

УДК 669.295

*Д.С. Горлов¹, С.А. Мубояджян¹, А.А. Щепилов¹, Д.А. Александров¹***ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ
НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИЦИИ
«СПЛАВ–ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ»**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-4-4

Показана возможность применения ионной имплантации при ассистированном осаждении ионно-плазменного демпфирующего покрытия в одном технологическом цикле.

Исследовано влияние ионной имплантации аргона на демпфирующую способность композиции титанового сплава VT6 с демпфирующим покрытием и без него для снижения амплитуды колебаний свободного конца образцов при испытаниях на вибродинамическом стенде по первой изгибной форме колебаний.

Исследована шероховатость поверхности образцов титанового сплава VT6 до и после нанесения демпфирующего покрытия.

Проведены металлографические исследования титанового сплава VT6 с демпфирующим покрытием до и после испытаний на демпфирующую способность.

Работа выполнена в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия, комплексная проблема 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионные 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: *ионная имплантация, ассистированное осаждение, ионно-плазменное демпфирующее покрытие, демпфирующая способность, добротность, металлографические исследования.*

The possibility to use ion implantation in assistive ware deposition of ion-plasma damping coatings in one technological cycle is shown.

The influence of ion implantation of argon on the damping ability of the composition of titanium alloy VT6 with damping coating and without it to reduce the oscillation amplitude of the free end of the samples during vibrodynmic bench tests on the first flexural mode is analyzed.

The surface roughness of the samples of titanium alloy VT6 before and after applying the damping covering are studied.

Metallographic researches of titanium alloy VT6 with a damping coating before and after tests on damping ability are carried out.

This work was performed within the framework of strategic directions 17. «Comprehensive anticorrosion protection, hardening, wear-resistant protective and heat-resistant coatings», complex problem 17.3. «Multilayer heat-resistant and heat-resistant coatings, nanostructural hardening erosion and corrosion-resistant, wear-resistant, antifatigue coatings to protect parts of hot section and compressor of GTE and GTU» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *ion implantation, assisted deposition, ion-plasma coating damping, damping capacity, good quality, metallographic researches.*

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

Ионная имплантация, являясь на микроскопическом уровне активным и неравновесным процессом, позволяет получать материалы с составом и структурой которые не достижимы с помощью обычных металлургических способов. Поэтому, помимо применения имплантации в производстве полупроводников, постоянно растет интерес к использованию имплантации как возможного метода получения материалов с новыми интересными физическими свойствами [2].

Среди механических характеристик конструкционных материалов, определяющих пригодность их для изготовления тех или иных элементов конструкций, все большее значение приобретает демпфирующая способность материала – способность поглощать энергию на необратимые процессы при его циклическом деформировании. Особое внимание, уделяемое демпфирующим свойствам материала, связано, прежде всего, с ростом основных параметров (скоростей, температур, давлений) в современных машинах и, как следствие этого, – с необходимостью более точных расчетов динамической прочности элементов конструкций и машин, которые попадают в процессе эксплуатации в резонанс.

Для лопаток турбин, обшивок летательных аппаратов и других подобных деталей и элементов конструкций вибрация является почти постоянным сопутствующим фактором нормальной эксплуатации. Снизить вредное влияние вибрации можно, используя материалы с повышенными демпфирующими свойствами [3].

Предотвращение усталостных поломок лопаток турбомашин, связанных с повышенным уровнем вибраций, представляет важную задачу двигателестроения. Уменьшение уровня переменных вибронпряжений обеспечивает надежную работу двигателя и увеличение его ресурса, однако значительное снижение напряжений может быть несовместимо с требованиями к другим характеристиками двигателя или привести к значительному утяжелению конструкции, поэтому приходится поддерживать переменные напряжения на допустимом уровне. Для достижения указанной цели выполняются различные мероприятия, в частности, частотная отстройка от резонансов и увеличение конструкционного демпфирования в системе. Полностью отстроиться от резонансных режимов в диапазоне рабочих оборотов часто не представляется возможным, поэтому увеличение конструкционного демпфирования лопаток турбомашин представляет актуальную научно-техническую задачу [4].

Достаточно высокие частоты колебаний лопаток ведут к быстрому накоплению критического числа циклов нагружения и поломкам при наличии факторов, способствующих снижению усталостной прочности: коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, дефектов материала, конструкционных концентраторов напряжений, остаточных напряжений в поверхностных слоях после механической обработки и др. [5].

