

## TRIBOLOGY OF MULTILAYER-COMPOSITE SOLID LUBRICATING COATINGS ON SIALON FOR THEIR USE IN CASES OF GTE APPLICATION

L. N. Lesnevskiy <sup>1a</sup>, M. A. Lyakhovetskiy <sup>1b</sup>, I. A. Nikolaev <sup>1c</sup>, M. A. Volosova <sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (MAI)

<sup>2</sup> Moscow State University of Technology "STANKIN"

<sup>a</sup> l.lesnevskiy@yandex.ru, <sup>b</sup> lyakhovetskiy@yandex.ru, <sup>c</sup> nikolaevia@mai.ru, <sup>d</sup> volosova1978@gmail.com

Submitted 2022, May 16

**Abstract.** Comparative tribological tests of multilayer-composite solid lubricating coatings on Sialon were carried out. The possibilities of using them in high-temperature friction units of gas turbine engines are estimated. The coatings were obtained by combined ion-plasma processing by physical and chemical methods with plasma-assisted vacuum deposition. The tests performed made it possible to determine the nature of the influence on the fretting resistance of the outer diamond-like layer by the degree of its doping with silicon. At the same time, the possibility of using coated Sialon as a tool ceramic in the machining of high-temperature alloys of the Inconel type was confirmed.

**Keywords:** solid lubricant coatings; Sialon; gas turbine engine; fretting resistance; ion-plasma methods of coating formation.

## ТРИБОЛОГИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СИАЛОНЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ГТД

Л. Н. Лесневский <sup>1a</sup>, М. А. Ляховецкий <sup>1b</sup>, И. А. Николаев <sup>1c</sup>, М. А. Волосова <sup>2d</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (МАИ)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

<sup>a</sup> l.lesnevskiy@yandex.ru, <sup>b</sup> lyakhovetskiy@yandex.ru, <sup>c</sup> nikolaevia@mai.ru, <sup>d</sup> volosova1978@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2022

**Аннотация.** Проведены сравнительные трибологические испытания многослойных композиционных твердых смазочных покрытий на сиалоне для оценки возможности использования их в высокотемпературных узлах трения газотурбинных двигателей. Покрытия получены комбинированной ионно-плазменной обработкой методами физического и химического с плазменным ассистированием осаждения в вакууме. Проведенные испытания позволили определить характер влияния на фреттингостойкость внешнего алмазоподобного слоя степени его легирования кремнием. Одновременно подтверждена возможность использования сиалона с покрытиями в качестве инструментальной керамики в процессах механической обработки жаропрочных сплавов типа Inconel.

**Ключевые слова:** твердые смазочные покрытия; сиалон; газотурбинный двигатель; фреттингостойкость; ионно-плазменные методы формирования покрытий.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых направлений использования твердых смазочных покрытий (ТСП), в том числе и высокотемпературных, является их применение в составе узлов трения современных и перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники. Наиболее ярким примером их использования служат разработки узлов трения двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ) [1].

Так, в частности, в газотурбинных двигателях (ГТД) много ответственных деталей, постоянно или временно работающих в условиях сухого трения, к которым относятся: лабиринтные и щеточные уплотнения, газодинамические подшипники, валы-втулки поворотных лопаток, направляющих аппаратов, подвижные элементы сопла и др. Для защиты от износа этих пар трения, часть из которых работает при повышенных нагрузках и в условиях фреттинг-изнашивания, необходимо применить ТСП, основные требования к которым сводятся к обеспечению низких коэффициентов трения и низкой шероховатости поверхности с достижением высоких значений твердости и износостойкости.

Современным подходом к решению проблемы повышения надежности и ресурса высоконагруженных и жаростойких элементов ГТД и энергоустановок на их основе, является использование при их изготовлении специальной керамики, одной из разновидностей которой является сиалон, получивший свое название по первым буквам элементов, входящих в его состав Si-Al-O-N [5]. Он представляет собой твердый раствор на основе нитрида кремния, полученный путем замещения атомов кремния алюминием и атомов азота кислородом. Сиалон обладает стабильностью при высоких температурах (1500–1800 °С), высокими показателями коррозионной, жаро- и износостойкости, значительной твердостью и прочностью, стойкостью к агрессивным средам.

Кроме того, благодаря своим уникальным свойствам, сиалон представляет большой интерес для использования его в качестве инструментальной керамики и для изготовления высокопроизводительного режущего инструмента, используемого при механической обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе [3]. Эти отечественные и зарубежные жаропрочные сплавы типа Inconel являются основными материалами, из которых изготавливаются горячие элементы современных ГТД, и их механическая обработка требует специальных инструментов высокой стойкости. Для обеспечения правильного и длительного функционирования такой режущий инструмент также должен быть защищен специальными ТСП, повышающими его стойкость [4].

В качестве недостатков сиалона следует отметить в основном те, которые связаны со сложностью технологии его спекания, а также пониженная теплопроводность сиалоновых изделий, существенно затрудняющая их механическую обработку. В работе [5] отмечается, что современные тенденции развития металлообрабатывающего производства связаны с отказом от смазочно-охлаждающих жидкостей и переходом к «сухой» обработке, когда традиционная смазка на жидкой основе заменяется на термостойкие высокотемпературные смазывающие ТСП. Последние представляют собой композитные, многокомпонентные покрытия со сложным химическим составом, которые обеспечивают оптимальную микротвердость, термическую стабильность и требуемые трибологические свойства [6].

