



УДК 629.7.023:620.165.79

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-8-8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ
КОМПОЗИЦИИ «СПЛАВ–ПОКРЫТИЕ» ПРИ
ИСПЫТАНИЯХ НА ВИБРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ**

А.В. Щетилов

С.А. Мубояджян

доктор технических наук

Д.С. Горлов

В.И. Коннова

Апрель 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

А.В. Щепилов¹, С.А. Мубояджян¹, Д.С. Горлов¹, В.И. Коннова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИЦИИ «СПЛАВ–ПОКРЫТИЕ» ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ВИБРОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

Показана возможность применения ионно-плазменных покрытий, нанесенных по вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, для снижения амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 при испытаниях на вибродинамическом стенде в условиях резонанса по первой изгибной форме.

Исследованы покрытия на основе чистых металлов (Ti, Zr, Cr, Ni, Al и Cu), нанесенные на установке МАП-3 по режимам, при которых обеспечивается привес покрытия в диапазоне 19–73 г/м², а температура ионного и радиационного нагрева не превышает температуру отпуска титанового сплава ВТ6. Проведены испытания на демпфирующую способность нанесенных покрытий. Установлено, что наилучшими свойствами обладает покрытие из алюминия.

Ключевые слова: *вакуумно-плазменная технология высоких энергий, ионно-плазменное демпфирующее покрытие, добротность, декремент затухания колебаний.*

A.V. Schepilov, S.A. Muboyadzhyan, D.S. Gorlov, V.I. Konnova

INVESTIGATION OF THE ION-PLASMA COATINGS INFLUENCE ON DAMPING CAPACITY OF «ALLOY-COATING» COMPOSITION DURING TESTING ON VIBRODYNAMIC BENCH

The possibility of using ion-plasma coatings deposited by high energy vacuum-plasma technology to reduce the free end oscillations amplitude of VT6 titanium alloy samples during testing on vibrodynamic bench at resonance conditions by the first bending mode is hereby shown.

The coatings based on pure Ti, Zr, Cr, Ni, Al, Cu metals deposited on the MAP-3 unit under modes enabling the coating growth in the range of 19–73 g/m² while the temperature of ion and radiation heating does not exceed tempering temperature of the VT6 titanium alloy is investigated. The tests on the damping capacity of applied coatings were performed. It is established that aluminum coating has the best properties.

Keywords: *vacuum and plasma technology of high energy, the ion-plasma damping coating, good quality, decrement of fluctuations attenuation.*

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 быстро вращающимися роторами. Повышенная вибрация может привести к выходу 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. Повышенный уровень вибраций часто становится причиной отбраковки двигателей при испытаниях и досрочного прекращения их эксплуатации [1].

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 необходимо 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. Провести полную отстройку от резонансных режимов в диапазоне рабочих оборотов часто не представляется возможным, поэтому увеличение конструкционного демпфирования лопаток турбомашин является актуальной научно-технической задачей [2].

В условиях, где использование демпфирующих элементов затруднительно или не представляется возможным, для снижения переменных напряжений можно использовать специальные демпфирующие покрытия [3, 4]. В качестве демпфирующих рассматриваются покрытия, которые можно наносить вакуумно-плазменной технологией высоких энергий (ВПТВЭ), широко используемой на предприятиях авиационного двигателестроения для нанесения защитных и упрочняющих покрытий на детали и лопатки авиационных ГТД. Покрытия по этой технологии наносят на промышленных ионно-плазменных установках типа МАП-1, МАП-2 и МАП-3. В этих 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 заданного химического состава выплавляют в вакуумно-индукционных печах с заливкой расплава в специальную графитовую форму [5–10].

Статья посвящена исследованию эффективности работы ионно-плазменных покрытий на основе чистых металлов по снижению амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 при испытаниях на вибродинамическом стенде в условиях резонанса по первой изгибной форме.

