

УДК 629.7.023

Д.А. Александров¹, Н.И. Артеменко¹**ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ
ДЕТАЛЕЙ ТРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГТД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6

Представлены перспективы применения износостойких покрытий для деталей трения ГТД. Показаны основные направления в области развития износостойких покрытий за рубежом, а также приведены результаты работ по разработке высокотемпературных износостойких покрытий. Представлены данные по износостойкости, жаростойкости, металлографическим исследованиям износостойких покрытий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: износостойкие покрытия, детали трения ГТД, ионно-плазменные покрытия, керамические покрытия.

The article presents perspectives for application of wear-resistant coatings for gas turbine engine friction parts. The main directions of development of wear-resistant coatings abroad, as well as results of work on development of high wear-resistant coatings are adduced. The data on the durability, heat resistance, wear-resistant coatings metallographic studies are presented.

The research is executed within the implementation of the complex scientific direction 17.3. «Multi-layer heat-resistant coatings, nanostructured strengthening erosion and corrosion-resistant, wear-resistant, anti-fretting coatings to protect parts of hot section and compressor of turbine engine and gas turbine» («The Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: wear-resistant coatings, friction parts of GTE, ion-plasma coatings, ceramic coatings.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Современные ГТД являются сложными научно-техническими изделиями, при производстве которых решается целый ряд задач, таких как разработка высоконагруженных деталей из жаропрочных материалов для турбины и камеры сгорания, защитных и упрочняющих покрытий для лопаток компрессора высокого и низкого давления и др. [2]. В газотурбинном двигателе имеется много ответственных деталей, постоянно или временно работающих в условиях сухого трения, – это лабиринтные и щеточные уплотнения, газодинамические подшипники, валы-втулки поворотных лопаток направляющего аппарата компрессора и др. Для предотвращения износа подобных пар трения, которые обычно работают при повышенных температурах, применяют специальные износостойкие покрытия. Требования к подобным покрытиям – обеспечение низкой шероховатости поверхности, высокая твердость и износостойкость.

Щеточные и лабиринтные уплотнения применяют для снижения утечки охлаждающего воздуха в турбине. Ликвидация непроизводительных утечек газа и охлаждающего воздуха представляет собой одну из наиболее важных и значительных по получаемому эффекту задач при проектировании турбины. Утечка в проточную часть турбины каждого процента охлаждающего воздуха, отбираемого за компрессором высокого давления, приводит к увеличению удельного расхода топлива на 0,3% и увеличению температуры газа перед ротором ТВД на 10°C. Работа уплотнений происходит в контакте с титановыми и никелевыми роторами, разделяющими полости газоздушного тракта турбины и компрессора ГТД, приводя к износу роторов и увеличению зазора между ротором (валом) и уплотнительными элементами, что снижает эффективность работы уплотнительного соединения и приводит к потерям охлаждающего воздуха. Износ ротора или вала компрессора и турбины ГТД, работающих при высоких температурах и скоростях вращения, может привести к снижению их усталостного сопротивления и разрушению.

Газодинамические опоры для быстровращающихся валов используются в различных отраслях техники и, в частности, как опоры валов механических гироскопов, вращающихся при 60–125 тыс. об/мин, или опоры для высокоскоростных малоразмерных газовых турбин (при скоростях вращения свыше 30–35 тыс. об/мин) и других высокоскоростных валов (центрифуг, мельниц и т. д.). Отсутствие необходимости непрерывной смазки под давлением таких опор в процессе эксплуатации существенно упрощает конструкцию устройств, в которых используются такие опоры, и повышает ресурс и надежность их работы. В процессе эксплуатации газодинамических опор имеет место износ цапфы валов и лепестков, создающих аэродинамическую силу, как в процессе выхода вала на требуемую стационарную скорость вращения, так и при остановке вращения, когда имеет место контакт между рабочей поверхностью цапфы и лепестками. В момент касания при остановке скорость вращения вала обычно составляет 10–25% от номинальной скорости вращения вала. Поэтому на переходных режимах наблюдается интенсивный износ трущихся поверхностей, сопровождаемый интенсивным нагревом, что требует разработки специальных износостойких покрытий для их защиты. Такие покрытия должны иметь высокую микротвердость и полированную поверхность, а также обеспечивать работу трущейся пары при высоких температурах (до 500–600°C) в зоне контакта. В качестве покрытия на лепестки рекомендуются износостойкие ионно-плазменные покрытия на основе карбидов или карбонитридов металлов, наносимые либо методами магнетронного распыления, либо вакуумно-дугового испарения. Так, в качестве износостойкого покрытия для лепестков можно рекомендовать покрытие из карбида хрома или карбида титана или карбонитрида титана. В случае применения износостойкого покрытия, полученного ионно-плазменным осаждением с использованием процесса генерации плазмы вакуумной дугой, в нем могут наблюдаться микрокапли из карбидообразующего металла. Однако эти микрокапли имеют низкую микротвердость (~200 кг/мм²) и в процессе работы покрытия притираются, не ухудшая характеристик покрытия. При выборе метода нанесения тонкого и твердого покрытия для лепестков необходимо учесть, что по сравнению с покрытиями, полученными магнетронным распылением, вакуумно-дуговые ионно-плазменные покрытия имеют более высокую адгезию к основе (>10 кг/мм²), что предохраняет их от возможных задиров в процессе эксплуатации.

