

УДК 629.7.023.224

Д.С. Горлов¹, С.А. Мубояджян¹, А.А. Щетилов¹, Д.А. Александров¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ДЕМПИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17

Исследована демпфирующая способность, эрозионная стойкость, а также теплостойкость образцов из титанового сплава VT6 с ионно-плазменными покрытиями.

Показано, что для оценки эффективности демпфирующей способности ионно-плазменного покрытия можно пользоваться критерием добротности колебательной системы, а также величиной амплитуды колебаний свободного конца образцов с покрытиями. Построены зависимости амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава VT6 от напряжения в опасном сечении. Исследованы эрозионная стойкость образцов из титанового сплава VT6 с ионно-плазменными покрытиями и без них после воздействия абразивного потока с частицами SiO₂ фракцией до 700 мкм при углах атаки пылевоздушного потока 70 (прямой удар) и 20 град (касательное обтекание), а также теплостойкость на базе 200 ч при температуре 400°C.

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: вакуумно-плазменная технология высоких энергий, ионно-плазменное демпфирующее покрытие, добротность, эрозионная стойкость, теплостойкость.

The damping capacity, erosion resistance and also the heat resistance of the samples of titanium alloy VT6 with ion-plasma coatings was researched. It is shown that to assess the effectiveness of the damping capacity of the ion-plasma coating, it is possible to use the criterion of merit of the oscillating system, as well as the oscillating amplitude the free end of the coated samples. The dependences of the oscillating amplitude of the free end of titanium alloy VT6 of stress in the dangerous section. Erosion resistance of VT6 titanium alloy samples with ion-plasma coatings and without the exposure to abrasive flow with SiO₂ particles with a grain size of up to 700 mkm at angles of attack dusty stream 70 (direct impact) and 20 degrees (tangential flow), as well as heat resistance on the basis of 200 hours at a temperature of 400°C is investigated.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 17.3. «Multi layer heat resisting and heat-protective coatings, nanostructural strengthening erosive and corrosion resistant, anti wear, antifrettingovy coatings for protection of details of hot path and the GTE and GTU compressor» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: vacuum-plasma technology of high-energy, ion-plasma damping coating, quality factor, erosion resistance, heat resistance.

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

Работа газотурбинного двигателя (ГТД) сопровождается вибрацией, неизбежной для машин с быстровращающимися роторами. Повышенная вибрация может привести к выводу из строя двигателя вследствие поломки лопаток, валов, опор, элементов подвески, агрегатов, трубопроводов и т. д. Вибрация двигателя опасна также с точки зрения прочности летательного аппарата. Часто повышенная вибрация становится причиной отбраковки двигателей при испыта-

ниях и досрочного снятия их с эксплуатации [2].

Предотвращение усталостных поломок лопаток турбомашин, связанных с повышенным уровнем вибраций, является важной задачей для двигателестроения [3]. 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

необходимо поддерживать переменные напряжения на допустимом уровне. Для достижения указанной цели выполняются различные мероприятия, например, частотная отстройка от резонансов и увеличение конструкционного демпфирования системы [4]. Полностью отстроиться от резонансных режимов в диапазоне рабочих оборотов часто не представляется возможным, поэтому увеличение конструкционного демпфирования лопаток турбомашин является актуальной научно-технической задачей [5].

В условиях, где использование демпфирующих элементов затруднительно или не представляется возможным, для снижения переменных напряжений можно использовать специальные демпфирующие покрытия [6, 7]. В качестве демпфирующих рассматриваются покрытия, которые можно наносить с помощью вакуумно-плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ), широко используемой на предприятиях авиационного двигателестроения для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на детали и лопатки авиационных ГТД. Специалисты ВИАМ обладают большим опытом по разработке различных ионно-плазменных покрытий и перспективных технологий их нанесения и обработки поверхности [8, 9]. Покрытия по этой технологии (ВПТВЭ) наносят на промышленных ионно-плазменных установках типа МАП-1М, МАП-2 и МАП-3 [10]. В установках используется вакуумно-дуговой способ генерации плазмы материала трубного катода с формированием радиального плазменного потока. Покрытие осаждают из плазменного потока материала покрытия при высоких и управляемых энергиях частиц. Трубные катоды с заданным химическим составом выплавляются в вакуумно-индукционных печах с заливкой расплава в специальную графитовую форму [1, 11–15].

