Д. т. н. **В. В. Кузин** (🖾), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. Ю. Федоров**, к. т. н. **М. А. Волосова** 

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

# удк 666.3:546.28'171]:621.914.22 ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЙ AIN И ТІN НА ТЕПЛОВОЕ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>—ТіС-КЕРАМИКИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Изучены особенности влияния покрытий AlN и TiN на тепловое и напряженное состояние поверхностного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики под действием теплового потока. Установлено, что покрытие TiN более благоприятно влияет на напряженное состояние структурных элементов керамики, а покрытие AlN — на напряженное состояние границы между покрытием и керамикой.

**Ключевые слова:** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–TiC-керамика, поверхностный слой (ПС), покрытия AlN и TiN, тепловая нагрузка, напряженно-деформированное состояние, интенсивность напряжений.

## введение

ктуальность изучения высокотемператур-Актуальность изутопии дела Актуальность изутопии странике определяется необходимостью повышения эксплуатационной надежности деталей газотурбинных двигателей, режущих и деформирующих инструментов [1, 2]. Большое число публикаций по высокотемпературному поведению Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>керамики служит базисом для детального понимания эксплуатационных возможностей этой керамики [3-21]. На основе обобщения результатов приведенных статей, охватывающих широкий диапазон исследований, построена логическая связь температуры с разными по природе эффектами в Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамике. Тепловое воздействие на керамику приводит к изменению ее структуры, формированию микроструктурных напряжений, зарождению и росту трещин, разрушению изделия. Особое место в этой цепочке связей принадлежит покрытиям, наносимым на рабочие поверхности керамических деталей и инструментов, которые, как правило, снижают температуру и существенно влияют на поведение поверхностного слоя (ПС) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики.

Исследования влияния температуры в диапазоне 650-1500 °С на структуру Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики показали, что при нагреве до 950 °С увеличи-

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

вается толщина межзеренной фазы, а при последующем охлаждении наблюдается обратный эффект [3]. Этот результат убедительно доказывает наличие микроструктурной упругой деформации на границах зерен Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> под действием температуры и, соответственно, объясняет природу образования несплошностей. Доминирующим механизмом зарождения дефектов на границах зерен при нагреве авторы публикации [4] считают также образование несплошностей под влиянием сформировавшихся напряжений. Эти структурные дефекты, имеющие тепловую природу происхождения, в дальнейшем трансформируются в трещины, которые снижают прочность керамики при высокой температуре. Характер и интенсивность роста трещин в индентированных образцах Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики под действием термоциклических нагрузок в диапазоне 500-1000 °C описаны в статье [5]. Определены температуры, число циклов, напряжения в образцах и значения критических напряжений, при которых рост трещин становится нестабильным. На основе выявленной взаимосвязи температуры со свойствами инструментальной Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики уточнена область эффективного использования разработанных инструментов [6, 7]

В результате исследований пластин из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики с разными многослойными покрытиями на основе TiN и TiAlSiN выявлена корреляция трибологических характеристик с твердостью и адгезией этих покрытий к керамике [8]. Влияние циклического изменения температуры в диапазоне 40–250 °C на образцы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики со слоями меди разной толщиной описано в публикации [9]. Установлено, что на образцах со слоем меди толщиной 150 мкм трещины отсутствуют после 1000 циклов, а со слоем меди толщиной 300 мкм образуются уже после 100 циклов. Образцы со слоем меди толщиной 150 мкм имели более высокие значения прочности после 10 и 1000 циклов термоциклического нагружения. Сравнительный анализ интенсивности износа инструмента с исходными режущими пластинами Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики и с теми же пластинами, имевшими алмазоподобное покрытие на рабочих поверхностях, показал, что покрытие оказывает значительный положительный эффект на работоспособность керамических инструментов [10]. В публикации [11] показано, что интенсивность износа инструментов из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики с покрытием коррелирует с напряженно-деформированным состоянием их ПС, причем рациональный выбор покрытия для инструмента из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-керамики, проектируемого для определенных условий эксплуатации, позволяет обеспечить его надежность.