Ухудшение эксплуатационных свойств инструмента, постепенная потеря работоспособности его режущих кромок жестко связаны с условиями эксплуатации при воздействии высокой температуры и высоких контактных давлений, работой в агрессивных средах, что при наличии вибраций и циклических нагрузок позволяет в первом приближении рассматривать эти условия при определенных режимах обработки близкими к условиям фреттинг-изнашивания. Поэтому основная цель настоящей работы заключается в испытаниях на износостойкость об-

разцов, выполненных из сиалона с многослойными композиционными ТСП на машине трения в условиях фреттинга и возвратно-поступательного скольжения.

### ПОЛУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Для проведения исследований и получения трибологических характеристик поверхностей керамических образцов с различными покрытиями были получены заготовки базового материала SiAlON в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 9 мм. Эти заготовки формировались методом искрового плазменного высокотемпературного спекания порошковых композиций в графитовых формах на установке производства FCT Systeme GmbH (Effelder-Rauenstein), Германия. Технология получения заготовок детально описана в [6]. Порошковые композиции представляли собой смесь  $\alpha$ -SiAlON,  $\beta$ -SiAlON с добавками нитрида титана TiN при следующем соотношении компонентов: 80 мас.% смеси ( $\alpha$ -SiAlON, 90 мас.%,  $\beta$ -SiAlON, 10 мас.%) + + 20 мас.% TiN.

На рис. 1 изображена принципиальная схема технологической установки Palit PI311, которая была использована в работе для нанесения покрытий на керамические образцы. Эта установка позволяет наносить покрытия по двум технологиям: PVD – парофазное испарение материала катода в плазме несамостоятельного газового разряда и его последующая конденсация при взаимодействии с реакционными газами (осаждение нитридных пленок в азото-аргоновой газовой смеси), PACVD – газофазное осаждение посредством химической реакции и разложения компонентов газовой смеси при ассистировании плазмой сильноточного тлеющего разряда (осаждение Si содержащих аморфных пленок аморфного гидрогенизированного углерода из газовой смеси ацетилена, аргона, азота и тетраметилсилана). Сильноточный тлеющий разряд обеспечивает повышение скорости осаждения покрытий до  $\sim n \cdot 10$  мкм/час при достаточно высокой чистоте получаемого материала по сравнению с другими методами плазменного ассистирования (дуговым и микроволновым). Наличие 4-х катодов (в данной работе: 1-го центрального на основе Al-Ti и 3-х периферийных катодов на основе Ti, Al-Si и Cr) позволяет наносить пленки разнообразного состава.

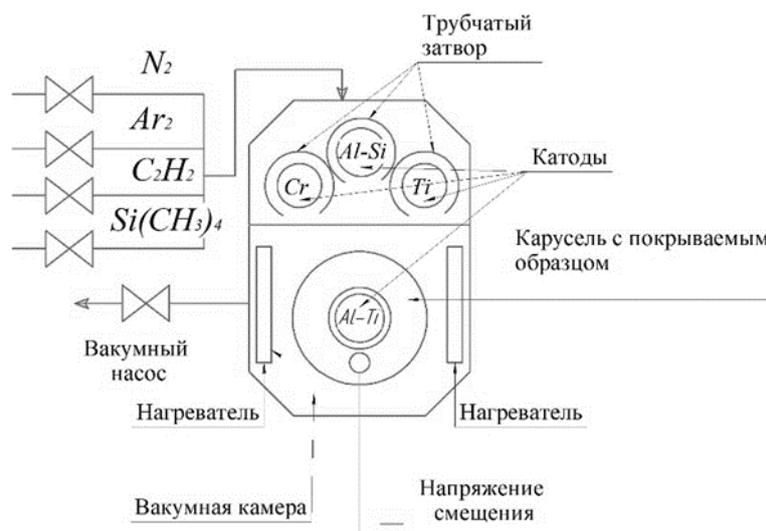


Рис. 1. Установка Palit PI 311, Швейцария

На плоские поверхности образцов наносились три состава покрытий:

1. TiN/(Ti,Al)N – нанослойная структура типа «сэндвич», первый слой (подслой) которой был из TiN толщиной 0,3–0,4 мкм и наносился для повышения прочности адгезии покрытия

к подложке. В сравнении с традиционными однослойными покрытиями выбранное нанослойное покрытие имело лучшее соотношение «микротвердость – модуль упругости», что особенно важно с учетом циклического характера нагрузок в процессе возвратно-поступательного и фреттинг-изнашивания [7–9].

2. (Cr,Al,Si)N – нанокompозитная структура. При испарении и осаждении различных элементов (Cr,Al и Si) не происходило их полного смешивания, а образовывалось двухфазное покрытие, в котором нанокристаллические зерна TiCrN были внедрены в аморфную матрицу SiN. Такая нанокompозитная структура значительно улучшает физико-механические характеристики покрытия, которое обладает высокой износостойкостью [10, 11].