Одной из основных тенденций современного авиационного двигателестроения является повышение функциональности защитных покрытий для ответственных деталей ГТД. Актуальной является задача обеспечения защиты от пылевой эрозии или газоабразивного износа лопаток компрессора ГТД, происходящего преимущественно на земле или вблизи нее и вызванного в основном воздействием сферических (окатанных) частиц кварцевого песка размером до 100 мкм [16]. Немаловажной задачей при разработке ионно-плазменного покрытия, работающего в условиях горячего тракта ГТД, является его теплостойкость или жаростойкость в зависимости от ступени лопатки компрессора или турбины. Покрытие должно иметь термостабильный состав, работающий длительное время при заданной температуре [17, 18]. Следовательно, демпфирующее покрытие должно обеспечивать эрозионную стойкость защищаемой основы (особенно во время взлета и

посадки, когда режим работы двигателя является наиболее критическим) и теплостойкость при заданной температуре эксплуатации.

Данная работа посвящена исследованию эффективности ионно-плазменных покрытий на основе системы Al–Cu–Fe, дополнительно легированной иттрием и гадолинием, по снижению амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 при испытаниях на вибродинамическом стенде в условиях резонанса по первой изгибной форме, а также определению эрозионной стойкости и теплостойкости представленных композиций.

Материалы и методы

С целью исследования демпфирующей способности покрытий изготовлены плоские модельные образцы с размером рабочей зоны 40×180 мм, толщиной 2 мм для исследования эрозионной стойкости и теплостойкости – образцы (диски) диаметром 25 мм, толщиной 3 мм из титанового сплава ВТ6. Для подготовки поверхности образцов использовали круговой и лотковый вибраторы фирмы Rosler, а также пескоструйную камеру эжекторного типа. Данные типы поверхностной обработки применяли для придания поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 разных морфологических особенностей и с целью создания в поверхностном слое сжимающих напряжений [19]. Нанесение демпфирующих покрытий осуществлялось на ионно-плазменной установке МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом согласно ПИ1.2.620–2002. Испытания на демпфирующую способность проводили на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M при температуре 20°C согласно ASTM E 756–05. Испытания на теплостойкость проводили согласно ГОСТ 6130–71 при температуре 400°C на базе 200 ч в атмосферной муфельной печи LE 14/11 фирмы Neberherm. Контроль массы образцов проводили гравиметрическим методом на аналитических весах типа Sartorius 200S, с диапазоном измерения от 0,0001 до 200 г. Исследование эрозионной стойкости проводили согласно ММ1.595-2-352–2008 на испытательном стенде лаборатории. Для испытаний использовали кварцевый песок Люберецкого карьера средней фракции 300 мкм. Испытания проводились при углах атаки пылевоздушного потока 70 и 20 град по 3 цикла: продолжительность цикла составляла 2 мин, давление воздуха 3 ат, средняя скорость частиц ~50 м/с. Исследования микроструктуры шлифов проводили на металлографическом оптическом микроскопе Olympus GX 51 с цифровой системой обработки изображения.

Для исследований демпфирующей способности, а также эрозионной стойкости и теплостойкости на образцы из титанового сплава ВТ6 были нанесены покрытия следующих составов:

Al–Cu–Fe (состав 1); Al–Cu–Fe–Gd (состав 2); Al–Cu–Fe–Y (состав 3).

Перед нанесением покрытий проведена обработка поверхности образцов электрокорундом с размером зерна 120–150 мкм при давлении 3 ат до образования однотонной матовой поверхности. Параметры осаждения покрытий: сила тока вакуумной дуги 350 А, продолжительность осаждения 270 мин, напряжение смещения 10–15 В [15].

Результаты

Известно, что демпфирующие покрытия на основе сплавов системы Al–Cu–Fe должны иметь толщину не менее 50 мкм. С целью определения толщины и структуры полученных покрытий проведены металлографические исследования.

Микроструктура образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующими покрытиями в исходном состоянии (после химического травления в 3%-ном растворе плавиковой кислоты) представлены на рис. 1.