В условиях, где использование демпфирующих элементов затруднительно или не представляется возможным, для снижения переменных напряжений можно использовать специальные демпфирующие покрытия. При этом возникает проблема работоспособности такого покрытия в условиях высоких рабочих температур. Поэтому главной задачей является выбор оптимального сочетания прочностных/пластических свойств покрытия и его стойкости к воздействию высоких температур. Возможно наносить данные покрытия с использованием вакуумно-плазменной технологии высоких энергий при помощи дугового распыления литых трубных катодов с заданным химическим составом, выплавляемых в вакуумных индукционных печах [6–10].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии по изготовлению литых трубных катодов для испарения в ионно-плазменных установках типа МАП с автоматизированной системой управления технологическим процессом, а также технологии нанесения демпфирующих покрытий с заданным химическим составом [11].

Данная статья посвящена исследованию возможности применения ионной имплантации при ассистированном осаждении демпфирующего покрытия, а также последующей обработки поверхности композиции «сплав–покрытие» для снижения амплитуды свободного конца образцов при резонансных испытаниях.

Материалы и методы

Для исследований изготовили модельные образцы из титанового сплава ВТ6 толщиной 1 мм (рис. 1). Поверхностную обработку образцов из титанового сплава ВТ6 осуществляли путем виброгалтовки в круговом вибраторе фирмы Rosler.

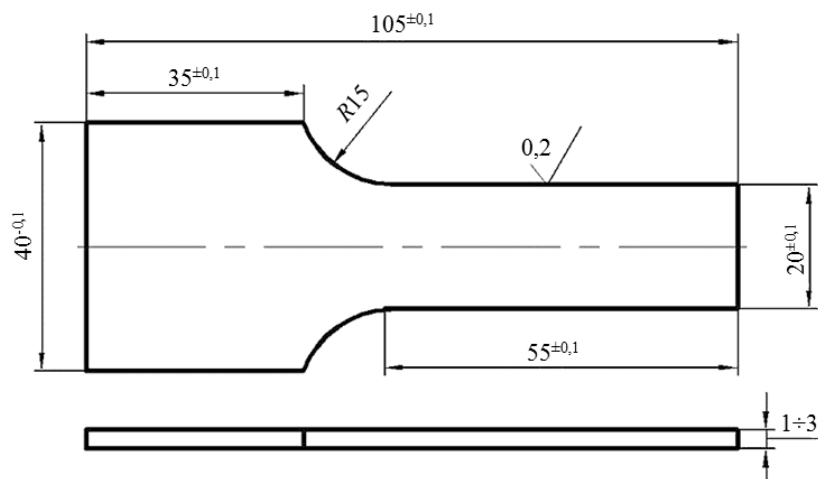


Рис. 1. Образец для испытаний на демпфирующую способность

Исследована шероховатость поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 до и после нанесения демпфирующего покрытия. Измерение шероховатости поверхности проводили согласно ГОСТ 2789–73 на длине 15 мм (чувствительность) с помощью профилометра-профилографа Hommel Tester T500. В качестве параметра для оценки шероховатости использовали параметр R_a .

Ионную имплантацию и ассистированное осаждение демпфирующего покрытия осуществляли на ионно-плазменной установке МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом.

Испытания на демпфирующую способность проводили на вибростенде ETS Solution MPA 403–M124M при температурах 20 и 400°C по СТО 1-595-2-506–2016.

Исследование микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6 с демпфирующими покрытиями в исходном состоянии и после проведения испытаний на демпфирующую способность проводили на металлографическом оптическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения по ГОСТ 10243–75. Перед съемкой изготовленные микрошлифы протравливали в 3%-ном растворе плавиковой кислоты.

Результаты

В данной статье отражены работы по дальнейшему поиску составов и технологий нанесения покрытий для снижения вибронпряжений в ответственных деталях, таких как лопатки компрессора ГТД. В качестве объекта для исследования предложено демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y [12].

Проведение работ по поверхностной обработке образцов из титанового сплава ВТ6 до и после нанесения демпфирующего покрытия

Одним из важных этапов при нанесении ионно-плазменных покрытий является стадия подготовки поверхности образцов основы перед напылением. На данном этапе подготовка поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 состояла из виброгалтовки в круговом вибраторе фирмы Rosler в течение 6 ч [13].