3. (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si – внешний алмазоподобный слой этого покрытия состоял из аморфного гидрогенизированного углерода. Подслой (Cr,Al,Si)N толщиной 1,7–1,8 мкм формировался с целью снижения внутренних напряжений в a-C:H-пленке [12]. Пленки a-C:H:Si, благодаря наличию кремния, продемонстрировали значительно лучшую эластичность, приемлемые остаточные напряжения и термостойкость [13]. Было также установлено, что наилучшие показатели по термостойкости имеют a-C:H с содержанием Si 3 % [14]. Содержание Si в пленке регулировалось скоростью потока тетраметилсилана  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  в газовой смеси.

Общая толщина каждого из вариантов покрытий, которые были нанесены на керамику на основе SiAlON, составляла 3,7–3,8 мкм. Детальные условия и режимы осаждения покрытий приведены в работах [12, 13].

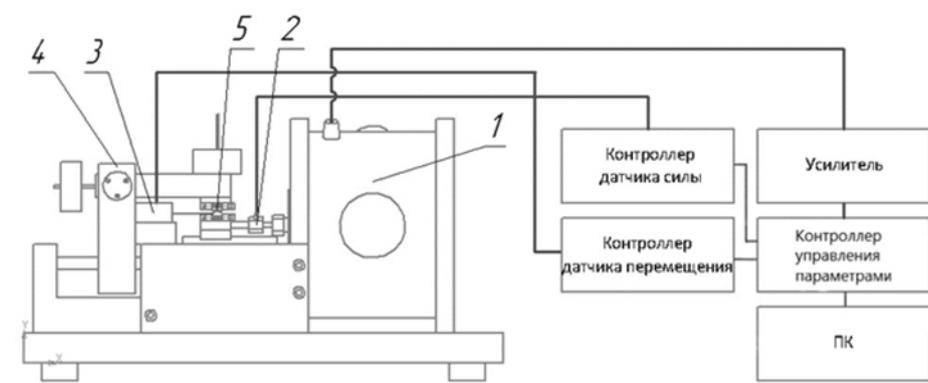
#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Измерение нанотвердости поверхности проводились в соответствии с рекомендациями [16]. По схеме наноиндентирования алмазным индентором Берковича на нанотвердомере CSEM были определены твердость по шкале Мартенса (НМ) и модуль упругости нитридных и a-C:H:Si покрытий. Глубина вдавливания во время испытаний поддерживалась на уровне 100 нм. Время нагрузки-разгрузки составило 50 с, приложенная нагрузка – 1,0 мН. Количественное значение нанотвердости рассчитывалось с помощью сертифицированного программного обеспечения CSEM [17].

Топографию поверхности керамических образцов с различными покрытиями анализировали на профилометре BrukerDektakxt, в системе которого предусмотрена электромеханическая схема измерения с использованием перемещения шупа с алмазным наконечником по поверхности образца. Требуемая область сканирования, скорость движения и сила нажатия стилуса программировались, а специализированное программное обеспечение позволило сформировать рельефные изображения исследуемых керамических образцов в формате 3D [17].

Исследования износостойкости проводились на машине трения, схема которой показана на рис. 2. Эта машина состоит из электромагнитного вибратора 1, который обеспечивает тестирование пар трения при возвратно-поступательном перемещении одного из образцов. Система нагружения в виде уравнивающего балансом рычага 4, передает в зону контакта 5 нормальную нагрузку, которая регулируется грузами различной массы. Системы регистрации и контроля параметров эксперимента включает: усилитель синусоидального сигнала (ММФ VEB METRA) и систему регистрации и контроля параметров: пьезоэлектрический датчик силы 3 PCB Piezotronic 208B ( $F_{\max} = \pm 200$  Н) с разрешением  $\Delta = 4$  мН и контроллер сигнала PCB Piezotronic 482A22, лазерный датчик перемещения 2 Keyence LC2420 ( $D_{\max} = \pm 250$  мкм, разрешение  $\Delta = 0,01$  мкм) с контроллером Keyence LC2400A.

Для задания, контроля и мониторинга параметров трибологических испытаний использовалось специальное программное обеспечение [18, 19], установленное на контроллере NI myRIO.



**Рис. 2.** Машина трения для исследования износостойкости:

1 – электромагнитный вибратор; 2 – пьезоэлектрический датчик силы;  
3 – лазерный датчик перемещения; 4 – уравновешенный баланс рычага; 5 – место контакта

Оценка трибологических свойств покрытий (коэффициент трения и износостойкость) проводилась на машине трения в возвратно-поступательном режиме. В качестве модельного контакта использовалась схема сфера/плоскость, при этом сферой служил шарик из ШХ-15 (Ø12,6 мм), а плоскостью – образец из SiAlON диаметром 20 мм и толщиной 9 мм с различными покрытиями. Условия испытаний представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Условия испытаний образцов

Смещение $D$ , мкм	Частота $f$ , Гц	Нагрузка $F_n$ , Н	Количество циклов, $N_c$	Окружающая среда
15	100	10	$5 \cdot 10^3$	Атмосфера лаборатории

Жесткость системы машины трения с приспособлением для крепления образцов оценивалась прямым измерением и составила  $k_c = 31$  МН/м. Методика этих исследований подробно изложена в [15]. Все эксперименты происходили в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23 °С, влажность –  $37 \pm 5$  %.