Фактические толщины нанесенных ионно-плазменных покрытий:

- для покрытия на основе сплава системы Al–Cu–Fe (состав 1) толщина составила 51,2 мкм;
- для покрытия на основе сплава системы Al–Cu–Fe–Y (состав 2) толщина составила 70 мкм;
- для покрытия на основе сплава системы Al–Cu–Fe–Gd (состав 3) толщина составила 80 мкм.

Стабильные условия испытаний на стенде ETS Solution MPA 403-M124M обеспечивались затяжкой прижимного винта оснастки с крутящим моментом 200 Н·м. Управляющий акселерометр Dyrtran 3225F2 закреплялся на фланец основания оснастки (в месте крепления к вибростолу). Регистрация колебаний образцов проводилась с помощью оптического датчика Riftek RF603. Возбуждение колебаний образцов проводилось с помощью модуля Resonance Search по программе Vibration View для контроллера Vibration Research 8500.

Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным образцом в оснастке представлен на рис. 2.

Следует отметить, что на основании проведенных экспериментов по определению демпфирующей способности и эффективности работы ионно-плазменных покрытий по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца (соответственно, напряжений в опасном сечении образца) при испытаниях на вибродинамическом стенде по первой изгибной форме существует корреляционная зависимость, при которой покрытие с высокой демпфирующей способностью эффективнее других снижает амплитуду колебаний свободного конца плоского консольного образца.

Проведение испытаний по определению демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий включало следующие действия:

- в настройках управляющей программы контроллера Vibration Research 8500 выбран профиль испытаний Resonance Search;
 - испытания проводились при одинаковых амплитудах колебаний вибростола, эквивалентных трем уровням напряжений (30, 50 и 70 МПа) в опасном сечении образца без покрытия. Образец жестко зажимался одним концом в специальной оснастке;
 - при испытаниях регистрировались колебания конца образцов с помощью оптического датчика. В результате испытаний получены амплитудно-частотные зависимости на резонансных частотах. В отчете управляющей программы после проведения испытания указываются также значения добротности колебательной системы, которые позволяют определить материал с высокими демпфирующими характеристиками без расчетов декремента затухания колебаний.
- Отличительной особенностью проведения данных испытаний являлось то, что на начальном

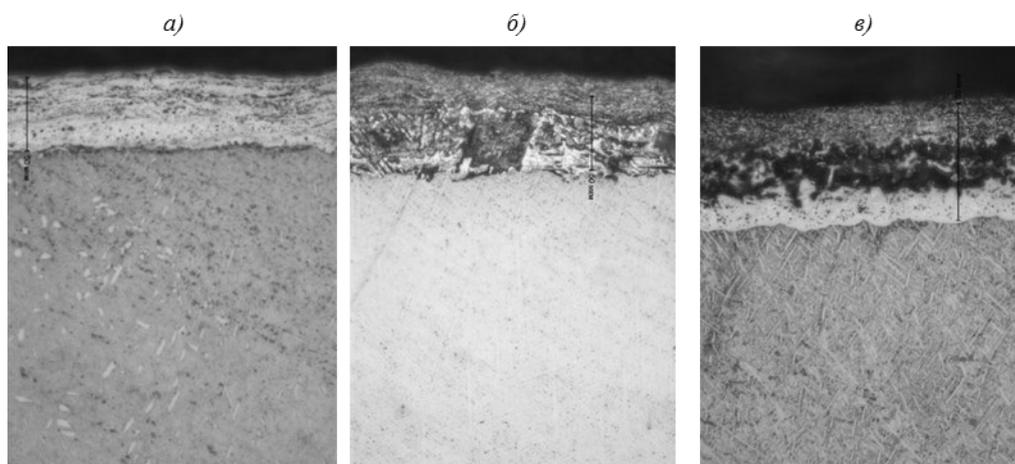


Рис. 1. Микроструктура ($\times 500$) образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями (в исходном состоянии):
а – Al–Cu–Fe (состав 1); б – Al–Cu–Fe–Y (состав 2); в – Al–Cu–Fe–Gd (состав 3)

