УДК 629.7.023.224 DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-67-72

С.А. Мубояджян[1], Д.С. Горлов[1], А.В. Щепилов[1], В.И. Коннова[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

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.

Показано, что для оценки эффективности демпфирующей способности ионно-плазменного покрытия можно пользоваться критерием добротности колебательной системы.

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

The possibility of application of ion-plasma coatings to reduce the oscillatory amplitude of the free end of VT6 titanium alloy specimens was shown. Coatings were deposited by high-energy vacuum-plasma technology. The tests were conducted on a vibro-dynamic stand under conditions of the first bending mode resonance.

It was shown that the factor of merit of the oscillating system could be used for evaluation of the damping capacity of ion-plasma coatings.

Keywords: *high-energy vacuum-plasma technology, ion-plasma damping coating, factor of merit, damping decrement.*

[1]Федеральное 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

Предотвращение усталостных поломок лопаток турбомашин, связанных с повышенным уровнем вибраций, представляет собой важную задачу двигателестроения. Уменьшение уровня переменных вибронапряжений обеспечивает надежную работу двигателя и увеличение его ресурса, однако значительное снижение напряжений может быть несовместимо с требованиями к другим характеристикам 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 собой актуальную научно-техническую задачу [1].

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. [2].

В условиях, где использование демпфирующих элементов затруднительно или не представляется возможным, для снижения переменных напряжений можно использовать специальные демпфирующие покрытия [3]. Для демпфирующих покрытий рассматриваются многокомпонентные 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. По этой технологии наносят покрытия 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 наносится осаждением 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 [4–12].

Данная статья посвящена исследованию возможности применения ионно-плазменных покрытий в качестве демпфирующих, позволяющих снизить амплитуды колебаний свободного конца образцов из сплава ВТ6 на основе титана при возбуждении на электродинамическом вибраторе резонансных колебаний образцов по первой изгибной форме.

Материалы и методы

Для исследований из титанового сплава ВТ6 изготовлены модельные образцы толщиной 2 мм. Для подготовки поверхности образцов использовали: круговой и лотковый вибратор фирмы Rosler, а также пескоструйную камеру эжекторного типа. Данные типы поверхностной обработки применили для придания поверхности образцов титанового сплава ВТ6 разной морфологии, а также с целью создания в поверхностном слое сжимающих напряжений [13, 14]. Нанесение демпфирующих покрытий осуществлялось на ионно-плазменной установке МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом согласно ПИ1.2.620–2002. Исследование микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6 с демпфирующими покрытиями в исходном состоянии проводили на металлографическом оптическом микроскопе GX 51 фирмы Olimpus с цифровой системой обработки изображения при увеличении ×500. Перед съемкой изготовленные микрошлифы подвергали травлению в 3%-ном растворе плавиковой кислоты. Испытания на демпфирующую способность проводили на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M при температуре 20°С согласно ASTM E 756–05.

Результаты

Одним из важных этапов при нанесении ионно-плазменных покрытий является стадия подготовки поверхности образцов основы перед нанесением. Выбрали следующие предварительные варианты подготовки поверхности образцов титанового сплава ВТ6:

– виброгалтовка (ВГ) в круговом вибраторе фирмы Rosler в течение 6 ч при амплитуде колебаний 5 мм;

– то же+виброполировка (ВП) в лотковом вибраторе фирмы Rosler в течение 6 ч;

– обдувка электрокорундом с размерами зерна 120–150 мкм при давлении 3 ат до образования однотонной матовой поверхности.

После технологических операций по подготовке поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 проводили отработку режимов нанесения вариантов демпфирующих покрытий. Осаждение покрытий осуществляли из сплавов на основе системы Al–Cu–Fe и сплавов этой же системы, дополнительно легированных иттрием и гадолинием [15]. Для нанесения покрытий выбран «мягкий» режим осаждения (ток вакуумной дуги 350 А, напряжение смещения 10–15 В), при котором температура ионного и радиационного нагрева титановых образцов не превышала 400°С, что предохраняло сплав ВТ6 от разупрочнения [16].