В ходе экспериментов и по их окончании фиксировались значения коэффициентов трения. Проводилось также измерение объема износа и визуальная оценка изношенных повреждений с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000. Технические возможности этого микроскопа позволили определять глубину пятен фреттинг-износа и величины объемного износа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений твердости по шкале Мартенса представлены в табл. 2. Этот параметр описывает упругопластическое поведение поверхностного слоя образца керамики с покрытиями.

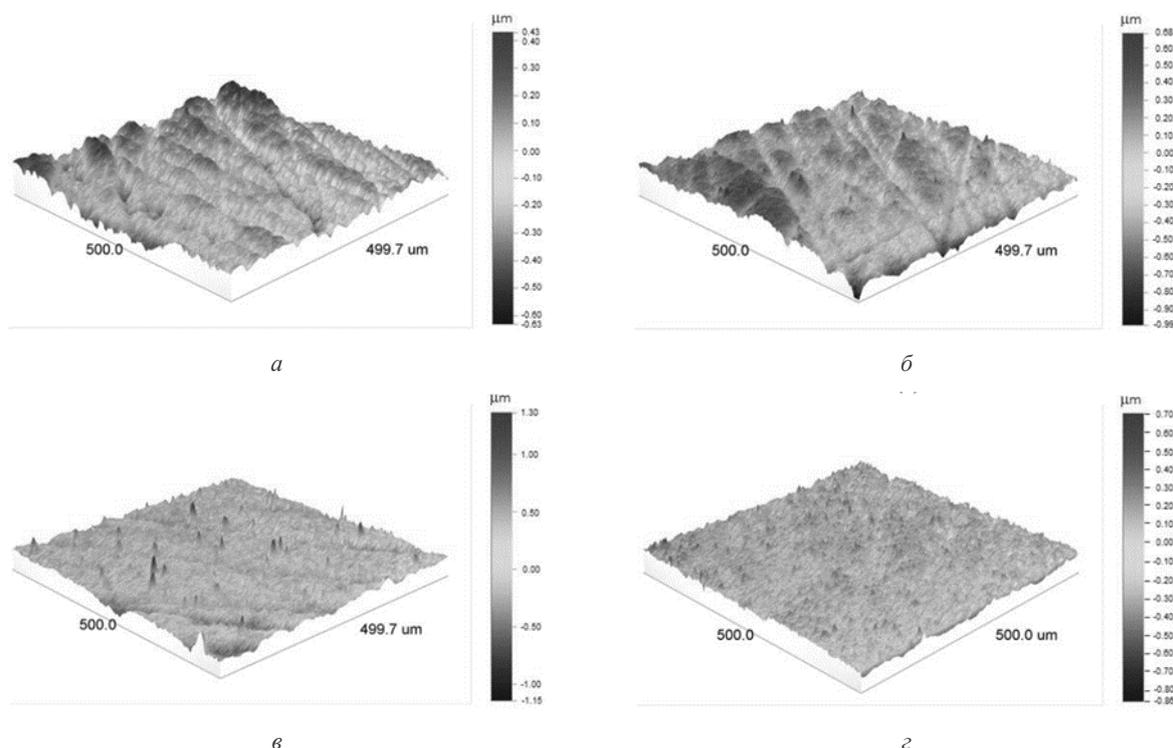
**Таблица 2.** Механические свойства различных покрытий, нанесенных на керамические образцы

Материал	Композиция покрытия	Твердость, НМ (ГПа)	Модуль упругости, $E$ (ГПа)	Индекс пластичности $H/E$
SiAlON + TiN	TiN/ (Ti,Al)N	$38 \pm 2$	$376 \pm 8$	0,101
SiAlON + TiN	(Cr,Al,Si)N	$29 \pm 1$	$321 \pm 6$	0,09
SiAlON + TiN	(Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si	$33 \pm 2$	$287 \pm 10$	0,114

Как показывают полученные экспериментальные данные, максимальная твердость (38 ГПа) наблюдается у образца с покрытием TiN/(Ti,Al)N. Покрытия (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si обеспечивают несколько более низкое значение НМ (33 ГПа). Минимальное значение (29 ГПа) было получено для покрытий (Cr,Al,Si)N. Из этого можно сделать вывод, что все исследованные покрытия повышают начальную твердость керамического материала SiAlON + TiN по сравнению с твердостью спеченных образцов, которая составляет 16 ГПа.

Анализ кривых наноиндентирования различных покрытий позволил определить не только их твердость, но и модуль упругости. Также был рассчитан индекс пластичности Н/Е, что позволяет косвенно оценить способность поверхностного слоя керамики сопротивляться деформации. Как видно из представленных данных, наилучшее сочетание свойств (максимальный показатель пластичности) имеет керамический образец с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si.