Материалы и методы

Для исследований изготовлены модельные образцы из титанового сплава ВТ6 толщиной 3 мм [11]. Для подготовки поверхности образцов использовали круговой вибратор фирмы Rosler. Этот тип обработки применяли для придания поверхности образцов титанового сплава ВТ6 заданной шероховатости, а также с целью создания в поверхностном слое сжимающих напряжений [12]. Нанесение покрытий осуществлялось на ионно-плазменной установке МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом согласно ПИ 1.2.620–2002. Оценка эффективности работы ионно-плазменных покрытий проводили на вибродинамическом стенде ETS Solution MPA 403-M124M в условиях резонанса по первой изгибной форме при температуре 20°C согласно ASTM E 756–05.

Результаты

Одним из важных этапов перед нанесением ионно-плазменных покрытий является подготовка поверхности образцов. В качестве предварительной обработки поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 была выбрана виброгалтовка (ВГ) на круговом вибраторе фирмы Rosler в течение 6 ч при амплитуде колебаний 5 мм с последующей промывкой в щелочном растворе и сушкой сжатым воздухом [13].

Проведение испытаний по определению демпфирующих характеристик покрытий на образцах из титанового сплава ВТ6

Для определения демпфирующих характеристик исследовали плоские образцы из титанового сплава ВТ6 толщиной 3 мм без покрытий и с ионно-плазменными покрытиями, осажденными по режиму: ток вакуумной дуги 500 А, напряжение смещения 10–15 В. Продолжительность осаждения рассчитывалась в зависимости от скорости испарения конкретного материала таким образом, чтобы обеспечить привес по массе покрытия в среднем 60 г/м². При выбранных режимах осаждения температура ионного и радиационного нагрева титановых образцов не превышала 400°C, что предохраняло

сплав ВТ6 от разупрочнения [14]. Характеристики покрытий на титановом сплаве ВТ6 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики покрытий на образцах из титанового сплава ВТ6

Покрытие	Расчетная толщина, мкм	Удельное изменение массы образца, г/м ²
Ti	16,2	73
Zr	9	63
Cr	7,7	54
Ni	7	62,3
Al	15,7	44
Cu	2	19

Ионно-плазменные покрытия на основе чистых металлов, осажденные по режимам, обеспечивающим привес по массе 60 г/м², необходимы для изучения зависимости влияния материала ионно-плазменного покрытия на демпфирующую способность. Толщина покрытий была неодинаковой из-за разницы в параметрах осаждения, зависящих от физических свойств, в частности – от плотности материала распыляемого катода. При осаждении покрытий главным контролируемым параметром была рабочая температура (400°С) на образцах титанового сплава ВТ6 [15–20].

Стабильные условия испытаний на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M обеспечивались затяжкой прижимного винта оснастки с крутящим моментом 200 Н·м. Управляющий акселерометр Dytran 3225F2 закреплялся на фланец основания оснастки (в месте крепления к вибростолу). Регистрацию колебаний образцов производили с помощью оптического датчика Riftek RF603. Возбуждение колебаний образцов производилось с помощью модуля Resonance Search программы Vibration View контроллера Vibration Research 8500 [21–24].

Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным в оснастке образцом представлен на рис. 1.

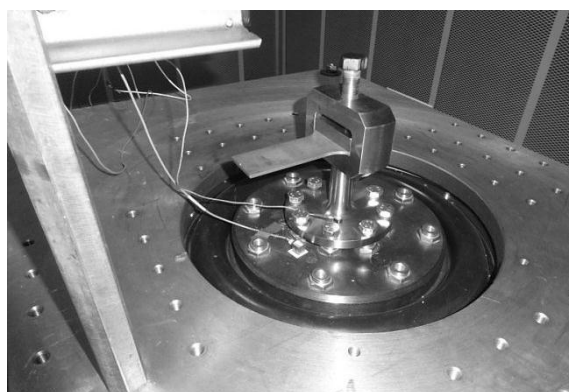


Рис. 1. Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным образцом в оснастке

Для проведения испытаний по определению эффективности работы ионно-плазменных покрытий в настройках управляющей программы контроллера Vibratio Research 8500 выбран профиль испытаний Resonance Search. Испытания проводили при одинаковых амплитудах колебаний вибростола, эквивалентных трем уровням напряжений: 30, 50 и 70 МПа (для образца без покрытия). Образец жестко зажимался одним концом в специальной оснастке. В результате испытаний получены амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) на резонансных частотах.