После нанесения покрытий на основе системы Al–Cu–Fe на ионно-плазменной установке МАП-3 установлено, что на образцах титанового сплава ВТ6 после поверхностной подготовки (ВГ и ВГ+ВП) наблюдалось растрескивание покрытия, что, по-видимому, связано с большим уровнем остаточных напряжений в поверхностном слое образцов. При этом покрытие на образцах, прошедших пескоструйную обработку поверхности электрокорундом, не имело поверхностных дефектов.

Поэтому для подготовки поверхности сплава ВТ6 перед нанесением покрытий выбрана пескоструйная обработка поверхности электрокорундом с размерами зерна 120–150 мкм при давлении 3 ат до образования однотонной матовой поверхности [17].

По выбранному режиму на образцы из титанового сплава ВТ6 нанесены демпфирующие покрытия следующих составов:

– состав *1* – Al–Cu–Fe;

– состав *2* – Al–Cu–Fe–Y;

– состав *3* – Al–Cu–Fe–Gd.

Известно, что демпфирующие покрытия на основе сплавов системы Al–Cu–Fe должны иметь толщину не менее 40–45 мкм [18]. Поэтому для определения реальной толщины и микроструктуры полученных покрытий проведены металлографические исследования нанесенных покрытий.

Исследования микрошлифов проводили на металлографическом оптическом микроскопе GX 51 фирмы Olimpus с цифровой системой обработки изображения. Микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6 (после химического травления в 3%-ном растворе плавиковой кислоты) с демпфирующими покрытиями и без них в исходном состоянии представлены на рис. 1.

Определена фактическая толщина нанесенных демпфирующих покрытий различных систем после 270 мин осаждения (табл. 1)

На микроструктурах покрытий видно наличие мелкодисперсных включений на основе микрокапельной фазы материала покрытия, присутствующей в потоке вакуумно-дуговой плазмы. Видно также отсутствие перегрева основы (сплав ВТ6), что подтверждает правильный выбор режима нанесения покрытия [19].

Для отработки режимов испытаний по определению демпфирующей способности экспериментальных материалов покрытий изготовлены модельные образцы из титанового сплава ВТ6, а

Таблица 1

Толщина демпфирующих покрытий

Условный номер состава	Система	Толщина покрытия, мкм
1	Al–Cu–Fe	~51
2	Al–Cu–Fe–Y	~70
3	Al–Cu–Fe–Gd	80