Влияние полученных покрытий на качество поверхности керамики на основе SiAlON показано на рис. 3. Качество поверхности керамики во многих случаях определяет стойкость к эксплуатационным нагрузкам [9, 20]. Видно, что на поверхности образца без покрытия имеются различимые абразивные царапины, расположенные хаотично под разными углами друг к другу. Кроме того, как было показано в предыдущих исследованиях [6, 7], СЭМ-анализ выявляет значительное количество кратеров на поверхности керамики, оставшихся от зерен, удаленных в процессе алмазного шлифования. Упомянутые особенности являются технологическими дефектами, присущими большинству даже самых современных процессов шлифования. Основная проблема заключается в том, что технологические дефекты служат концентраторами напряжений и повышают риск возникновения эксплуатационных дефектов, приводящих к хрупкому разрушению. Результаты, представленные на рис. 3, демонстрируют, что влияние покрытий неоднозначно. Установлено, что нанесение покрытия (Cr,Al,Si)N не оказывает существенного влияния на микрорельеф поверхности керамических образцов, покрытие TiN/(Ti,Al)N заметно увеличивает исходную шероховатость поверхности керамики, а покрытие (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si, заполняя царапины на поверхности керамических образцов, «маскируют» технологические дефекты.

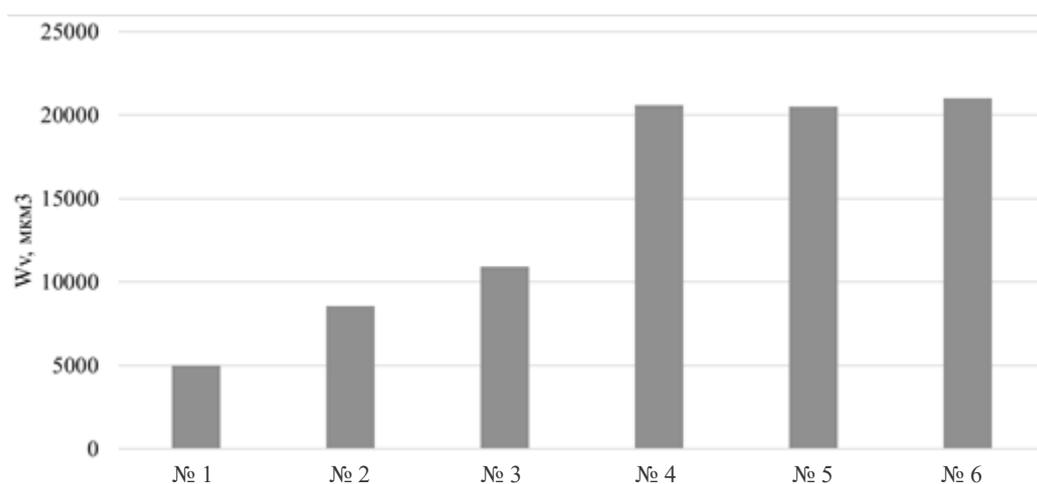


**Рис. 3.** 3D-изображения микрорельефа поверхности образцов керамики на основе SiAlON: а – без покрытия; б – с покрытием (Cr,Al,Si)N; в – с покрытием TiN/(Ti,Al)N; г – с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si

Определение трибологических характеристик покрытий проводилось при параметрах, представленных в табл. 1. Типы испытуемых покрытий с величинами объемного износа, измеряемого в конце испытаний, диаграмма сравнения объемных износов и зависимости изменения коэффициентов трения по количеству циклов фреттинга, представлены в табл. 3 и на рис. 4–6.

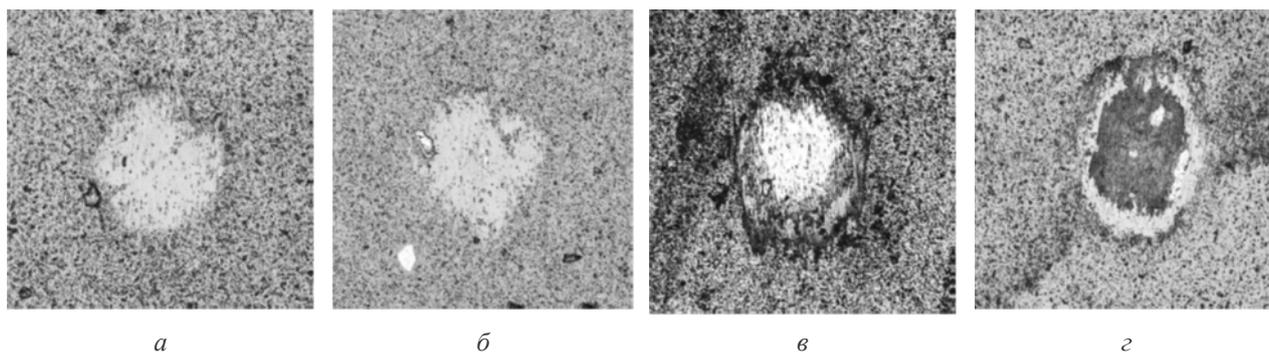
**Таблица 3.** Типы покрытий на керамических образцах

№ образцов	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Подложка	SiAlON	SiAlON	SiAlON	SiAlON	SiAlON	SiAlON
Покрытие	(CrAlSi)N/ aC:H	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si
Контртело	ШХ15	ШХ15	ШХ15	ШХ15	ШХ15	ШХ15
% Si в покрытии	–	0,8 %	3 %	5 %	7 %	10 %
Износ, Wv мкм <sup>3</sup>	5000	8567	10935	20587	20500	21000