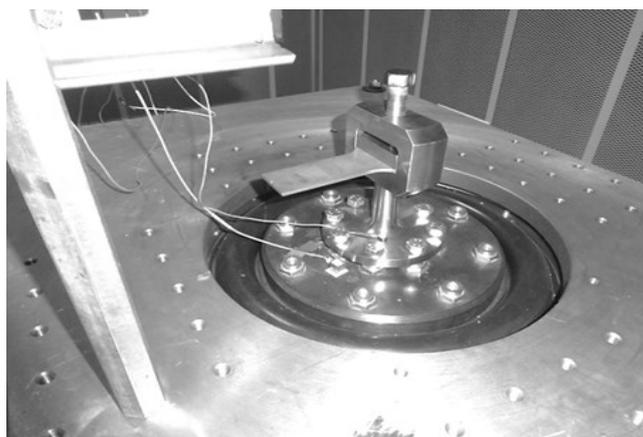


Рис. 2. Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным в оснастке образцом

Таблица 1

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них при напряжении в опасном сечении образца без покрытия 30 МПа

Покрытие	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон амплитудно-частотных характеристик, Гц	Q-фактор (добротность)
Без покрытия	1,39	240,6	239,6–241,6	593
Al–Cu–Fe	1,22	247,49	246,5–248,5	626,7
Al–Cu–Fe–Gd	0,88	243,4	242,4–244,4	449,4
Al–Cu–Fe–Y	1	248,1	247,2–249,2	649,5

Таблица 2

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них при напряжении в опасном сечении образца без покрытия 50 МПа

Покрытие	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон амплитудно-частотных характеристик, Гц	Q-фактор (добротность)
Без покрытия	2,35	240,5	239,6–241,6	539,4
Al–Cu–Fe	2,07	247,2	246,3–248,3	525
Al–Cu–Fe–Gd	1,55	243,06	242,1–244,1	452,7
Al–Cu–Fe–Y	1,79	247,69	246,8–248,8	500,7

Таблица 3

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них при напряжении в опасном сечении образца без покрытия 70 МПа

Покрытие	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон амплитудно-частотных характеристик, Гц	Q-фактор (добротность)
Без покрытия	3,22	240,5	239,6–241,6	507,8
Al–Cu–Fe	2,75	247	246,1–248,1	476,2
Al–Cu–Fe–Gd	2,05	242,89	242,1–244,1	473
Al–Cu–Fe–Y	2,26	247,52	246,6–248,6	499,3

Рис. 3. Зависимость амплитуды свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 от напряжения в опасном сечении: ◆ – без покрытия; ■ – Al-Cu-Fe; ▲ – Al-Cu-Fe-Gd; ● – Al-Cu-Fe-Y

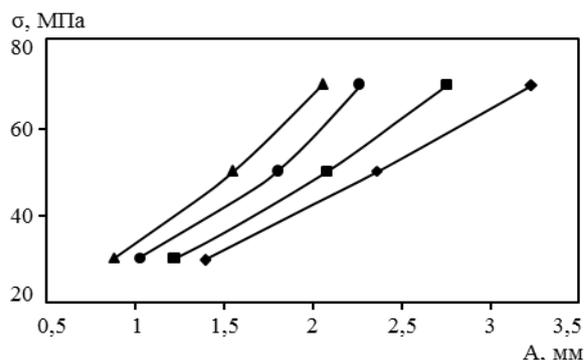


Таблица 4

Результаты удельного изменения массы образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них

Покрытие	Удельное изменение массы, г/м ² , при 400°С в течение, ч				
	5	25	50	150	200
Без покрытия	0,484	0,277	0,138	0,277	0,069
Al-Cu-Fe	0,339	0,204	0,204	0,068	0,068
Al-Cu-Fe-Gd	0,275	0,413	0,206	0,413	0,275
Al-Cu-Fe-Y	0,268	0,000	-0,067	0,000	0,066

Таблица 5

Относительный эрозионный износ титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них

Покрытие	Эрозионный износ/эрозионная стойкость, отн. ед., при угле атаки, град	
	70	20
Без покрытия	1	1
Al-Cu-Fe	1,57/0,6 (прошел 3 цикла)	2,9/0,3 (прошел 3 цикла)
Al-Cu-Fe-Gd	8,8/0,1 (сдвиг на 2 цикле)	3,61/0,3 (сдвиг на 2 цикле)
Al-Cu-Fe-Y	2,42/0,4 (сдвиг на 3 цикле)	0,23/4,3 (прошел 3 цикла)

