает, что значения диапазона изменения Σ , σ_{max} и s напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в ПС₁ выше по сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Значения σ_{cp} напряжений σ_{22} , σ_{12} и σ_i в ПС₁ ниже по

сравнению со значениями аналогичных показателей в ПС₂. Это соотношение справедливо для обеих систем.

Напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику под действием распределенной силы $P = 4,0 \cdot 10^8$ Па, приложенной под углом 45°, определяется следующими характеристиками: $\Sigma^{rp} = 762,5$ и 689,5 МПа, $\sigma_{max}^{rp} = 994,5$ и 871,5 МПа, $\sigma_{min}^{rp} = 230,5$ и 182 МПа, $\sigma_{cp}^{rp} = 648$ и 647 МПа и $s^{rp} = 135,5$ и 132 МПа для керамики систем № 1 и 2 соответственно. Установлено, что значения Σ^{rp} , σ_{max}^{rp} и σ_{min}^{rp} для σ_i , характеризующие напряженное состояние границы между слоями TiC/TiN-покрытия, на 10, 12 и 20 % соответственно в системе № 2 меньше, чем в системе № 1. Значения σ_{cp}^{rp} и s^{rp} в обеих системах практически совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных расчетов выявлены основные закономерности формирования напряженного состояния границы между слоями TiC/TiN-покрытия, нанесенного на нитридную керамику, под действием силовой нагрузки. Под действием сосредоточенной силы в системе с зерном из карбида титана значение σ_{min}^{rp} , определяющее напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия TiC-TiN, меньше на 25 % по сравнению с этим показателем системы с зерном из нитрида кремния при практически одинаковых значениях Σ^{rp} , σ_{max}^{rp} , σ_{cp}^{rp} и s^{rp} . Под действием распределенной силы в системе с зерном из карбида титана значения характеристик, определяющих напряженное состояние границы между слоями двухслойного покрытия, меньше аналогичных характеристик системы с зерном из нитрида

кремния на 10, 12 и 20 % соответственно при практически равных значениях $\sigma_{\text{ср}}^{\text{гп}}$ и $s^{\text{гп}}$. Это свидетельствует о более благоприятном напряженном состоянии границы между слоями двухслойного покрытия TiC–TiN в системе с зерном из карбида титана и, соответственно, меньшей вероятности появления дефектов на границе между слоями двухслойного покрытия TiC–TiN под действием силовых нагрузок по сравнению с напряженным состоянием в системе с зерном из нитрида кремния с таким же двухслойным покрытием.

Настоящая работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (задание 9.1372.2017/4.6).

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 32–36.
2. Grigor'ev, S. N. Complex surface hardening of oxide-carbide ceramic cutting tools / S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Russ. Eng. Res. — 2005. — Vol. 25, № 9. — С. 7–12.
3. Volosova, M. Cutting ceramic inserts: the influence of abrasive machining and surface coatings on the operational characteristics / M. Volosova, S. Grigor'ev // Mech. Ind. — 2016. — Vol. 17, № 7. — С. 705.
4. Кузин, В. В. Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.
5. 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. — Р. 421–426.
6. Табаков, В. П. Многослойные покрытия инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. А. Ермолаев // СТИН. — 2005. — № 7. — С. 21–25.
7. Tabakov, V. P. Multi-layer coatings of the tools operating in continuous cutting conditions / V. P. Tabakov, A. A. Ermolaev // Russ. Eng. Res. — 2005. — T. 25, № 7. — С. 61–65.
8. Sokovi'c, M. Cutting properties of the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_{(\text{w})}$ based tool ceramic reinforced with the PVD and CVD wear resistant coatings / M. Sokovi'c, J. Mikula, L. A. Dobrza'nski [et al.] // J. Mater. Proc. Technol. — 2005. — Vol. 164/165. — Р. 924–929.
9. Peng, Zh. Hard and wear-resistant titanium nitride films for ceramic cutting tools by pulsed high energy density plasma / Zh. Peng, H. Miao, W. Wang [et al.] // Surf. Coat. Technol. — 2003. — Vol. 6. — Р. 183–188.
10. Кузин, В. В. Разработка и исследование режущих инструментов из нитридной керамики с покрытием / В. В. Кузин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2006. — № 9. — С. 48–52.
11. Nakamichi, M. Material design of ceramic coating by plasma spray method / M. Nakamichi, T. Takabatake, H. Kawamura // Fusion Eng. Des. — 1998. — Vol. 41. — Р. 143–147.
12. 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 Eng. Mater. — 2014. — Vol. 581. — Р. 14–17.
13. Табаков, В. П. Исследование процессов трещинообразования в износостойких покрытиях режущего инструмента / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // Вест. Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. — 2013. — Т. 18, № 4-2. — С. 1916–1918.
14. 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.
15. 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 // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 5. — Р. 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.
17. 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 // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 55, № 6. — Р. 565–569.
18. 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.
19. 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 // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — Р. 91–96.
20. 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.
21. 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 // Refract. Ind. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 2. — Р. 197–200.
22. 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.
23. Grigor'ev, S. N. Stress-strain state of a coated nitride-ceramic tool / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. A. Volosova // Russ. Eng. Res. — 2012. — Vol. 32, № 7/8. — Р. 561–566.
24. 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.
25. 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 // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 376–380.

18. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием силовых нагрузок / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 38–44.

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.

19. **Кузин, В. В.** Напряженное состояние границы между керамикой и покрытием под действием комбинированной нагрузки / В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 43–48.

Kuzin, V. V. Stressed state of a boundary between ceramic and coating under action of a combined load / V. V. Kuzin, M. Y. Fedorov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 3. — P. 308–312.

20. **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 // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.

21. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочислотных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченко, 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 // Russ. Eng. Res. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.

22. **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 // Appl. Mechan. Mater. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 17.05.17

© В. В. Кузин, М. Ю. Фёдоров,
Предраг Дашич, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



12th International Exhibition & Conference
29 - 31 August 2018
Pragati Maidan, New Delhi, India



CO-SPONSORED BY
Ministry of Steel
Ministry of Mines
Ministry of Earth Sciences
Ministry of External Affairs
Ministry of Micro Small & Medium Enterprises
Department of Commerce
Ministry of Heavy Industries and Public Enterprises
Council of Scientific & Industrial Research
GOVERNMENT OF INDIA

MINERALS, METALS, METALLURGY & MATERIALS 2018 (MMMM)

12-я Международная выставка металлургической и горнодобывающей промышленности

29–31 августа 2018 г.
г. Дели, Индия

Тематика:

- оборудование и технологии для производства металлов
- сталелитейное оборудование
- прокатные станы
- производство алюминия, меди, цинка, свинца
- производства нержавеющей стали
- производство труб и трубопроводов
- производство и обработка листового металла
- огнеупоры
- оборудование и технологии для горнодобывающей промышленности
- подъемно-транспортное оборудование
- технологии металлообработки
- оборудование для литья, формовки иковки металлов
- обработка поверхностей и защита от коррозии
- оборудование и технологии для сварки и резки
- системы автоматизации
- контрольно-измерительное оборудование
- технологии безопасности и средства защиты и др.

<http://www.mmmm-expo.com/>