Цель настоящей работы — изучить особенности влияния покрытий AlN и TiN на изменение теплового и напряженного состояния ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики под действием теплового потока. Настоящая статья является продолжением предыдущей статьи [22].

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты выполнены в автоматизированной системе термопрочностных расчетов KS-SL v.1.0 с использованием расчетной схемы и метода контрольных точек (КТ), приведенных в статье [22]. На конструкцию действовал тепловой поток Q = 9·10<sup>8</sup> Вт/м<sup>2</sup> при коэффициенте теплоотдачи в окружающую среду h =  $= 1.10^{5}$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Рассчитывали температуру *T* и интенсивность напряжений оі в шести поверхностях С1-С6, формирующих три межфазные границы в ПС керамики (табл. 1). Для анализа деформации ПС оценивали горизонтальные и и вертикальные v перемещения КТ99, КТ100 и КТ101, которые располагались в поверхностях С6, С5 и С4. Исследовали тепловое и напряженное состояние ПС нитридной керамики двух систем: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (зерно) – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (межзеренная фаза) – Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (матрица) и TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытиями AlN или TiN толщиной 2 мкм.

По результатам расчетов определяли статистические характеристики для *T* и  $\sigma_i$ : наименьшие  $T_{\text{мин}}$  и  $\sigma_{\text{мин}}$ , наибольшие  $T_{\text{макс}}$  и  $\sigma_{\text{макс}}$ , средние  $T_{\text{ср}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$ ;  $\Delta\sigma_i$  — диапазон изменения  $\sigma_i$ ; медиану  $M_e$  для  $\sigma_i$  и стандартное отклонение *s* для *T* и  $\sigma_i$  для каждой поверхности. Значимость покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики под действием теплового потока оценивали с использованием коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  и  $K_6$ , которые относятся к статистическим характеристикам  $\sigma_{\text{мин}}$ ,  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $\Delta\sigma_i$ ,  $M_e$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и *s* соответственно. Порядок расчета коэффициентов  $K_1$ - $K_6$  приведен в публикации [22].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурное поле в ПС  $Si_3N_4$ -ТіС-керамики с покрытием, сформированное под действием теплового потока, показано на примере керамики системы TiC- $Y_2O_3$ - $Si_3N_4$  с покрытием TiN (рис. 1, *a*). Это поле является типичным для керамики обеих систем с покрытиями AlN и TiN. Установлено, что вид системы керамики и материал покрытий не влияют на форму изотерм, ориентированных относительно КТ99, но существенно влияют на удаленность изотерм с одинаковой температурой от этой КТ, что означает зависимость градиента температур от вида системы керамики и материала покрытия.

В ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием TiN зафиксирован наибольший градиент температур, системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN — наименьший. Наибольшая Т формируется в поверхности С6 (рис. 1, б), причем максимальная Т зафиксирована в системе  $Si_3N_4$ – $Y_2O_3$ – $Si_3N_4$  с покрытием AlN, а минимальная — в системе TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием TiN. В этой поверхности керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием AlN температура T изменяется от 289 ( $T_{\text{мин}}$ ) до 710 °С ( $T_{\text{макс}}$ ) при *T*<sub>ср</sub> = 580 °С и *s* = 123,1, с покрытием TiN — от 208 до 394 °С при *T*<sub>ср</sub> = 339,9 °С и *s* = 53,5; в керамике системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN — от 281 до 618 °С при T<sub>ср</sub> = 526,6 °С и s = 96,6, с покрытием TiN — от 205 до 376 °С при *T*<sub>ср</sub> = 328,6 °С и s = 49.