Следует отметить, что эффективность работы ионно-плазменных покрытий возможно определять по добротности, без вычисления декрементов затухания колебаний по экспериментальным амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ).

Результаты испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытиями и без них при 20°C, для трех уровней напряжений при одинаковых амплитудах вибростола представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них (при одинаковой мощности для напряжения в опасном сечении образца без покрытия 30 МПа)

Покрытие	Амплитуда, эквивалентная напряжению в опасном сечении, мм (эксперимент)	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон частот амплитудно-частотных характеристик, Гц	Добротность (Q -фактор)
Без покрытия	1,40	240,6	239,6–241,6	593
Ti	1,27	242,61	241,7–243,7	636,1
Zr	1,22	235,65	234,7–236,7	623,3
Cr	1,16	240,17	239,2–241,2	564,8
Ni	1,2	238,83	237,9–239,9	539,8
Al	1,14	242,28	241,4–243,4	502,7
Cu	1,2	243,38	242,4–244,4	516,3

Таблица 3

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них (при одинаковой мощности для напряжения в опасном сечении образца без покрытия 50 МПа)

Покрытие	Амплитуда, эквивалентная напряжению в опасном сечении, мм (эксперимент)	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон частот амплитудно-частотных характеристик, Гц	Добротность (Q -фактор)
Без покрытия	2,30	240,5	239,6–241,6	539,4
Ti	2,14	242,19	241,3–243,3	648,3
Zr	2,07	235,26	234,4–236,4	612,4
Cr	1,89	239,87	239,8–241	859,8
Ni	1,99	238,33	237,5–239,5	610,1
Al	1,88	241,78	240,9–242,9	523,2
Cu	1,89	242,94	242,1–244,1	559,7

Таблица 4

Параметры испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменными покрытиями и без них (при одинаковой мощности для напряжения в опасном сечении образца без покрытия 70 МПа)

Покрытие	Амплитуда, эквивалентная напряжению в опасном сечении, мм (эксперимент)	Частота резонанса на свободном конце образца, Гц	Диапазон частот амплитудно-частотных характеристик, Гц	Добротность (Q -фактор)
Без покрытия	3,20	240,5	239,6–241,6	507,8
Ti	2,93	241,89	241–243	547,4
Zr	2,77	235,01	234,1–236,1	533,7
Cr	2,81	239,44	238,6–240,6	554
Ni	2,87	237,97	237,1–239,1	603,2
Al	2,46	241,58	240,7–242,7	463,2
Cu	2,51	242,6	241,7–243,7	473,9

По результатам испытаний установлено, что (согласно параметру Q) высокую эффективность работы показало покрытие из алюминия (по сравнению с другими покрытиями) при выбранных уровнях напряжений в опасном сечении образцов – у данного покрытия показатель добротности самый низкий.

Зависимость амплитуды свободного конца образца от напряжения в опасном сечении представлена на рис. 2. Видно, что наилучшими показателями обладает покрытие из алюминия, которое снижает амплитуду свободного конца образца в среднем на 20% относительно образца без покрытия, при этом напряжение в опасном сечении понижается на 10 МПа.