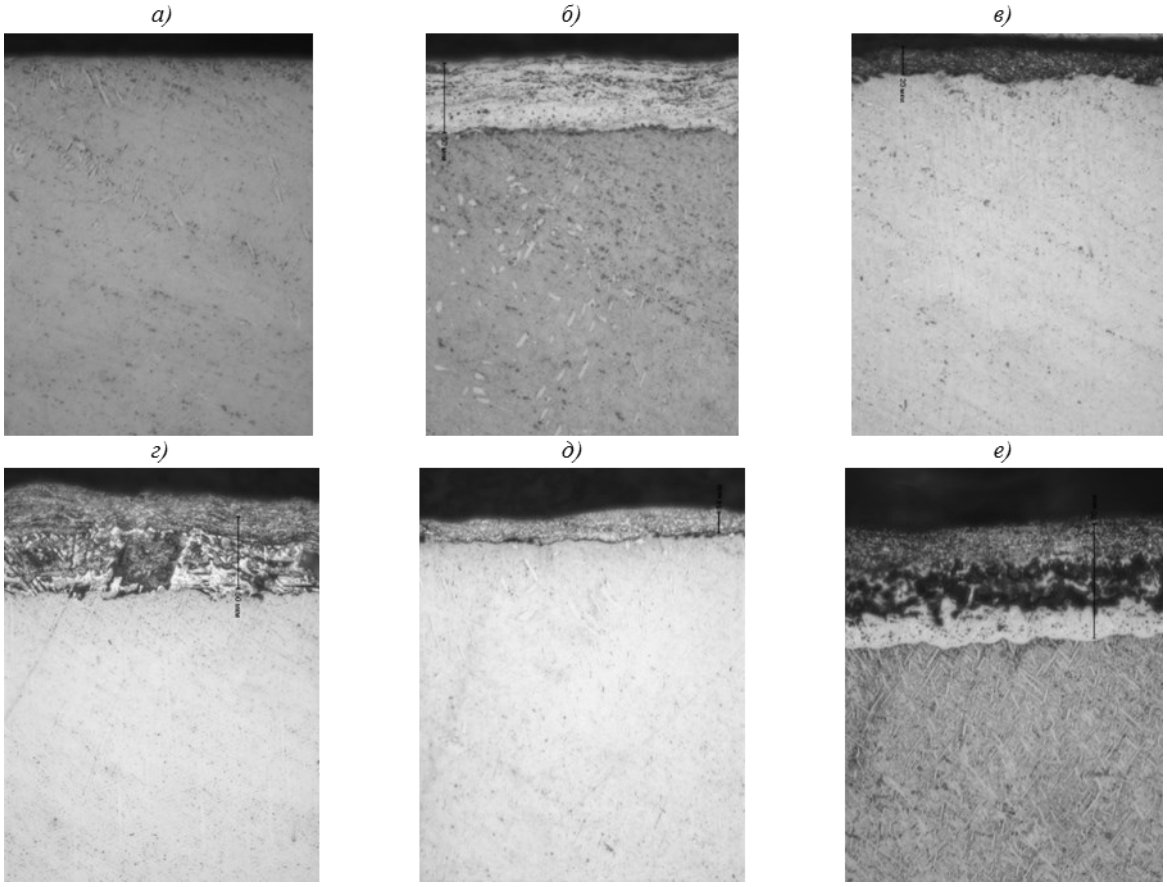


Рис. 1. Микроструктуры образцов титанового сплава ВТ6 с демпфирующими покрытиями и без них в исходном состоянии:

а – без покрытия; *б* – состав *1* (Al–Cu–Fe) при продолжительности осаждения 270 мин; *в*, *г* – состав *2* (Al–Cu–Fe–Y) при продолжительности осаждения 60 и 270 мин; *д*, *е* – состав *3* (Al–Cu–Fe–Gd) при продолжительности осаждения 60 и 270 мин соответственно