Схема деформации ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики с покрытием под действием теплового потока, типичная для обеих систем и покрытий, показана на рис. 2. Видно, что деформация происходит в результате выдавливания локального поверхностного объема конструкции. Наибольшие горизон-

Таблица 1. Поверхности, формирующие межфазные границы в ПС керамики с покрытием

Обозначение поверхности	Выделенные поверхности, формирующие межфазные границы в ПС Si <sub>3</sub> N4-TiC-керамики с покрытием	Номер КТ
C1	Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе	KT1-KT18
C2	Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к зерну	KT19-KT34
C3	Поверхность межзеренной фазы, примыкающая к матрице	KT35-KT50
C4	Поверхность матрицы, примыкающая к межзеренной фазе	KT51-KT66; KT99
C5	Поверхности зерна, межзеренной фазы и матрицы, примыкающие к слою покрытия	KT67-KT82; KT100
C6	Поверхность слоя покрытия, примыкающая к зерну, межзеренной фазе и матрице	KT83-KT98; KT101

58



Рис. 1. Температурное поле в ПС керамики системы  $TiC-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием TiN (*a*) и характер изменения *T* в поверхности *C6* систем  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN (*1*) и TiN (*2*) и  $TiC-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN (*3*) и TiN (*4*) под действием теплового потока (*б*)

тальные и и вертикальные v перемещения имеет покрытие в точке КТ99, которая перемещается по стрелке в точку КТ99<sup>1</sup>. Результаты расчетов и и v КТ99-КТ101 для керамики разных систем и с покрытиями различаются. Степень деформации ПС керамики системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ниже, чем у керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Установлено, что в ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием AlN значения u и  $\nu$  при перемещении КТ99 в положение КТ99<sup>1</sup> составляют -0,024 и 0,018 мкм, при перемещении КТ100 в положение КТ100<sup>1</sup> -0,016 и 0,011 мкм, при перемещении КТ101 в положение КТ101<sup>1</sup> -0,0054 и 0,0042 мкм соответственно. В ПС керамики той же системы с покрытием TiN значения u и  $\nu$  при аналогичных перемещениях составляют -0,019 и 0,015 мкм, -0,013 и 0,0093 мкм и -0,0049 и 0,0039 мкм соответственно.

В ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN значения *и* и *v* при аналогичных перемещениях составляют -0,027 и 0,022 мкм, -0,021 и 0,017 мкм и -0,0048 и 0,0037 мкм соответственно. В ПС керамики той же системы с покрытием TiN значения *и* и *v* при аналогичных перемещениях составляют -0,022 и 0,017 мкм, -0,016 и 0,013 мкм и -0,0044 и 0,0035 мкм соответственно.

Установлено, что поля  $\sigma_i$ , сформировавшиеся в ПС керамики систем  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  и TiC- $Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN под действием теплового потока, характеризуются наибольшими значениями в локальных объемах покрытия и на отдельных участках границы керамика – покрытие. В качестве примера на рис. З показано поле  $\sigma_i$  в ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием TiN. Наибольшие значения  $\sigma_i$  (от 482 до 643 МПа) фиксируются в области покрытия между КТ99 и КТ00, наименьшие (до 161 МПа) — в зерне и межзеренной фазе керамики.

Характер изменения  $\sigma_i$  в поверхностях C1-C6 ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN под действием теплового потока показан на рис. 4. Видно, что во всех поверхно-

стях, кроме поверхности *C5*, покрытие не оказывает значимого влияния на форму кривых, но изменяет значения о<sub>i</sub>. Установлено, что кривые



**Рис. 2.** Схема деформации ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием TiN под действием теплового потока



**Рис. 3.** Поле  $\sigma_i$  в ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием TiN под действием теплового потока



**Рис. 4.** Характер изменения σ<sub>i</sub> в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (*b*), *C3* (*b*), *C4* (*c*), *C5* (*d*) и *C6* (*e*) керамики системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN (*1*) и TiN (*2*) под действием теплового потока

для поверхностей С1-С4 и С6 характеризуются короткими чередующимися участками КТ, на которых значения о, периодически изменяются, в сторону как уменьшения, так и увеличения. Наибольшие значения о, в поверхностях С1-С3 и С6 фиксировали в центральной части кривых (см. рис. 4, а-в, е), в поверхности С4 — на левом периферийном участке (см. рис. 4, г). Кривые для поверхности C5 имеют ломаную форму, причем для керамики системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN кривая характеризуется наличием пиковых значений о<sub>i</sub> на левом и правом периферийных участках. Для керамики этой системы с покрытием TiN характер кривой более сглаженный, пиковые значения отсутствуют (см. рис. 4.  $\partial$ ). В поверхности С1 наименьшие о, фиксиру-

ются в КТ15, а наибольшие — в КТ1 и КТ8 (см.