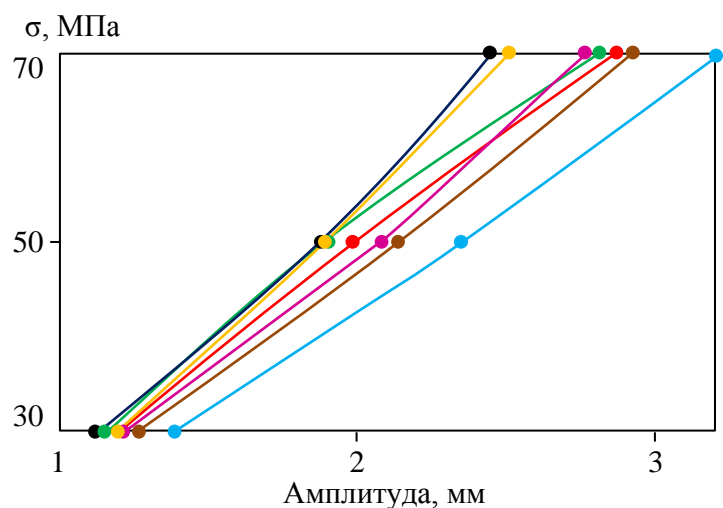


Рис. 2. Зависимость амплитуды свободного конца образцов из титанового сплава VT6 без покрытия и с покрытиями на основе чистых металлов от напряжения в опасном сечении:
 ● – без покрытия; ● – Ni; ● – Zr; ● – Ti; ● – Al; ● – Cr; ● – Cu

Полученные данные подтверждают результаты испытания по определению демпфирующей способности, но, в данном случае, испытания на эффективность работы ионно-плазменных покрытий позволяют в более краткие сроки выбрать покрытие с лучшими демпфирующими характеристиками.

Обсуждение и заключения

Показана возможность применения ионно-плазменных покрытий, нанесенных по вакуумно-плазменной технологии высоких энергий, для снижения амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава VT6.

В качестве технологической операции по подготовке поверхности образцов выбрана виброгалтовка (ВГ) на круговом вибраторе фирмы Rosler в течение 6 ч при амплитуде колебаний 5 мм с последующей промывкой в щелочном растворе и сушкой сжатым воздухом.

Определены расчетные толщины нанесенных экспериментальных демпфирующих покрытий, которые составили (в среднем) от 2 до 16 мкм, что эквивалентно удельному изменению массы покрытия в диапазоне 19–73 г/м².

Исследована эффективность ионно-плазменных покрытий при испытаниях на демпфирующую способность на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M. Показана возможность определения эффективности работы покрытий по снижению амплитуды свободного конца образца и добротности (*Q*-фактор). По результатам испытаний установлено, что наилучшие показатели по снижению амплитуды колебаний свободного

конца образца имеет покрытие из алюминия, обладающее также самой низкой добротностью, по сравнению с образцами из титанового сплава ВТ6 с другими покрытиями на основе чистых металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
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. Sordelet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin on polygrained quasicrystalline and crystalline Al–Cu–Fe alloys //Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1999. V. 553. P. 459–470.
4. 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.
5. Мубояджян С.А., Помелов Я.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД /В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства» М.: ВИАМ. 2003. С. 116–131.
6. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
7. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
8. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
10. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.2006.
11. 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.
12. Сплав на основе титана: пат. 2426808 Рос. Федерация; опубл. 20.08.2011.
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. Особенности осаждения из двухфазного потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала //Металлы. 2008. №2. С. 20–34.
15. 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.
16. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. и др. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
17. 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.
18. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
19. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
20. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
21. 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.
22. Бецофен С.Я., Смирнов В.Г., Ашмарин А.А., Шафоростов А.А. Количественные методы описания текстуры и анизотропии свойств сплавов на основе титана и магния //Титан. 2010. №2. С. 16–22.
23. 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.
24. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов //Проблемы прочности. 2008. №5. С. 96–104.

REFERENCES LIST

1. Muravchenko F.M., Sheremet'ev A.V. Aktual'nye problemy dinamiki, prochnosti i nadezhnosti sovremennykh aviadvigatелеj [Actual problems of dynamics, durability and reliability of modern aircraft engines] //Vibracii v tehnikе i tehnologijah. 2001. №4(20). S. 2–5.
2. Shorr B.F., Serebrjakov N.N. Raschetno-jeksperimental'nyj analiz amplitudno-zavisimyh harakteristik dempfirovaniya v detaljah i materialah [The rated and experimental analysis of amplitude and