Исходя из поставленных задач можно сформулировать общие требования к износостойким покрытиям, применимым для защиты деталей трения ГТД от высокотемпературного износа: высокая микротвердость при сохранении пластичности, высокая адгезия к основе, температура эксплуатации >500°C при длительной жаростойкости,

низкая шероховатость поверхности для снижения трения между контактирующими деталями пары.

Разработкой подобных покрытий за рубежом занимаются такие фирмы, как Honeywell International Inc., NASA, General Electric, Dow Global Technologies Inc., Union Carbide Coatings Corp., Kennametal Inc., United Technologies, General Electric (США), MTU Aeroengines и Sulzer Metco (Германия). По данным отечественных и зарубежных источников, износостойкими высокотемпературными покрытиями можно считать покрытия, представляющие собой одно- или многослойные структуры из твердых материалов с температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), близким к ТКЛР основного материала, обладающие низким коэффициентом трения и хорошей обрабатываемостью, позволяющей получать шероховатость рабочей поверхности $R_a < 0,5$ мкм. Такие покрытия имеют высокую адгезию к основному материалу и обладают достаточно высокой теплостойкостью и износостойкостью.

Большой интерес как в России, так и за рубежом вызывает использование сплавов, содержащих редкоземельные металлы (РЗМ). Оксиды РЗМ, таких как иттрий, гадолиний, празеодим, находят широкое применение при изготовлении перспективных керамик для теплозащитных покрытий. Наличие РЗМ в подобной керамике (до 15%) существенно понижает ее теплопроводность и повышает механические свойства. Одной из сравнительно недавно открытых областей применения керамики стало использование ее для высокотемпературных износостойких покрытий.

Такие покрытия могут применяться для повышения износостойкости деталей ГТУ и ГПА (детали газодинамических подшипников валов турбины и компрессора и другие высокотемпературные пары трения) при температурах $> 500^\circ\text{C}$, при этом существенно интенсифицируются окислительные процессы в системе «основа–покрытие». Легирование РЗМ сплавов для нанесения износостойких покрытий позволяет получить на поверхности покрытия устойчивые оксиды, что повысит стойкость такого покрытия к окислению при температуре до 600°C .

Основные технологии нанесения высокотемпературных износостойких покрытий – это различные способы плазменного напыления (APS, LPPS), высокоскоростного напыления (HVOF) и детонационного напыления с последующей финишной доводкой рабочей поверхности покрытия, а также различные способы ионно-плазменного осаждения, в том числе с использованием ассистированного осаждения и (или) ионной имплантации, позволяющие получать покрытия заданной толщины с минимальной финишной обработкой поверхности после нанесения покрытия. Широкое использование в трибологии получили нанопокрyтия, в том числе с самоорганизующейся структурой, которая трансформируется в процессе эксплуатации и позволяет существенно увеличить ресурс защищаемых деталей. Несмотря на повышенный интерес во всем мире к износостойким и высокотемпературным износостойким покрытиям и способам их получения, применение сплавов, легированных РЗМ, или их твердых соединений в таких покрытиях является сравнительно недавней тенденцией, и в России интерес к подобным системам пока небольшой.

Следует также отметить разработку алмазоподобных покрытий, которые могут применяться для повышения ресурса пар трения. В работах [3, 4] описаны исследования структуры и триботехнических свойств алмазоподобных водородсодержащих покрытий, легированных кремнием и молибденом. Результаты структурных исследований указывают на образование наноразмерных включений карбидной фазы в покрытиях, легированных одновременно молибденом и кремнием. Однако работы по использованию алмазоподобных покрытий в области трибологии в России или странах СНГ носят пока теоретический или экспериментальный характер.