рис. 4, *a*), в поверхности *C2* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ31 и КТ19, а наибольшие — в КТ25 (см. рис. 4, *б*), в поверхности *C3* наименьшие  $\sigma_i$ фиксируются в КТ47 и КТ48, а наибольшие — в КТ41 (см. рис. 4, *в*), в поверхности *C4* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ58 и КТ59, а наибольшие — в КТ52 и КТ54 (см. рис. 4, *г*), в поверхности *C5* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ69 и КТ75, а наибольшие — в КТ78 и КТ81 (см. рис. 4, *д*), в поверхности *C6* наименьшие значения  $\sigma_i$ фиксируются в КТ84 и КТ85, а наибольшие — в КТ90 (см. рис. 4, *е*).

Значения статистических характеристик для  $\sigma_i$  в поверхностях C1-C6 ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN под действием теплового потока приведены в табл. 2. Наибольшие значения  $\sigma_{\rm cp}$  зафиксированы в поверхности C6 с

Таблица 2 Статистические характеристики	ПС керамики системы Si <sub>2</sub> N <sub>4</sub> -Y	2O <sub>2</sub> -Si <sub>2</sub> N <sub>4</sub> C ποκρωτием AIN / TiN*

					· · · ·	
Поверхность	σ <sub>мин</sub> , МПа	$\sigma_{\text{макс}}$ , МПа	$\Delta \sigma_i$ , ΜΠα	<i>M</i> <sub>e</sub> , МПа	σ <sub>ср</sub> , МПа	S
C1	73/102	178/190	105/88	131/150,5	130,3/152,1	31,6/33,3
C2	205/156	350/285	145/129	287/214	290,4/220,4	41,9/46
C3	182/149	303/255	121/106	253,5/180	247,6/197,8	40,5/38,7
C4	82/107	212/204	130/97	164,5/154	160,6/154	41,8/29,2
C5	105/159	314/213	209/54	138,5/173,5	172,3/179,6	71,5/19
C6	273/419	414/644	141/225	340,5/496,5	345,9/514,9	46,4/72,9
* В числителе — для керамики с покрытием AlN; в знаменателе — для керамики с покрытием TiN.						

покрытием TiN, наименьшие — в поверхности *C1* с покрытием AlN, причем наибольшие значения  $\sigma_{cp}$  больше, чем наименьшие, в 4 раза. Наибольшие значения *s* зафиксированы в поверхности *C6* с покрытием TiN, наименьшие — в поверхности *C5* с покрытием TiN, причем наибольшие значения *s* больше, чем наименьшие, в 3,8 раза.

Характер изменения  $\sigma_i$  в поверхностях C1-C6ПС керамики системы  $TiC-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN под действием теплового потока показан на рис. 5. Следует отметить существенное отличие форм кривых для большинства поверхностей этой системы от системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$ . Исключение составляют кривые для поверхностей C1 и C4: в них значения  $\sigma_i$  изменяются практически идентично с системой  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$ . Основным различием формы кривых для поверхностей C2, C3, C5 и C6 ПС керамики системы  $TiC-Y_2O_3-Si_3N_4$  от системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN является формирование наибольших значений на периферийных участках кривых.

В поверхности *C1* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ15 и КТ17, а наибольшие — в КТ8 (см. рис. 5, *a*), в поверхности *C2* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ26, а наибольшие — в КТ31 и КТ23 (см. рис. 5, *б*), в поверхности *C3* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ43, а наибольшие — в КТ38 и КТ35 (см. рис. 5, *е*), в поверхности *C4* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ58, а наибольшие — в КТ52 и КТ51 (см. рис. 5, *е*), в поверхности *C5* наименьшие  $\sigma_i$  фиксируются в КТ56 и КТ75, а наибольшие — в КТ81 (см. рис. 5, *д*),