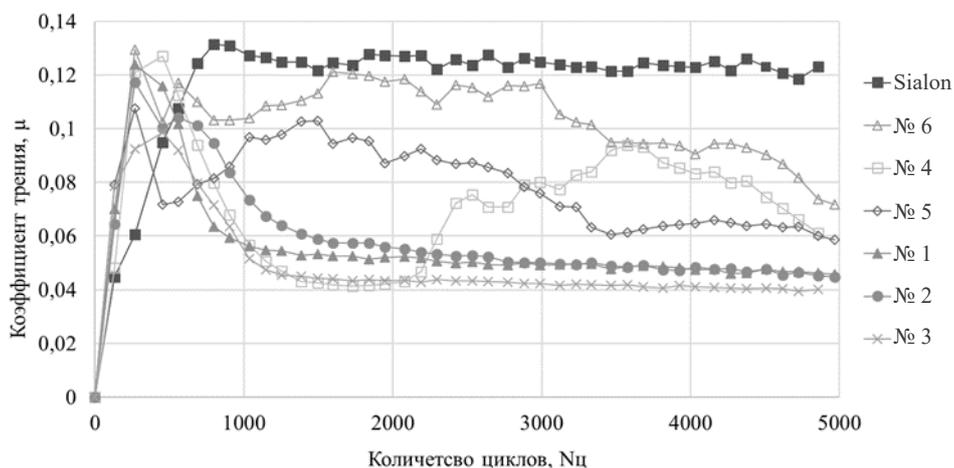
**Рис. 4.** Диаграмма сравнения объемного износа покрытий

Как показал анализ полученных результатов, легирование кремнием алмазоподобной углеродной пленки путем ввода различного содержания тетраметилсилана  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  в состав смеси газов при реализации процесса PACVD, уменьшает износостойкость всех сформированных покрытий на основе  $(\text{CrAlSi})\text{N} + \text{aC:H:Si}$ . Из диаграммы сравнения на рис. 4 видно, что после повышения процентного содержания Si больше чем на 3 %, объемный износ покрытий резко увеличивается и практически не реагирует на увеличивающееся содержание кремния в покрытии, оставаясь на прежнем высоком уровне. Объяснение этому явлению можно обнаружить из анализа пятен износа, представленных на рис. 5.



**Рис. 5.** Фотографии пятен износа на поверхности образцов:  
а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4

Из анализа этих пятен следует, что на образце с 3 % содержанием кремния покрытие еще работает, а при увеличении его содержания до 5 % наступает «пробой» покрытия и начинает дополнительно изнашиваться подложка сиалон, присутствие которой и определяет дальнейшее поведение объемного износа, оставаясь на примерно одинаковом уровне и практически не зависящим от содержания кремния в покрытии, как это следует из диаграммы на рис. 4.



**Рис. 6.** Зависимости коэффициентов трения покрытий от числа циклов фреттинга

Поведение коэффициентов трения  $\mu$  в зависимости от количества циклов  $N_{ц}$  для всех сформированных покрытий позволяет установить (рис. 6), что:

- присутствие кремния в покрытии с содержанием до 3 % не влияет на поведение коэффициента трения, и при этом не ухудшает полученные наименьшие значения  $\mu = 0,04\text{--}0,045$ ;
- дальнейшее увеличение присутствия кремния в покрытиях приводит к резкому изменению в характере зависимостей коэффициентов трения, они становятся резкими, неустойчивыми со значительным увеличением и колебаниями значений  $\mu$ , и при 10 % содержании кремния в покрытии значения  $\mu$  выходят на уровень сиалона без покрытия, где  $\mu = 0,12$ ;
- поведение коэффициентов трения в диапазоне  $0,04 \leq \mu \leq 0,12$  объясняется наличием в контакте трения, так называемого «третьего тела», представляющего собой скопление частиц износа (дебризов), количество которых постепенно удаляется из зоны контакта, что сказывается на поведении коэффициентов трения;
- характерно поведение коэффициента трения покрытия с 5 % содержанием кремния: в начале это поведение не отличается от поведения образцов № 1–3, но при  $\sim 2 \cdot 10^3$  числе циклов наступает «пробой» покрытия и резко меняется поведение  $\mu$ , увеличиваясь до значения 0,09.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования многослойных композиционных ТСП на сиалоне показали, что использование сиалона для нужд авиационной промышленности может успешно идти по двум направлениям: для работы в составе узлов трения с покрытиями, обеспечивающими снижение коэффициентов трения при работе как в условиях действия нормальных температур, так и в высокотемпературных условиях, обеспечивая повышение ресурса и надежности этих узлов; и для использования сиалона с покрытиями в качестве инструментальной керамики в процессах механической обработки жаропрочных сплавов типа Inconel, обеспечивая высокую износостойкость применяемых инструментов.

С помощью полученных результатов наноидентирования сформированных покрытий и анализа кривых наноинdentирования были определены не только их твердость, но и модуль упругости. Установлено, что нанотвердость многослойных покрытий, внешний слой которых представляет собой алмазоподобную пленку a-C:H, легированную кремнием (3 мас.%), обладает относительно высокой твердостью с наилучшим рассчитанным индексом пластичности  $H/E$ , что позволяет косвенно оценить наиболее высокую из всех исследованных покрытий способность поверхностного слоя керамики с указанным покрытием сопротивляться деформации. Как видно из представленных данных, наилучшее сочетание свойств (максимальный показатель пластичности) имеет керамический образец с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si.