Отметим также новое направление в развитии износостойких покрытий – появление «умных» материалов. Покрытия представляют собой многослойную структуру, содержащую чередующиеся слои дисульфида молибдена, наносимого магнетронным распылением, и керамического оксида циркония, стабилизированного иттрием с добавлением РЗМ (Er и Sm). Керамический слой наносят лазерным осаждением. В качестве клеящего слоя между слоями применяется титан, наносимый дуговым осаждением. Толщина клеящего слоя <100 нм, толщина слоя дисульфида <250 нм, керамический слой толщиной ~650 нм. Общая толщина покрытия, в зависимости от поставленной перед разработчиками задачи, достигает >3 мкм. Эффект «умного» покрытия достигается благодаря перераспределению и демпфированию напряжений между слоями в зависимости от внешней нагрузки [5]. В работе [6] приведены различные конструкции «адаптивных» покрытий:

- на основе алмазоподобной матрицы с включениями твердых частиц из карбида вольфрама и смазывающих – из дисульфидов вольфрама или молибдена;
- на основе матрицы из золота и керамики (YSZ) с включениями мелкодисперсных частиц из дисульфида молибдена и алмазоподобных частиц углерода.

Особого внимания заслуживает механизм работы данных покрытий в зависимости от условий трения – в сухой или влажной среде. Во влажной среде работают алмазоподобные частицы, в которых происходит фазовое превращение с образованием структуры, обеспечивающей низкий коэффициент трения. При сухом трении основную роль играют включения дисульфида молибдена и карбида вольфрама, которые благодаря нахождению в матрице имеют аморфную структуру, но во время процесса трения их структура становится кристаллической, что обеспечивает повышенную износостойкость и низкий коэффициент трения (до 0,01) вследствие базисной ориентации кристаллов MoS₂ и WS₂ параллельно плоскости скольжения.

Следует добавить, что данное направление очень перспективно, однако пока технология нанесения подобных покрытий является дорогостоящей и экспериментальной и не находит широкого применения в промышленности.

В ВИАМ имеется большой научно-технический задел в области создания и разработки технологий нанесения различных функциональных покрытий. Проводятся работы в области жаростойких и теплозащитных керамических покрытий [7, 8], разработан перспективный метод ионного модифицирования лопаток турбины и компрессора [9, 10]. В области упрочняющих покрытий разработаны эрозионностойкие нанослойные, жаростойкие, антифреттинговые и демпфирующие покрытия для ответственных деталей компрессора ГТД [11–15]. В разработке покрытий применяется комплексный подход, т. е. покрытия являются многофункциональными и помимо основного свойства (например, эрозионной стойкости) обладают также и коррозионной стойкостью во всеклиматических условиях [16]. Следует отметить, что ВИАМ располагает комплексом промышленного оборудования для нанесения различных функциональных покрытий.

Материалы и методы

На ионно-плазменной установке МАП-3 на образцы из сталей ЭП517-Ш и ВКС-170 наносили различные износостойкие покрытия систем: (Ti–Zr–Y)–N, (Zr–Y–Gd–Hf)–O, (Zr–Y–Gd–Al)–O, (Zr–Y–Gd–Al)–O+MoS₂. Покрытия наносили разными способами: покрытие (Ti–Zr–Y)N – вакуумно-дуговым способом на ионно-плазменной установке МАП-3; покрытия (Zr–Y–Gd–Hf)–O и (Zr–Y–Gd–Al)–O – среднечастотным магнетронным распылением на установке УОКС-2; покрытие (Zr–Y–Gd–Al)–O+MoS₂ – комбинированное, представляет собой керамическую основу, открытая пористость которой пропитана твердой смазкой в виде дисульфида молибдена (MoS₂).

После нанесения покрытия на образцах-свидетелях проводили металлографические исследования, а также измеряли шероховатость покрытий:

- металлографические – на оптическом микроскопе фирмы Olimpus с цифровой системой обработки изображения при увеличениях до $\times(500-1000)$;
- шероховатость поверхности – при помощи профилометра.

Жаростойкость износостойких покрытий определяли по результатам испытаний в атмосферной печи с измерением удельного изменения массы образцов по ГОСТ 6130–71.