**Рис. 5.** Характер изменения  $\sigma_i$  в поверхностях *C1* (*a*), *C2* (*b*), *C3* (*b*), *C4* (*c*), *C5* (*d*) и *C6* (*e*) керамики системы TiC–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN (*1*) и TiN (*2*) под действием теплового потока

Таблица 3. Статистические характеристики ПС керамики системы TiC-Y2O3-Si3N4 с покрытием AIN / Ti
--

Поверхность	σ <sub>мин</sub> , МПа	$\sigma_{\text{макс}}$ , МПа	$\Delta \sigma_i$ , ΜΠα	$M_{e}$ , МПа	$\sigma_{\rm cp}$ , МПа	S
C1	172/127	319/235	147/108	254/191	249,4/183,8	46,2/31,8
C2	133/95	275/191	142/96	234,5/166	225,4/160,1	44,9/29,6
C3	114/96	241/168	127/72	213,5/147	192,6/137,7	46,3/25,3
C4	193/136	502/403	309/267	444/330	398,7/299,6	103,8/88,3
C5	64/36	544/437	480/401	263/239	282,4/231,6	199,7/159,8
C6	18/202	372/486	354/284	60,5/237	121/281,8	114,1/85,1
* В числителе — для керамики с покрытием AlN; в знаменателе — для керамики с покрытием TiN.						

Коэффициент	C1	C2	СЗ	C4	C5	C6
зпачимости	0.50/4.05	1.04/4.4	1.00/1.40	0.55/4.40	0.00/4 50	0.05/0.00
$K_1$	0,72/1,35	1,31/1,4	1,22/1,19	0,77/1,42	0,66/1,78	0,65/0,09
$K_2$	0,94/1,36	1,23/1,44	1,18/1,43	1,04/1,25	1,47/1,24	0,64/0,77
$K_3$	1,22/1,36	1,12/1,48	1,14/1,76	1,34/1,16	3,9/1,2	0,63/1,24
$K_4$	0,87/1,33	1,34/1,41	1,41/1,45	1,07/1,35	0,8/1,1	0,69/0,26
$K_5$	0,86/1,36	1,32/1,41	1,25/1,4	1,04/1,33	0,96/1,22	0,67/0,43
$K_6$	0,95/1,45	0,91/1,52	1,04/1,8	1,43/1,18	3,8/1,25	0,64/1,34
* В числителе — для керамики системы Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ; в знаменателе — для керамики системы TiC-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .						

Таблица 4. Коэффициент значимости покрытий AIN и TiN ПС керамики Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC\*

в поверхности *C6* наименьшие значения  $\sigma_i$  фиксируются в КТ87, а наибольшие — в КТ98 (см. рис. 5, *e*). По аналогии с керамикой системы  $Si_3N_4$ – $Y_2O_3$ – $Si_3N_4$  в поверхности *C5* ПС керамики системы TiC– $Y_2O_3$ – $Si_3N_4$  с покрытиями AlN и TiN отмечено присутствие пиковых значений  $\sigma_i$ .

Значения статистических характеристик для  $\sigma_i$ в поверхностях C1-C6 ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытиями AlN и TiN под действием теплового потока приведены в табл. 3. Наибольшие значения  $\sigma_{cp}$  зафиксированы в поверхности C4 с покрытием AlN, наименьшие — в поверхности C6с покрытием AlN, причем наибольшие значения  $\sigma_{cp}$  больше, чем наименьшие, в 3,3 раза. Наибольшие значения *s* зафиксированы в поверхности C5с покрытием AlN, наименьшие — в поверхности C3с покрытием AlN, наименьшие — в поверхности C3с покрытием TiN, причем наибольшие значения *s* больше, чем наименьшие, в 7,9 раза.