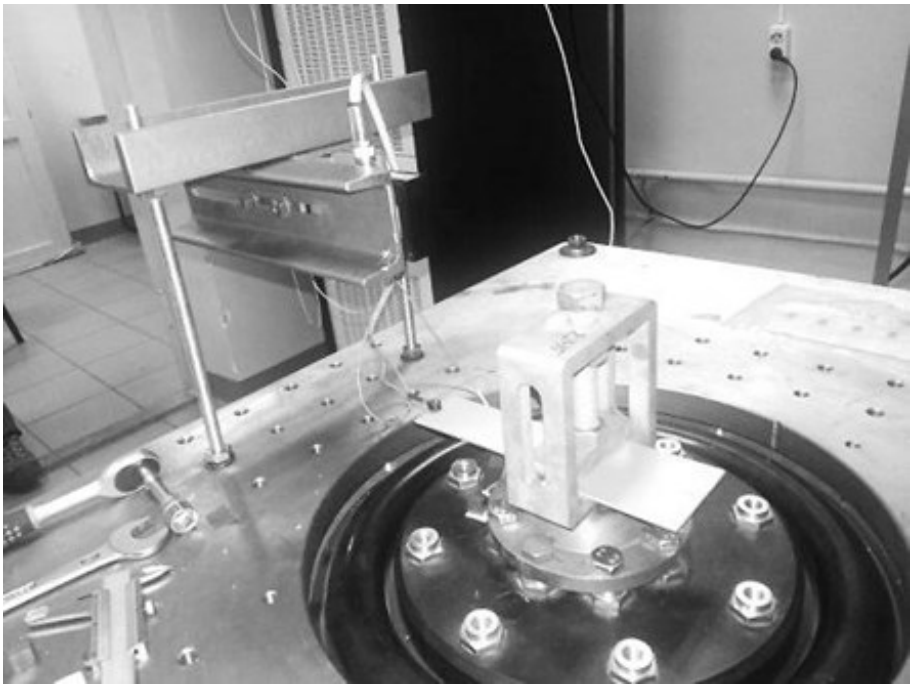
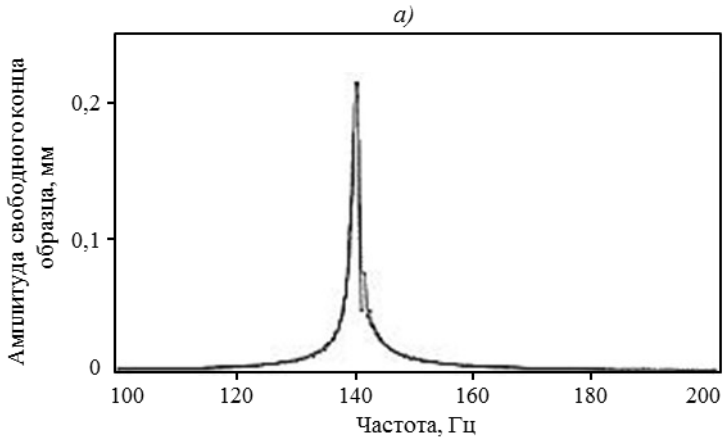


Рис. 2. Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным в оснастке образцом

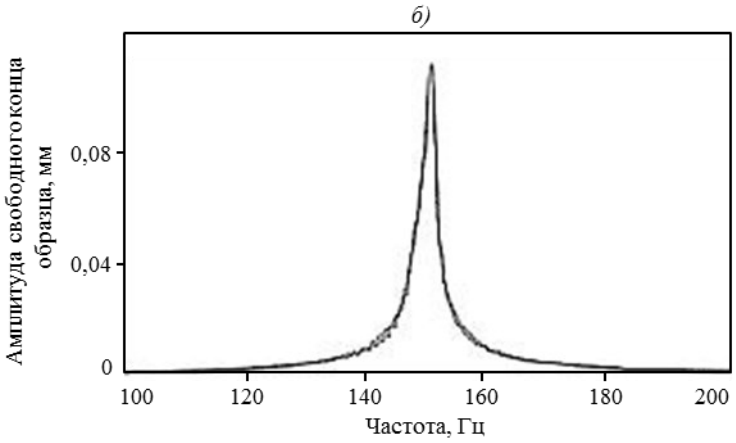


Параметры режима испытаний

Начальная частота, Гц	Амплитуда столика, мм	Конечная частота, Гц	Амплитуда столика, мм
100	0,01	200	0,01

Параметры при резонансе по первой изгибной форме

Частота, Гц	Каналы	Амплитуда, мм	Фаза, град	*Q*-фактор (добротность)
139,77	Ch2/Ch1	21,0628	241,7	129,0



Параметры при резонансе по первой изгибной форме

Частота, Гц	Каналы	Амплитуда, мм	Фаза, град	*Q*-фактор (добротность)
150,475	Ch2/Ch1	10,9732	259,2	72,5

Рис. 3. Резонансные кривые и параметры испытаний для образцов из титанового сплава ВТ6 без покрытия (*а*) и с покрытием на основе сплава системы Al–Cu–Fe–Gd (*б*) при скорости прохода 100 Гц/мин в диапазоне частот 100–200 Гц

Таблица 2

Эффективность демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий на образцах титанового сплава ВТ6 при амплитуде столика 0,01 мм

Покрытие	Продолжительность осаждения, мин	Толщина покрытия, мкм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда резонанса, мм	*Q*-фактор (добротность)
Без покрытия	–	–	139	0,2	129
Al–Cu–Fe	270	51,2	145,9	0,19	128,5
Al–Cu–Fe–Y	60	15	142,0	0,14	81,3
	270	70	148,9	0,12	82,9
Al–Cu–Fe–Gd	60	15	138,7	0,14	83,6
	270	80	150,5	0,11	72,5

также технологическая оснастка для жесткого закрепления образца на столе вибростенда [20]. Испытания проводили на электродинамическом вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M при температуре 20°С согласно ASTM E 756–05.