Помимо разработки материалов большое значение следует уделять созданию и исследованию методик испытаний новых материалов – например, на демпфирующую способность [17], для определения напряжений или испытаний на износостойкость [18, 19]. Для определения износостойкости в ВИАМ разработана методика для проведения испытаний. В качестве испытательного стенда используют трибометр UMT-3 фирмы CETR (США), реализующий методы испытаний «шар по диску» и «пальчик по диску». Первый метод применяют для сравнительной оценки различных износостойких покрытий, второй – для оценки работы покрытий в условиях конкретной пары трения. Нагрузку при испытаниях пары трения рассчитывали с допущением, что она в нормальных условиях эксплуатации при сухом трении не превысит модуль упругости трущихся поверхностей. Для стали ЭП517-Ш она составляла 0,76 Н при пути трения 500 м и скорости вращения диска 1 м/с. Испытания проводили при температуре 600°C, в качестве контртела использовали шарик из карбида вольфрама или пальчик из стали ВКС-170. Измерение глубины изнашивания проводили при помощи профилометра со снятием нескольких профилограмм с трех испытаний одного покрытия и усреднением полученного линейного износа.

Результаты

В табл.1 приведены результаты сравнительных испытаний на износостойкость полученных покрытий.

Таблица 1

Результаты испытаний (при температуре 600°C) на износостойкость образцов из сталей ЭП517-Ш (основа) и ВКС-170 с износостойкими покрытиями

Износостойкое покрытие	Контртелo	Линейный износ, мкм
Без покрытия	Шарик из карбида вольфрама $\varnothing 6$ мм	14,8
	Пальчик из стали ВКС-170	16,6
(Ti–Zr–Y)–N	Шарик из карбида вольфрама $\varnothing 6$ мм	2,5
(Zr–Y–Gd–Hf)–O	Шарик из карбида вольфрама $\varnothing 6$ мм	2,16
(Zr–Y–Gd–Al)–O	Шарик из карбида вольфрама $\varnothing 6$ мм	2,12
	Пальчик из стали ВКС-170	1,5
	Пальчик из стали ВКС-170 с покрытием (Zr–Y–Gd–Al)–O	1,5
(Zr–Y–Gd–Al)–O+MoS ₂	Шарик из карбида вольфрама $\varnothing 6$ мм	1,16
	Пальчик из стали ВКС-170	1,2

Установлено, что линейный износ образцов с покрытием и без него составляет от 1,16 до 16,6 мкм. На рис. 1 приведены микроструктуры некоторых полученных износостойких покрытий. Толщина полученных покрытий составляет от 5 до 16 мкм. В табл. 2 приведены результаты определения шероховатости поверхности полученных покрытий.