Коэффициенты значимости покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики в условиях теплового нагружения приведены в табл. 4. Видно, что покрытие TiN оказывает более благоприятное влияние на напряженное состояние ПС керамики двух систем, чем покрытие AlN, о чем свидетельствуют значения  $K_1$ - $K_6$ > 1. В наибольшей степени положительный эффект покрытия TiN на напряженное состояние ПС проявляется в керамике системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, в которой значения  $K_1$ - $K_6$  > 1 отмечены в поверхностях C1-C5. Однако на границе между покрытием AlN и керамикой формируются мень-

#### Библиографический список

1. **Bocanegra-Bernal, M. H.** Mechanical properties of silicon nitride-based ceramics and its use in structural applications at high temperatures / M. H. Bocanegra-Bernal, Branko Matovic // Mater. Sci. Eng., A. — 2010. — Vol. 527, № 6. — P. 1314–1338.

2. *Kuzin, Valery V.* A new generation of ceramic tools / *Valery V. Kuzin, Sergey N. Grigor'ev, David R. Burton* [et al.] // Proceedings of the 10h International Conference on Manufacturing Research ICMR-2012, 2012. — P. 523–528.

3. **Bhattacharyya, Somnath.** The evolution of amorphous grain boundaries during in-situ heating experiments in Lu-Mg doped Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> / Somnath Bhattacharyya, Anandh Subramaniam, Christoph T. Koch [et al.] // Mater. Sci. Eng., A. -2006. - Vol. 422, Ne 1/2. - P. 92-101.

4. Guo, Gangfeng. Direct measurement of residual stresses and their effects on the microstructure and

шие напряжения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов *K*<sub>1</sub>-*K*<sub>6</sub> в поверхности *C6*.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных экспериментов определены особенности влияния покрытий AlN и TiN на тепловое и напряженное состояние ПС нитридной керамики под действием теплового потока. Формирование наиболее низких температур зафиксировано в ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием TiN, а наиболее высокие температуры образуются в ПС керамики системы  $Si_3N_4-Y_2O_3-Si_3N_4$  с покрытием AlN. По критерию наименьших перемещений КТ99-КТ101 при тепловой деформации покрытие TiN оказывает более благоприятное влияние, чем покрытие AlN. Наименьшие значения и и v зафиксированы в ПС керамики системы Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием TiN, а наибольшие — в ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием AlN. Покрытия AlN и TiN по-разному влияют на напряженное состояние ПС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики в условиях теплового нагружения, причем коэффициент значимости покрытий также зависит от системы керамики и поверхности. Наименьшие значения показателей  $\sigma_{\text{макс}}$ ,  $\Delta \sigma_i$ ,  $M_e$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$  и s зафиксированы в поверхностях С4 и С5 ПС керамики системы  $Si_3N_4$ - $Y_2O_3$ - $Si_3N_4$  с покрытием TiN, в поверхностях C2 и C3 в ПС керамики системы TiC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с покрытием TiN. В поверхностях *C1* и С6 распределение статистических показателей по системам керамики неоднозначно.

mechanical properties of heat-treated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics II: with CeO<sub>2</sub> as a single additive / *Gangfeng Guo, Jianbao Li, Xiaozhan Yang* [et al.] // Acta Mater. — 2007. — Vol. 55, № 9. — P. 3245–3251.

5. *Gondar, Ernest.* Verification of the stresses developed in silicon nitride by repeated thermal shocks / *Ernest Gondar, Tomas Hlava, Miroslav Rosko* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2006. — Vol. 26, № 9. — P. 1743–1752.

6. *Kuzin, V. V.* Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / *V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov* // J. Frict. Wear. — 2013. — Vol. 34, № 3. — P. 199–203.

**Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265-271.

62

7. *Kuzin, V. V.* Effectiveness of the nitride ceramic cutting tools in machining the gray irons / *V. V. Kuzin* // Russ. Eng. Res. — 2004. — Vol. 24, № 5. — P. 21–27.

**Кузин, В. В.** Работоспособность режущих инструментов из нитридной керамики при обработке чугунов / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 39-43.

8. **Dobrzanski, L. A.** Tribological properties of the PVD and CVD coatings deposited onto the nitride tool ceramics / *L. A. Dobrzanski, D. Pakuła, A. Kriz* [et al.] // J. Mater. Process. Technol. — 2006. — Vol. 175, № 1–3. — P. 179–185.