Важным результатом исследований является полученная при анализе топографии поверхности керамических образцов с различными покрытиями информация о влиянии покрытий на микрорельеф рабочей поверхности образцов, предварительно подвергшихся шлифованию. Установлено, что нанесение покрытия (Cr,Al,Si)N не оказывает существенного влияния на микрорельеф поверхности керамических образцов, покрытие TiN/(Ti,Al)N заметно увеличивает исходную шероховатость поверхности керамики, а покрытия (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si, заполняя царапины на поверхности керамических образцов, «маскируют» технологические дефекты, неизбежные для всех современных процессов шлифования. Этот результат способствует повышению эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей пар трения.

Впервые проведенные трибологические исследования (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si с различным содержанием кремния Si позволили установить, что содержание Si в объеме 3 мас.% является оптимальным не только с точки зрения повышенной термостойкости покрытия, но и с точки зрения достижения высоких трибологических характеристик. Измерения объемного износа и анализ вида пятен износа показали, что после повышения процентного содержания Si больше чем 3 % объемный износ покрытий резко увеличивается и практически не реагирует на увеличивающееся содержание кремния в покрытии, оставаясь на прежнем высоком уровне. Пятна износа не только продемонстрировали характерный «пробой» покрытия после превышения 3 % порога в содержании кремния, но и подтвердили полученный результат.

Полученные зависимости коэффициента трения по числу циклов фреттинга показали, что присутствие кремния в составе (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si покрытия, улучшая отмеченные выше эксплуатационные характеристики покрытий, не ухудшают коэффициенты трения. А после традиционной приработки держат их на уровне  $\mu = 0,04-0,045$  до окончания испытаний  $\sim 5 \cdot 10^3$  циклов. Анализ этих зависимостей позволил также объяснить их поведение в диапазоне коэффициентов трения  $0,04 \leq \mu \leq 0,12$  наличием, так называемого, «третьего тела», представляющего собой скопление частиц износа (дебризов), количество которых постепенно удаляется из зоны фреттинга, что сказывается на поведении коэффициентов трения. Отмечаются и такие трибологические особенности поведения исследуемых покрытий, как при повышении кремния в покрытии до 10 % коэффициент трения достигает значения коэффициента трения сиалона без покрытия, а для покрытия с 5 % содержанием кремния отмечается, что

если в начале испытаний его поведение не отличается от поведения образцов № 1–3, то при  $\sim 2 \cdot 10^3$  числе циклов наступает «пробой» покрытия и резко увеличивается коэффициент трения, достигая значения 0,09. Разработанную и опробованную методику исследования трибологических свойств ТСП планируется использовать для ее дальнейшего развития в направлении построения и анализа карт фреттинга и индекса скольжения с построением петель гистерезиса, характерных для процесса фреттинга.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

*Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90118.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каблов Е. Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. [ Е. N. Kablov, “Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC RF for the implementation of “Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030””, (in Russian), in *Aviacionnye materialy i tehnologii*, no. 1 (34), pp. 3-33, 2015. ]
2. **Стрелов К. К., Кашеев И. Д.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1996. 608 с. [ К. К. Strelkov, I. D. Kasheev, *Theoretical foundations of technology of refractory materials: textbook for universities. 2nd ed., revised. and additional*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1996. ]
3. **Кочина Т. Б.** Применение высокопроизводительного режущего инструмента при механической обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе // Металлообработка. 2009. № 3 (51). С. 5–7. [ Т. В. Kochina, “The use of high-performance cutting tools in the machining of nickel-based heat-resistant alloys”, (in Russian), in *Metalloobrabotka*, no. 3 (51), pp. 5-7, 2009. ]
4. **Voevodin A. A., Muratore C., Aouadi S. M.** Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 257. Pp. 247-265.
5. **Верещака А. А.** Функциональные покрытия для режущих инструментов //Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 25–37. [ А. А. Vereshchaka, “Functional coatings for cutting tools”, (in Russian), in *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta*, no. 4 (48), pp. 25-37, 2015. ]
6. **Development** of DLC-Coated Solid SiAlON/TiN Ceramic End Mills for Nickel Alloy Machining: Problems and Prospects / S. N. Grigoriev, et al. // Coatings. 2021. Vol. 11, No. 5. Pp. 532-559.
7. **The role** of thin-film vacuum-plasma coatings and their influence on the efficiency of ceramic cutting inserts / M. Volosova, et al. // Coatings. 2018. Vol. 8, No. 8. Article number 287.
8. **DLC-coating** application to improve the durability of ceramic tools / S. Grigoriev, et al. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2019. Vol. 28, No. 7. Pp. 4415-4426.
9. **Kuzin V. V., Grigor'ev S. N., Volosova M. A.** Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under non-steady thermoelastic conditions // Refractories and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 54, No. 5. Pp. 376-380.
10. **Fabrication** of  $\beta$ -sialon nanoceramics by high-energy mechanical milling and spark plasma sintering / X. Xu, et al. // Nanotechnology. 2005. Vol. 16, No. 9. Pp. 1569-1573.
11. **Properties** of TiC and TiN Reinforced Alumina–Zirconia Composites Sintered with Spark Plasma Technique / M. Szutkowska, et al. // Metals. Vol. 9, No. 11. Article number 1220.
12. **Effect** of Sintering Temperature and Yttrium Composition on the Densification, Microstructure and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered Silicon Nitride Ceramics with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Additives / N. Jojo, et al. // Silicon. 2019. Vol. 11. Pp. 2689-2699.
13. **First-principles** investigation of titanium doping into  $\beta$ -SiAlON crystal in TiN–SiAlON composites for EDM applications / A. Kandemir, et al. // Materials Chemistry and Physics. 2015. Vol. 162. Pp. 781-786.
14. **Oxidation** resistance of  $\beta$ -Sialon/TiN composites: an ion beam analysis (IBA) study / P. Calloch, et al. // Journal of Materials Science. 2018. Vol. 53, No. 22. Pp. 15348-15361.
15. **Herrmann M., Höhn S., Bales A.** Kinetics of rare earth incorporation and its role in densification and microstructure formation of  $\alpha$ -Sialon // Journal of the European Ceramic Society. 2012. Vol. 32, No. 7. Pp. 1313-1319.
16. **Microwave** sintering of SiAlON ceramics with TiN addition / Ö. Sevgi Canarlan, et al. // Materials. 2019. Vol. 12, No. 8. Article number 1345.
17. **Effect** of PACVD deposition of nitride and Si-containing amorphous hydrogenated carbon films on the tribological characteristics of SiAlON ceramics / M. Volosova, et al. // Proc. SPIE. Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII. 2021. Vol. 11802. Article number 118020T.
18. **Система** трибомониторинга для исследования процесса фреттинг-изнашивания в условиях возвратно-поступательно-го скольжения / М. С. Еремкина [и др.] //Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 1. С. 84–87. [ М. S. Eremkina, et al.,