После нанесения демпфирующего покрытия поверхность образцов также подвергали виброгалтовке в течение 1 ч. Результаты измерений шероховатости поверхности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения шероховатости поверхности образцов до и после нанесения демпфирующего покрытия и поверхностной обработки

Состояние поверхности	Значения R_a , мкм, образцов					Среднее значение R_a , мкм
	1	2	3	4	5	
После виброгалтовки перед нанесением демпфирующего покрытия	0,35	0,47	0,56	0,53	0,57	0,49
После нанесения демпфирующего покрытия системы Al-Ni-Y (~60 мкм)	2,43	2,45	2,37	2,36	2,42	2,41
После виброгалтовки нанесенного демпфирующего покрытия	1,34	1,36	1,33	1,27	1,32	1,32

Установлено, что величина микронеровностей поверхности образца титанового сплава ВТ6 после виброгалтовки в течение 6 ч перед нанесением демпфирующего покрытия составляет в среднем $R_a=0,49$ мкм. Величина микронеровностей поверхности нанесенного демпфирующего покрытия составляет в среднем $R_a=2,41$ мкм для образца. Последующая поверхностная обработка в круговом вибраторе в течение 1 ч приводит к снижению параметра шероховатости демпфирующего покрытия системы Al-Ni-Y на образце R_a – с 2,41 до 1,32 мкм.

Ионная имплантация и ассистированное осаждение демпфирующего покрытия на образцы из титанового сплава ВТ6

Ионную имплантацию и ассистированное осаждение демпфирующего покрытия на образцы из титанового сплава ВТ6 проводили на ионно-плазменной установке МАП-3. Внешний вид установки приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид автоматизированной установки МАП-3

Установка МАП-3 снабжена имплантором (ускорителем) газовых ионов с плотностью тока ионов на уровне 200 мкА/см^2 и с ускоряющим напряжением 30–40 кВ, обеспечивающим на обрабатываемой поверхности плотность мощности до 8 Вт/см^2 и соответствующий этой удельной мощности нагрев поверхности образца в вакууме [12].

Контроль параметров технологического процесса нанесения покрытий осуществляли с помощью компьютерной программы с их последующим протоколированием. Самым главным критерием при осаждении демпфирующих покрытий была температура на образцах-свидетелях из титанового сплава ВТ6, которая не превышала 400°C , чтобы исключить разупрочнение материала основы – сплава ВТ6 [14, 15].

Для предотвращения диффузии элементов из покрытия в титановый сплав использовали ионную имплантацию азотом перед нанесением покрытия. Непосредственное нанесение покрытия проводили при ассистированном осаждении алюминиевого сплава системы Al–Ni–Y с периодической бомбардировкой поверхности конденсата ионами аргона. Режимы ассистированного осаждения подбирали таким образом, чтобы не разупрочнить титановый сплав ВТ6. После выглаживающей поверхностной обработки образцы из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием и без него подвергали ионной имплантации аргоном в течение 30 мин [16].

*Проведение испытаний на демпфирующую способность покрытий
на образцах-свидетелях из титанового сплава ВТ6 и без них
на вибростенде ETS Solution MPA 403–M124M*

Определение демпфирующих характеристик материала в методическом отношении представляет задачу значительно более сложную, чем экспериментальное определение любой другой механической характеристики материала, поскольку определение рассеяния энергии в материале при циклическом деформировании в пределах упругости требует тонких методов эксперимента, граничащих с физическими. При циклическом деформировании реального твердого тела наблюдается несовпадение зависимостей между напряжением a и деформацией B при нагрузке и разгрузке, что свидетельствует о неупругом характере деформирования реальных материалов. Это явление получило название – механический гистерезис или внутреннее трение. Материал тела необратимо поглощает часть работы внешних сил, которая переходит в тепловую энергию, а затем рассеивается.

На практике свойство материала рассеивать энергию при его циклическом деформировании обычно оценивается с точки зрения его способности гасить (демпфировать) колебания упругой системы [17].

Демпфирующую способность при виброиспытаниях по первой изгибной форме определяли согласно СТО 1-595-2-506–2016 по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжениям 70 МПа в опасном сечении образцов (по методу А – сравнительное испытание образцов титанового сплава ВТ6 методом оценки эффективности работы покрытия до и после нанесения). Проведены также испытания другим способом: метод Б – сравнительное испытание на исследование демпфирующей способности материала до и после технологической операции – путем определения добротности колебательной системы.

Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403–M124M с закрепленным образцом в оснастке представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403–M124M с закрепленным образцом в оснастке

Расчетным методом перед испытаниями на демпфирующую способность определяли необходимую амплитуду колебаний свободного конца образца, эквивалентную напряжению в опасном сечении, равному 70 МПа. Причем испытания при повышенной температуре проводили при возбуждающей силе и параметрах вибростенда, зафиксированных при испытаниях образца до нанесения демпфирующего покрытия.

Результаты испытаний на демпфирующую способность по методу А при температурах 20 и 400°C представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Эффективность работы покрытий и ионной имплантации (ИИ) по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца при температуре 20°C

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда колебаний свободного конца образца, мм	Эффективность, %
1	Без покрытия	180,1	4,37	–
	После ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	181,6	4	8,4
2	С покрытием в исходном состоянии	191,3	3,46	20,6
	С покрытием после ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	193,2	3,33	23,4

Таблица 3

Эффективность работы покрытий и ионной имплантации (ИИ) по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца при температуре 400°C

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда колебаний свободного конца образца, мм	Эффективность, %
1	Без покрытия	167,9	3,63	–
	После ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	171	3,63	0
2	С покрытием в исходном состоянии	181	1,67	53
	С покрытием после ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	182,2	1,78	50

Результаты испытаний на демпфирующую способность по методу Б (путем определения добротности колебательной системы) при температурах 20 и 400°C представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Зависимость добротности колебательной системы
от покрытия и ионной имплантации (ИИ) при температуре 20°C**

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда колебаний свободного конца образца, мм	Добротность Q
1	Без покрытия	180,1	4,37	617,0
	После ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	181,5	4,34	554,7
2	С покрытием в исходном состоянии	191,2	4,34	461,4
	С покрытием после ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	193,1	4,34	411,7

Таблица 5

**Зависимость добротности колебательной системы
от покрытия и ионной имплантации (ИИ) при температуре 400°C**

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда колебаний свободного конца образца, мм	Добротность Q
1	Без покрытия	167,9	3,44	453,4
	После ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	171	3,63	641,8
2	С покрытием в исходном состоянии	180,9	3,6	183,0
	С покрытием после ИИ (при 30 кВ/30 мА) в течение 30 мин	181,8	3,56	224,5

Из приведенных данных следует, что с повышением температуры демпфирующая способность титанового сплава ВТ6 повышается. После нанесения демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y амплитуда колебаний свободного конца образца при одинаковой возбуждающей силе снижается. Эффективность работы демпфирующего покрытия на образце из титанового сплава ВТ6 составляет при температуре 20°C в среднем – не менее 20%, а при температуре 400°C – не менее 50%. Ионная имплантация аргоном повышает демпфирующую способность образца из титанового сплава ВТ6 на 8% при испытаниях и на 3% – для композиции «сплав–покрытие» при температуре 20°C.

При повышении температуры замечено снижение демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие, обработанное ионами аргона» – на те же 3%.

*Металлографические исследования образцов из титанового сплава ВТ6
с демпфирующим покрытием*

С целью определения толщины и структуры полученных покрытий проведены металлографические исследования на металлографическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения. Микроструктуры образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием после нанесения в исходном состоянии и после проведения испытаний на демпфирующую способность представлены на рис. 4.