- dependent characteristics of damping in details and materials] //Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. 2011. №3. S. 91–99.
3. Sordelet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin go fpolygrainedquasicrystalinne and crystalline Al–Cu–Fe alloys //Mat. Res. Soc. Symp. Poc. 1999. V. 553. P. 459–470.
 4. 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.
 5. Mubojadzhjan S.A., Pomelov Ja.A. Zashhitnye pokrytija dlja lopatok kompressora GTD [Protecting covers for GTD compressor blades] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokozharoprochnye materialy dlja sovremennyh i perspektivnyh gazoturbinyh dvigatelej i progressivnye tehnologii ih proizvodstva» M.: VIAM. 2003. S. 116–131.
 6. Sposob poluchenija litogo trubnogo katoda iz splavov na osnove aljuminija dlja ionno-plazmennogo nanesenija pokrytij [Way of receiving the cast pipe cathode from alloys on the basis of aluminum for ion-plasma drawing coverings]: pat. 2340426 Ros. Federacija; opubl. 16.04.2007.
 7. Sposob poluchenija lityh trubnyh izdelij iz splavov na osnove nikelja i/ili kobal'ta [Way of receiving cast tubular goods from alloys on the basis of nickel and/or cobalt]: pat. 2344019 Ros. Federacija; opubl. 16.04.2007.
 8. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
 9. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplonagruzhenykh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for the high-heatloaded details of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
 10. Ustanovka dlja nanesenija zashhitnyh pokrytij [Installation for drawing protecting covers]: pat. 2318078 Ros. Federacija; opubl. 26.06.2006.
 11. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Influence of modes of thermal processing on structure and property of heat resisting titanium alloy for KVD blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 8–14.
 12. Splav na osnove titana [Titanium-based alloy]: pat. 2426808 Ros. Federacija; opubl. 20.08.2011.
 13. Sibileva S.V., Karimova S.A. Obrabotka poverhnosti titanovyh splavov s cel'ju obespechenija adgezionnyh svojstv [Surface treatment of titanium alloys for the purpose of ensuring adhesive properties] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 25–35.
 14. Mubojadzhjan S.A. Osobennosti osazhdenija iz dvuhfaznogo potoka mnogokomponentnoj plazmy vakuumno-dugovogo razrjada, soderzhashhego mikrokapli isparjaemogo materiala [Features of sedimentation from diphasic flow of multicomponent plasma of the vacuum arc discharge containing microdrops of evaporated material] //Metally. 2008. №2. C. 20–34.

15. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. Nanoslojnye uprochnjajushhie pokrytija dlja zashhity stal'nyh i titanovyh lopatok kompressora GTD [Nanolayer strengthening coverings for protection of steel and titanitic compressor blades of GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 3–8.
16. Mubojadzhjan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S. i dr. Zashhitnye i uprochnjajushhie ionno-plazmennye pokrytija dlja lopatok i drugih otvetstvennyh detalej kompressora GTD [Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTD compressor] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 71–81.
17. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.
18. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //MiTOM. 1995. №2. C. 15–18.
19. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
20. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
21. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modifitsirovanie poverhnosti otvetstvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and modifying of surface of responsible details of machines in vacuum and arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
22. Becofen S.Ja., Smirnov V.G., Ashmarin A.A., Shaforostov A.A. Kolichestvennye metody opisaniya tekstury i anizotropii svojstv splavov na osnove titana i magnija [Quantitative methods of the description of structure and anisotropy of properties of titanium-based alloys and magnesium] //Titan. 2010. №2. S. 16–22.
23. Ustinov A.I., Movchan B.A., Skorodzievskij V.S. Issledovanie dempfirujushhej sposobnosti ploskih obrazcov iz titanovogo splava Ti–6%Al–4%V s pokrytijami iz olova i ittrija [Research of damping capacity of flat samples from Ti–6%Al–4%V titanium alloy with coverings from tin and yttrium] //Problemy prochnosti. 2001. №4. S. 55–61.
24. Ustinov A.I. Dissipativnye svojstva nanostrukturirovannyh materialov [Dissipative properties of the nanostructured materials] //Problemy prochnosti. 2008. №5. S. 96–104.