Таблица 6

Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них после испытаний на эрозионную стойкость

Покрытие	Эрозионный поток под углом 70 град			Эрозионный поток под углом 20 град		
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	1 цикл	2 цикл	3 цикл
Без покрытия						
Al-Cu-Fe						
Al-Cu-Fe-Gd						
Al-Cu-Fe-Y						

этапе работы к образцу без покрытия подводилась энергия колебательной системы, эквивалентная трем уровням напряжений (30, 50 и 70 МПа) в опасном сечении. Затем характеристики проведенных экспериментов записывались и в дальнейшем на образцах с покрытиями воспроизводились аналогичные параметры испытаний, соответствующие данным образца без покрытия.

Данные по демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий на образцах из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них при 20°C для трех уровней напряжений при одинаковых амплитудах вибростолы представлены в табл. 1–3.

Зависимость амплитуды свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 от напряжения в опасном сечении представлена на рис. 3.

С целью комплексного исследования свойств вариантов ионно-плазменных покрытий проведены испытания на теплостойкость и эрозионную стойкость. Результаты испытаний на теплостойкость при температуре 400°C приведены в табл. 4.

Испытания на стойкость к абразивному износу проводили на лабораторной установке для испытания композиции образцов на относительную эрозионную стойкость (табл. 5).

Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них после проведения испытаний на эрозионную стойкость представлен в табл. 6.

Обсуждение и заключения

Исходя из данных, полученных после испытаний на вибродинамическом стенде по первой изгибной форме колебаний, установлено, что дополнительное легирование системы Al–Cu–Fe редкоземельными металлами увеличивает демпфирующую способность покрытия. Эффект может быть связан с влиянием РЗМ на диссипативные свойства покрытия [20, 21]. Наиболее высокие показатели по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца показали покрытие системы Al–Cu–Fe–Gd, имеющее также самую низкую добротность по сравнению с образцами из титанового сплава ВТ6 с покрытиями систем Al–Cu–Fe и Al–Cu–Fe–Y.

После проведения испытания на теплостойкость установлено, что наиболее высокую теплостойкость показал образец из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Cu–Fe–Y, наименьшую – системы Al–Cu–Fe–Gd.

При исследовании стойкости ионно-плазменных покрытий к абразивному изнашиванию выявлено, что образец из титанового сплава ВТ6 с покрытием Al–Cu–Fe обладает более высокой эрозионной стойкостью при угле атаки 70 град относительно образцов с другими вариантами покрытий, а образец с покрытием Al–Cu–Fe–Y имеет наиболее высокую эрозионную стойкость при касательном обтекании пылевоздушного потока (20 град) по сравнению со всеми испытанными образцами. Образец с покрытием системы Al–Cu–Fe–Gd показал самую низкую стойкость к абразивному изнашиванию.

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.
2. Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н. Расчетно-экспериментальный анализ амплитудно-зависимых характеристик демпфирования в деталях и материалах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. №3. С. 91–99.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Конверсия в машиностроении*. 1999. №2. С. 42–47.
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. Sordelet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin go fpolycrystalline and crystalline Al–Cu–Fe alloys // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1999. V. 553. P. 459–470.
7. Paton B.E., Movchan B.A. Composite Materials Deposited from the Vapour Phase in Vacuum Soviet Technologies Review // *Weld and Surfacing*. 1991. V. 2. P. 43–64.
8. 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. №5. С. 71–81.
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. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys // *Metal Science and Heat Treatment*. 1995. №2. P. 15–18.
11. Мубояджян С.А., Помелов Я.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД / В сб.: *Авиаци-*

- онные материалы и технологии. М.: ВИАМ, 2003. Вып.: Высокожаропрочные материалы для современных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства. С. 116–131.
12. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.07.
 13. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.07.
 14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 13–19.
 15. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.06.
 16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Коннова В.И. Методика испытаний на относительную эрозионную стойкость твердых покрытий ответственных деталей компрессора ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №4. С. 7–18.
 17. 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. 43–49.
 18. 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.
 19. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов с целью обеспечения адгезионных свойств // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 25–35.
 20. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2015).
 21. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов // Проблемы прочности. 2008. №5. С. 96–104.