9. *Miyazakia, Hiroyuki.* Effect of high temperature cycling on both crack formation in ceramics and delamination of copper layers in silicon nitride active metal brazing substrates / *Hiroyuki Miyazakia, Shoji Iwakiri, Kiyoshi Hirao* [et al.] // Ceram. Int. — 2017. — Vol. 43, № 6. — P. 5080–5088.

10. *Martinho, R. P.* Wear behaviour of uncoated and diamond coated  $Si_3N_4$  tools under severe turning conditions / *R. P. Martinho, F. J. G. Silva, A. M. Baptista //* Wear. — 2007. — Vol. 263, N $_{2}$  7–12. — P. 1417–1422.

11. *Grigoriev, S.* The stress-strained state of ceramic tools with coating / *S. Grigoriev, V. Kuzin, D. Burton* [et al.] // Proceedings of the 37th International MATADOR Conference, 2013. — P. 181–184.

12. *Guicciardi, S.* Effects of testing temperature and thermal treatments on some mechanical properties of a  $Si_3N_4$ -TiN composite / *S. Guicciardi, C. Melandri, V. Medri* [et al.] // Mater. Sci. Eng., A. — 2003. — Vol. 360,  $N_{\rm P}$  1/2. — P. 35-45.

13. *Tian, Xianhua.* High temperature mechanical properties of  $Si_3N_4$  / (W, Ti) C graded nano-composite ceramic tool material / *Xianhua Tian, Jun Zhao, Shuting Lei* [et al.]//Ceram. Int. — 2018. — Vol. 44, No 6. — P. 7128–7133.

14. *Zheng, Guangming.* Thermal shock and thermal fatigue resistance of sialon– $Si_3N_4$  graded composite ceramic materials / *Guangming Zheng, Jun Zhao, Chao Jia* [et al.] // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2012. — Vol. 35. — P. 55–61.

15. *Miyazakia, Hiroyuki.* Improved resistance to thermal fatigue of active metal brazing substrates for silicon carbide power modules using tough silicon nitrides

with high thermal conductivity / Hiroyuki Miyazakia, You Zhou, Shoji Iwakiri [et al.] // Ceram. Int. — 2018. — Vol. 44, № 8. — P. 8870–8876.

16. *Lin, H. T.* Mechanical reliability evaluation of silicon nitride ceramic components after exposure in industrial gas turbines / *H. T. Lin, M. K. Ferber* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2002. — Vol. 22, № 14–15. — P. 2789–2797.

17. *Lengauer, Markus*. Silicon nitride tools for the hot rolling of high-alloyed steel and superalloy wires — crack growth and lifetime prediction / *Markus Lengauer, Robert Danzer* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28, № 11. — P. 2289–2298.

18. **Danzer, Robert.** Silicon nitride materials for hot working of high strength metal wires / Robert Danzer, Markus Lengauer // Engineering Failure Analysis. — 2010. — Vol. 17, № 3. — P. 596–606.

19. **Fujita, Saho.** Degradation evaluation of  $Si_3N_4$  ceramic surface layer in contact with molten Al using microcantilever beam specimens / Saho Fujita, Junichi Tatami, Tsukaho Yahagi [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2017. — Vol. 37, No 14. — P. 4351–4356.

20. *Liao, Shengjun.* Thermal conductivity and mechanical properties of  $Si_3N_4$  ceramics with binary fluoride sintering additives / *Shengjun Liao, Lijuan Zhou, Changxi Jiang* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2021. — Vol. 41,  $N_{\rm P}$  14. — P. 6971–6982.

21. **Pakuła, D.** Structure and properties of multicomponent coatings deposited onto sialon tool ceramics / *D. Pakuła* // Archives of Materials Science and Engineering. — 2011. — Vol. 52, № 1. — P. 54–60.

22. **Кузин, В. В.** Значимость покрытий AlN и TiN для контролируемой трансформации напряженного состояния поверхностного слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiC-керамики в условиях силового нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2022. — № 3. — С. 62-68.

> Получено 04.04.22 © В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров, М. А. Волосова, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