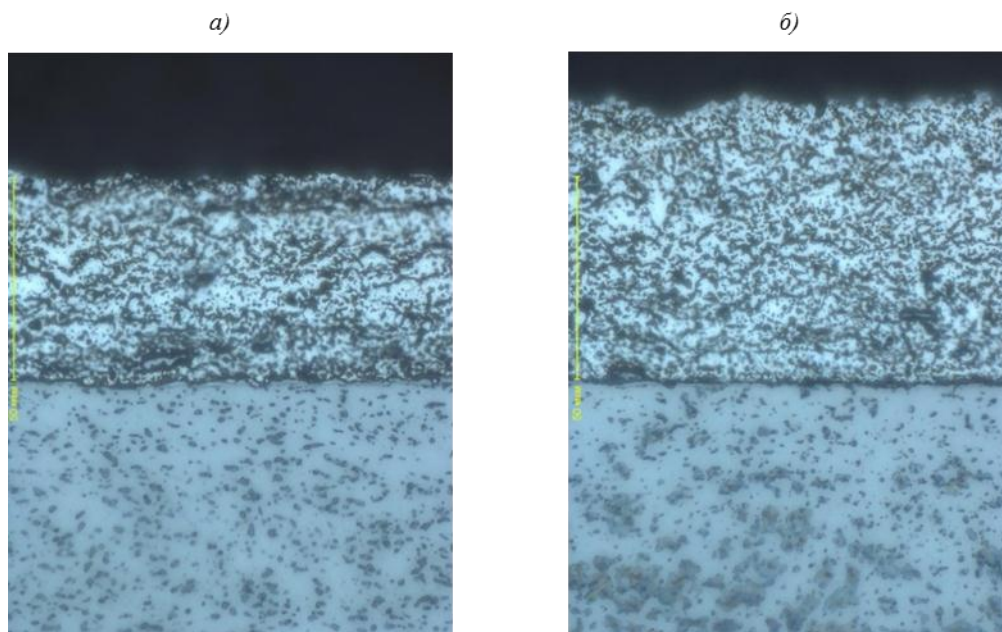


Рис. 4. Микроструктуры образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием из сплава системы Al–Ni–Y после нанесения в исходном состоянии (*а* – $\times 500$) и после проведения испытаний на демпфирующую способность – шлиф взят из места максимальных напряжений (*б* – $\times 1000$)

Установлено, что толщина нанесенного демпфирующего покрытия из сплава системы Al–Ni–Y составила в среднем 60 мкм. Показано, что на микроструктурах образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием после испытаний отсутствует когезионное и адгезионное расслаивание, видно наличие капельной фазы.

Обсуждение и заключения

Показана возможность применения ионной имплантации при ассистированном осаждении ионно-плазменного демпфирующего покрытия в одном технологическом цикле.

Исследована шероховатость поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 до и после нанесения демпфирующего покрытия.

Установлено, что величина микронеровностей поверхности образца из титанового сплава ВТ6 после виброгалтовки течение 6 ч перед нанесением демпфирующего покрытия составляет в среднем $R_a=0,49$ мкм. Величина микронеровностей поверхности нанесенного демпфирующего покрытия составляет в среднем $R_a=2,41$ мкм для образца. Последующая поверхностная обработка в круговом вибраторе в течение 1 ч приводит к снижению параметра шероховатости демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y на образце R_a – с 2,41 до 1,32 мкм.

Исследовано влияние ионной имплантации аргона на демпфирующую способность композиции из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием и без него для снижения амплитуды колебаний свободного конца образцов при испытаниях на вибродинамическом стенде по первой изгибной форме колебаний.

Из приведенных данных следует, что с повышением температуры демпфирующая способность титанового сплава ВТ6 повышается. После нанесения демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y амплитуда колебаний свободного конца образца при одинаковой возбуждающей силе снижается. Эффективность работы демпфирующего покрытия на образце из титанового сплава ВТ6 составляет при температуре 20°C в среднем – не менее 20%, а при температуре 400°C – не менее 50%. Ионная имплантация аргоном повышает демпфирующую способность образца из титанового сплава ВТ6 на 8% при испытаниях и на 3% – для композиции «сплав–покрытие» при температуре 20°C.

При повышении температуры замечено снижение демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие, обработанное ионами аргона» – на те же 3%.

Проведены металлографические исследования титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием до и после испытаний на демпфирующую способность.

Установлено, что толщина нанесенного демпфирующего покрытия из сплава системы Al–Ni–Y составила в среднем 60 мкм. Показано, что на микроструктурах образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием после испытаний отсутствует когезионное и адгезионное расслаивание, видно наличие микрокапельной фазы.

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. Хирвонен Дж.К. Ионная имплантация. М.: Металлургия, 1985. 19 с.
3. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н. Расчетно-экспериментальный анализ амплитудно-зависимых характеристик демпфирования в деталях и материалах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. №3. 2011. С. 91–99.
4. Муравченко Ф.М., Шереметьев А.В. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности современных авиадвигателей // *Вибрации в технике и технологиях*. 2001. №4 (20). С. 2–5.
5. Устинов А.И., Мовчан Б.А., Скородзиевский В.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава Ti–6%Al–4%V с покрытиями из олова и иттрия // *Проблемы прочности*. 2001. №4. С. 55–61.
6. 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.
7. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.07.
8. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.07.
9. 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.
10. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 19–36.
11. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.06.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 3–10.
13. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов с целью обеспечения адгезионных свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 25–35.
14. 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.
15. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №2. С. 8–14.
16. 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.
17. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов // *Проблемы прочности*. 2008. №5. С. 96–104.