“Tribomonitoring system for studying the process of fretting wear under conditions of reciprocating sliding”, (in Russian), in *Nauchno-technicheskiy vestnik Povoljy*, no. 1, pp. 84-87, 2020. ]

19. **Программное** обеспечение для определения трибологических характеристик пар трения автоматизированного испытательного стенда «Машина трения 1401»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667087 / М. А. Ляховецкий [и др.]. Заявка № 2020667087. Дата поступления 10.12.2020. Дата регистрации 21.12.2020. М.: Роспатент, 2020. [ М. А. Lyakhovetskiy, *et al.*, “Software for determining the tribological characteristics of friction pairs of the automated test bench “Friction Machine 1401””, (in Russian), *The Certificate of Official Registration of the Computer Programm*, no. 2020667087, 2020. ]

20. **The Effectiveness of Diamond-like Carbon a-C:H:Si Coatings in Increasing the Cutting Capability of Radius End Mills When Machining Heat-Resistant Nickel Alloys** / S. N. Grigoriev, et al. // *Coatings*. 2022. Vol. 12, No. 2. Article number 206.

#### ОБ АВТОРАХ

**ЛЕСНЕВСКИЙ Леонид Николаевич**, проф. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» (МАИ). Д-р техн. наук (МАИ, 2002). Иссл. в обл. плазменных технологий формирования покрытий.

**ЛЯХОВЕЦКИЙ Максим Александрович**, доц. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов» (МАИ). Канд. техн. наук (МАИ, 2014). Иссл. в обл. технологии модификации поверхности и нанесения покрытий.

**НИКОЛАЕВ Илья Алексеевич**, асп. каф. «Технология производства двигателей летательных аппаратов», МАИ. Дипл. маг. по авиац. двиг. (МАИ, 2018). Готовит дис. о повышении фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием твердых смазочных покрытий».

**ВОЛОСОВА Марина Александровна**, доц. каф. высокоэфф. техн. обраб. СТАНКИН. Канд. техн. наук (СТАНКИН, 2003). Иссл. в обл. повышения стойкости быстрорежущего инструмента за счет вакуумно-плазменной поверхностной обработки.

**LESNEVSKIY, Leonid Nikolaevich**, Prof., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines (MAI). Dr. of Tech. Sci. (MAI, 2002). Research in the field of plasma technologies for the formation of coatings.

**LYAKHOVETSKIY, Maxim Aleksandrovich**, Assoc. Prof., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines (MAI). Cand. of Tech. Sci. (MAI, 2014). Research in the region surface modification and coating technologies.

**NIKOLAEV, Ilya Alekseevich**, Postgrad. stud., Dept. of Tech. for the production of aircraft engines (MAI). Dipl. master Degree in Aircraft Eng. (MAI, 2018). He is preparing a dissertation on increasing the fretting resistance of aircraft engines and power plants elements using solid lubricating coatings.

**VOLOSOVA, Marina Aleksandrovna**, Assoc. Prof., Dept. of Highly Efficient Processing Technologies. Cand. of Tech. Sci. (STANKIN, 2003). Research in the region increasing the durability of high-speed tools due to vacuum-plasma surface treatment.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 13-23, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).