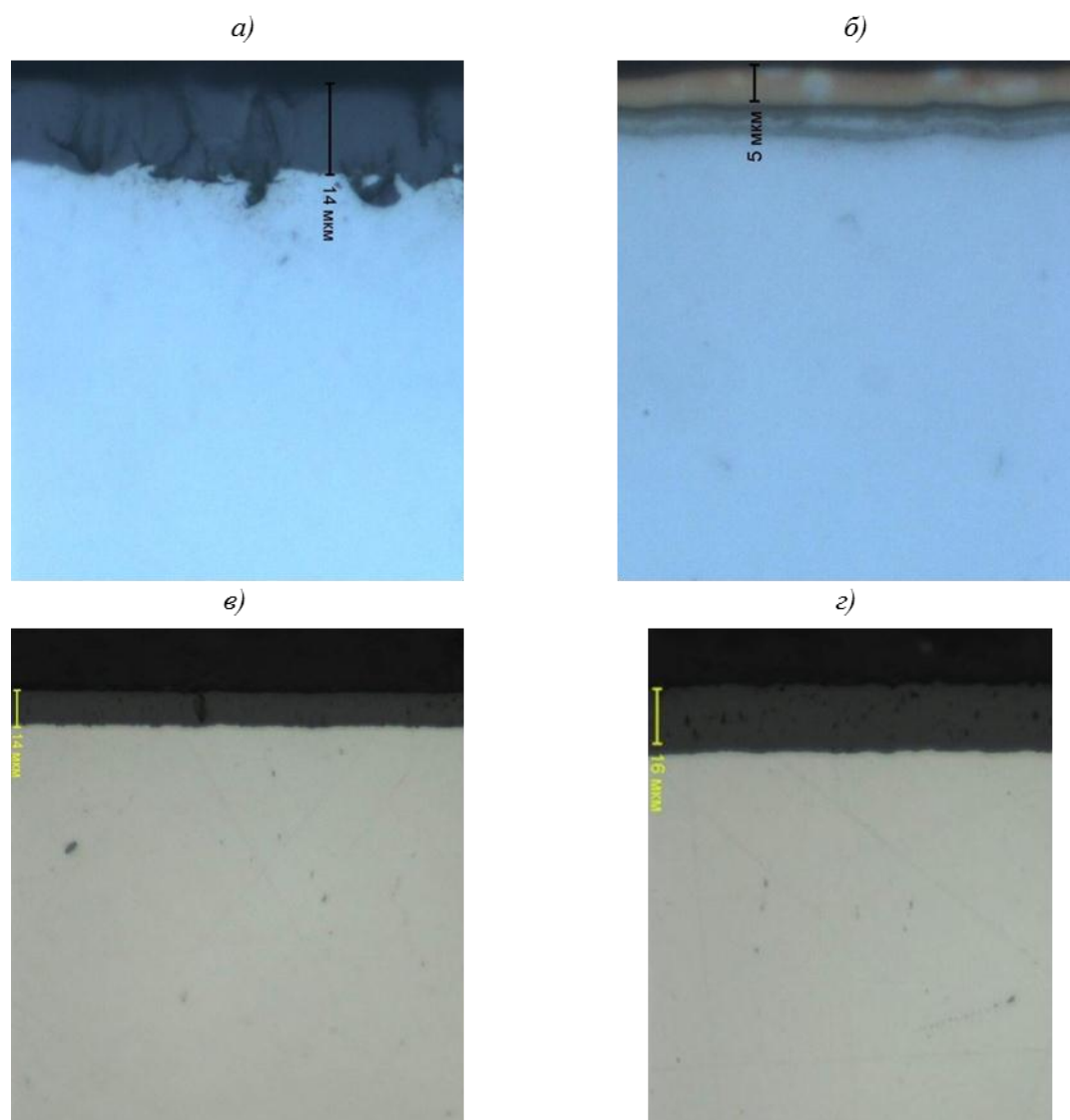


Рис. 1. Микроструктуры износостойких покрытий на образцах из стали ЭП517-III систем: а – (Zr–Y–Gd–Hf)–O; б – (Ti–Zr–Y)–N; в – (Zr–Y–Gd–Al)–O; г – (Zr–Y–Gd–Al)–O+MoS₂

Таблица 2

Значения шероховатости поверхности полученных износостойких покрытий на сплаве ЭП517-III

Система покрытия	Значения шероховатости		
	R_{\max}	R_z	R_a
(Zr–Y–Gd–Hf)–O	10,1	6,6	0,6
(Zr–Y–Gd–Al)–O	12,8	5,0	0,3
(Ti–Zr–Y)–N	9,1	7,7	0,7

Видно, что шероховатость поверхности составляет $R_a=0,3-0,7$ мкм. Очевидно, что на шероховатость поверхности представленных керамических покрытий систем (Zr–Y–Gd–Hf)–O и (Zr–Y–Gd–Al)–O оказывает влияние легирование основного циркониевого сплава металлической мишени для получения керамических покрытий.

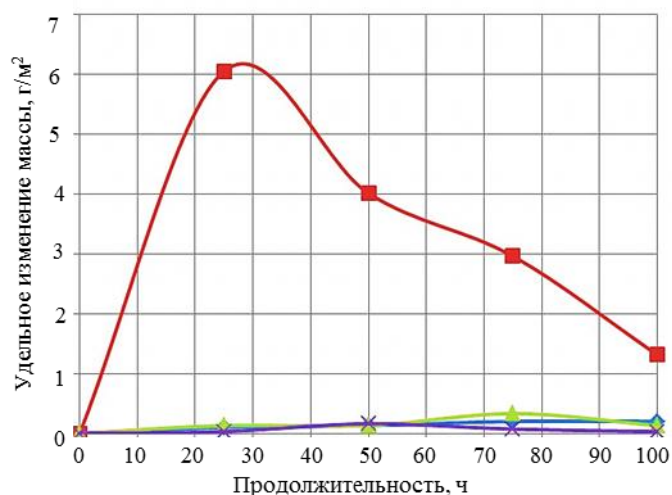


Рис. 2. Удельное изменение массы образцов на основе стали ЭП517-Ш после испытаний при температуре 600°C на базе 100 ч износостойких покрытий систем: (Ti-Zr-Y)-N (■), (Zr-Y-Gd-Hf)-O (▲) и (Zr-Y-Gd-Al)-O (×) (◆ – без покрытия)