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

В настройках управляющей программы контроллера Vibration Research 8500 выбран профиль испытаний Resonance Search, диапазон частот 100–200 Гц, амплитуда столика 0,01 мм. Образец жестко зажимался одним концом в специальной оснастке, на свободном конце закреплялся измеряющий акселерометр. Для воспроизводимости результатов испытаний образцов затяжка их производилась динамометрическим ключом.

Варианты отчета управляющей программы для резонансных кривых и параметров испытаний (при 20°С) образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием Al–Cu–Fe–Gd с самой низкой добротностью и без покрытия представлены на рис. 3.

Следует отметить, что данная программа выдает в качестве отчета *Q*-фактор (добротность), который по научным литературным данным является критерием диссипативных свойств материалов и является обратной величиной коэффициента рассеяния энергии, а также декремента затухания колебаний [21]. Испытания, проведенные на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M, показали возможность получения данных с резонансных пиков для дальнейших расчетов коэффициентов рассеяния энергии, а также декремента затухания колебаний. В результате испытаний (при 20°С) получены амплитудно-частотные зависимости на резонансных частотах, представленные в табл. 2.

Обсуждение и заключения

Отработана технологическая схема – от подготовки поверхности образцов титанового сплава ВТ6 перед нанесением ионно-плазменных демпфирующих покрытий до технологии нанесения (без разупрочнения материала основы).

Выбраны технологические режимы нанесения демпфирующих покрытий на образцы титанового сплава ВТ6, при которых температура на образцах не превышала 400°С: ток вакуумной дуги 350 А, напряжение смещения 10–15 В, скорость осаждения 15–20 мкм/ч.

В качестве технологической операции по подготовке поверхности образцов выбрана пескоструйная обработка электрокорундом с размерами зерна 120–150 мкм при давлении 3 ат до образования однотонной матовой поверхности.

Определены толщина и структура полученных конденсатов, проведены металлографические исследования полученных покрытий.

Установлена фактическая толщина нанесенных экспериментальных демпфирующих покрытий, которая составила в среднем от 15 до 80 мкм. Разная толщина при одинаковой продолжительности осаждения связана с различной плотностью полученных материалов отлитых катодов. На микроструктурах покрытий отчетливо видно наличие мелкодисперсных включений. Перегрев основы отсутствует, что объясняет правильный выбор режимов нанесения.

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). Исходя из данных, полученных при испытании, установлено, что дополнительное легирование системы Al–Cu–Fe редкоземельными металлами повышает эффективность работы покрытия и его демпфирующую способность. Наиболее высокие показатели по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца показало покрытие системы Al–Cu–Fe–Gd, также имеющее самую низкую добротность по сравнению с образцами титанового сплава ВТ6 с покрытиями систем Al–Cu–Fe и Al–Cu–Fe–Y.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Sordelet D.J., Kim J.S., Besser M.F. Dryslidin go fpolygrained quasicrystalinne 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. №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. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15-18.
7. 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.

8. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
9. Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта: пат. 2344019 Рос. Федерация; опубл. 16.04.2007.
10. 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.
11. 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.
12. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.2006.
13. 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.
14. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионных свойств (обзор) //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 25–35.
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. 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.
17. 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.
18. Сплав на основе титана: пат. 2426808 Рос. Федерация; опубл. 20.08.2011.
19. 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.
20. 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.
21. Устинов А.И. Диссипативные свойства наноструктурированных материалов //Проблемы прочности. 2008. №5. С. 96–104.