На рис. 2 представлены результаты испытаний на жаростойкость полученных покрытий. Исследование жаростойкости износостойких покрытий показало, что керамические покрытия являются более термостабильными при температуре 600°C, чем ионно-плазменное покрытие системы (Ti-Zr-Y)-N. Рабочая температура покрытий на основе нитридов титана и циркония не превышает 500–550°C.

Обсуждение и заключения

Результаты испытаний показывают, что на износостойкость полученных покрытий влияет как шероховатость поверхности, так и состав покрытия. Оксидная керамика показала более высокую термостабильность при температурах до 600°C, по сравнению с вакуумно-дуговым нитридным покрытием системы (Ti-Zr-Y)-N. Износостойкость стали с керамическим покрытием системы (Zr-Y-Gd-Al)-O с добавлением твердой смазки из дисульфида молибдена увеличилась более чем в 10 раз. Эффект увеличения износостойкости путем добавления твердой смазки в матрицу покрытия, а также механизм ее работы подробно описан в работах [5, 6]. Следует также отметить, что на повышение износостойкости покрытий существенно влияет шероховатость их поверхности, поскольку от этого зависит коэффициент трения. Установлено, что независимо от подготовки поверхности износостойкое покрытие системы (Zr-Y-Gd-Al)-O имеет более низкую шероховатость, чем покрытие системы (Zr-Y-Gd-Hf)-O, т. е. с учетом одинакового содержания гадолиния и иттрия в сплаве мишеней на шероховатость поверхности влияют алюминий и гафний (покрытие с алюминием имеет более низкую шероховатость). Установлено, что для защиты деталей трения от износа при рабочих температурах >500°C необходимо использование композиционного покрытия на основе высокотемпературной матрицы (например, на основе керамики) и твердосмазочного компонента для снижения трения. На износостойкость такого покрытия будут влиять состав керамической матрицы и технология формирования внутри нее твердосмазочного компонента. Первые результаты исследований композиционного износостойкого покрытия системы (Zr-Y-Gd-Al)-O+MoS₂ открывают перспективы его использования для защиты высокотемпературных пар трения в современных ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер.: *Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 13–19.
 3. Хрушов М.М., Марченко Е.А., Дубравина А.А., Семенов А.П. Структурные особенности алмазоподобных покрытий с различным механизмом легирования и их трибологические характеристики // *Физика, химия и механика трибосистем*. 2011. №10. С. 147–152.
 4. Кононов Д.М., Жданов А.А., Морозов В.В. Получение и исследование алмазоподобных PVD-покрытий // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012. №6. С. 275–278.
 5. Muratore C., Jones D.R., Voevodin A.A. Smart tribological coating with wear sensing capability // *Wear*. Vol. 265, Issues 5–6, P. 913–920.
 6. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 55. P. 741–748.
 7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 3–8.
 8. Мубояджян С.А., Помелов Я.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2003. Вып.: *Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства*. С. 116–131.
 9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер.: *Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 149–163.
 10. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2006. №1. С. 42–53.
 11. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионно-стойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2010. №5. С. 39–51.
 12. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 3–8.
 13. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С., Журавлева П.Л. Исследование свойств нанослойных эрозионно-стойких покрытий на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2011. №4. С. 91–101.
 14. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Повышение эрозионной и коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД с помощью нанослойного покрытия // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №4. С. 1–7.
 15. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 71–81.
 16. Белоус В.Я., Варламова В.Е., Мубояджян С.А., Александров Д.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты от коррозии компрессорных лопаток и других деталей ГТД, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №1. С. 20–24.
 17. Щепилов А.В., Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Коннова В.И. Исследование влияния ионно-плазменных покрытий на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» при испытаниях на вибродинамическом стенде // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8.
 18. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А. Инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных покрытиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-4-4.
 19. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А., Симонов В.Н., Александров Д.А. Оценка относительной износостойкости ионно-плазменных конденсированных покрытий на сплавах ВТ8 и ЭП742 // *Новости материаловедения*. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 09. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 04.05.2016).