

УДК 629.7.023.224

Д.С. Горлов¹, А.В. Щетилов¹

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИЦИИ «СПЛАВ–ПОКРЫТИЕ»

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-11-11

Показана зависимость демпфирующей способности от толщины нового разработанного покрытия системы Al–Ni–Y при виброиспытаниях по первой изгибной форме при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжению 70 МПа в опасном сечении.

Исследованы шероховатость поверхности титанового сплава VT6 после нанесения демпфирующего покрытия и эрозионная стойкость нового разработанного покрытия системы Al–Ni–Y, а также демпфирующая способность после воздействия абразивного потока.

Работа выполнена в рамках 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: ионно-плазменное демпфирующее покрытие, демпфирующая способность, эрозионная стойкость.

The dependence of the damping ability of the thickness of new developed coatings system Al–Ni–Y during the vibration in the first bending form the resonance with the same amplitude of the exciting force corresponding to a stress of 70 MPa in the threat section.

We investigated the surface roughness of titanium alloy VT6 after application of the damping coating. Investigated the erosion resistance of the new developed coatings system Al–Ni–Y, and the damping ability after exposure to the abrasive stream.

Work was performed within the framework of strategic directions 17. «Comprehensive anti-corrosion protection, hardening, wear-resistant protective and heat-resistant coating», complex problem 17.3. «Multilayer heat-resistant and heat-resistant coating, nanostructural hardening of erosion and corrosion-resistant, wear-resistant, antifatigue coating to protect parts hot gas path 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-plasma coating damping, damping capacity, resistance to erosion.

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

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 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 актуальную научно-техническую задачу [2].

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. [3].

В условиях, где использование демпфирующих элементов затруднительно или не представляется возможным, для снижения переменных напряжений в лопатках компрессора 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. Для нанесения демпфирующих покрытий целесообразно использовать вакуумно-дуговой процесс генерации плазмы материала покрытия из литого трубного катода, получаемого в вакуумных индукционных печах, и ионно-плазменное осаждение при высоких и управляемых энергиях частиц [4–7].

Материалы и методы

Для исследований эрозионной стойкости изготовили образцы из титанового сплава ВТ6 в виде дисков $\varnothing 25$ мм и толщиной 3 мм.

Для исследований демпфирующей способности изготовили модельные образцы в виде лопатки из титанового сплава ВТ6 толщиной 3 мм с рабочей частью длиной 55 мм и шириной 20 мм. Размеры участка закрепления в оснастке – ширина 40 мм и длина 35 мм. Переход от зоны закрепления до рабочей части выполнен радиусом 15 мм. Поверхностную обработку образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием осуществляли путем виброгалтовки в круговом вибраторе фирмы Rosler.

Исследована шероховатость поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием после нанесения и последующих поверхностных обработок. 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 .

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

Испытания на относительную эрозионную стойкость проводили согласно ММ1.595-2-352–2008 на испытательном стенде – для испытаний использовали кварцевый песок Люберецкого карьера со средней фракцией 300 мкм. Испытания проводили при углах атаки 70 и 20 град в течение 3 циклов. Время цикла составляло 2 мин, давление воздуха 3 ат (0,3 МПа) при средней скорости частиц 50 м/с.

Образцы для испытаний на демпфирующую способность подвергали абразивному износу по экспериментальной методике ВИАМ на новом лабораторном стенде для эрозионных испытаний (рис. 1).

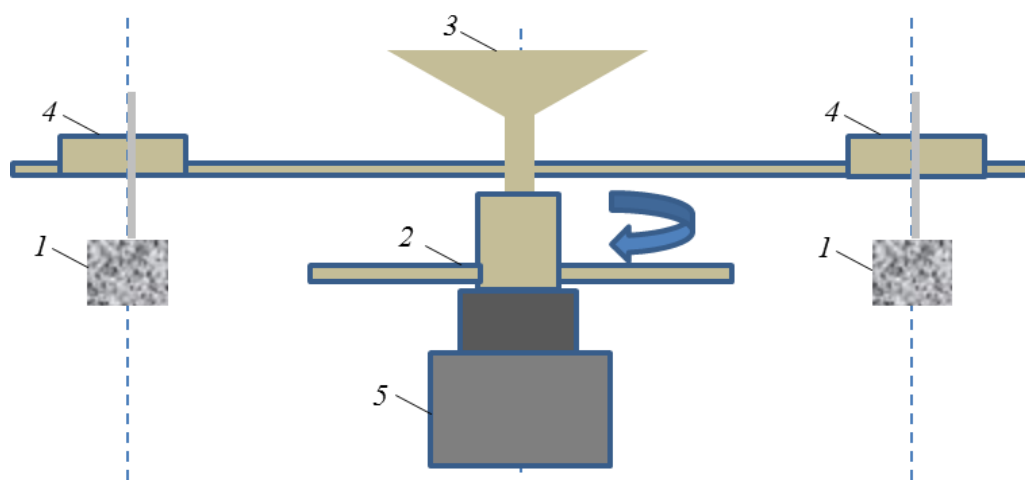


Рис. 1. Схема нового лабораторного стенда для испытаний на эрозионную стойкость:

1 – образец; 2 – крестообразный распылитель; 3 – бункер для подачи абразива; 4 – позиции крепления образцов под разными углами к абразивному потоку; 5 – двигатель

Принцип работы стенда заключается в обдувке исследуемых образцов, расположенных под разными углами к абразивному потоку, абразивным материалом. В данной работе в качестве абразива использовали кварцевый песок Люберецкого карьера, просеянный через сито с ячейками размером 1 мм. Абразив, засыпанный в бункер установки, расположенной в верхней части, самотеком поступал в роторный распылитель, имеющий крестообразную форму. За счет центробежной силы песок абразивной струей эродировал исследуемые образцы. Масса песка составляла 1,7 кг. Продолжительность полного расхода песка составляла 45–50 с.

Результаты

Для исследований влияния шероховатости поверхности и абразивного износа на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» на ионно-плазменной установке МАП-3 с автоматизированной системой управления технологическим процессом наносили новое демпфирующее покрытие на основе алюминиевого сплава, легированного никелем и редкоземельным металлом – иттрием. Толщину покрытия варьировали – от 20 до 100 мкм. Нанесение проводили в одном технологическом цикле с периодической выгрузкой образцов при напылении покрытия толщиной, кратной 20 мкм [8–12].

После нанесения демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y проведены испытания на демпфирующую способность при температуре 20°C. Данные зависимости эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа в исходном состоянии представлены в табл. 1 [13].

Оценку демпфирующей способности рассчитывали по формуле, по которой амплитуду образца в резонансе после нанесения покрытия умножали на 100 и полученное значение делили на амплитуду образца в резонансе до нанесения покрытия. Полученный результат далее вычитали из 100. Данное значение означает на сколько процентов снизилась амплитуда колебаний свободного конца образца.

Таблица 1

Зависимость эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа в исходном состоянии

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Без покрытия		С покрытием	
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм
1	20	490,6	1,46	499,2	1,33
2	40	492,8	1,45	500,9	1,3
3	60	488,6	1,45	499,8	1,24
4	80	498,5	1,45	513,3	1,13
5	100	496,3	1,45	515,8	1

Установлено, что с увеличением толщины покрытия демпфирующая способность повышается:

Толщина покрытия, мм	Эффективность демпфирования, %
20	9
40	10,3
60	14,5
80	22
100	31

После испытаний на демпфирующую способность измеряли шероховатость покрытия и далее образцы подвергали поверхностной виброгалтовке в круговом вибраторе фирмы Rosler [14]. После 1 ч обработки измеряли шероховатость поверхности и далее проводили испытания на демпфирующую способность. Данные зависимости эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа после виброгалтовки в течение 1 ч представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа после виброгалтовки в течение 1 ч

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Без покрытия		С покрытием	
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм
1	20	490,6	1,46	499	1,3
2	40	492,8	1,45	502,2	1,28
3	60	488,6	1,45	499	1,25
4	80	498,5	1,45	515,9	1,07
5	100	496,3	1,45	518,3	1,07

Показано, что после 1 ч поверхностного выглаживания с увеличением толщины покрытия демпфирующая способность повышается:

Толщина покрытия, мм	Эффективность демпфирования, %
20	10
40	11,7
80	26,2

При толщинах 60 и 100 мкм эффективность демпфирования уменьшилась – с 14,5 до 13,8% и с 31 до 26,2% соответственно.

Затем образцы снова обработали в круговом вибраторе фирмы Rosler в течение 1 ч. Данные зависимости эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа после 2 ч виброгалтовки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость эффективности демпфирования образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y различной толщины и без него при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении образца 70 МПа после 2 ч виброгалтовки

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Без покрытия		С покрытием	
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм
1	20	490,6	1,46	502,1	1,35
2	40	492,8	1,45	500,2	1,32
3	60	488,6	1,45	499,6	1,25
4	80	498,5	1,45	513,6	1,17
5	100	496,3	1,45	515,3	1,1

Установлено, что с увеличением толщины покрытия демпфирующая способность уменьшается:

Толщина покрытия, мм	Уменьшение эффективности демпфирования, %
20	с 10 до 7
40	с 11,7 до 8,9
80	с 26,2 до 19,3
100	с 26,2 до 24,1

При толщине покрытия 60 мкм эффективность демпфирования не изменилась и составила 13,8%.

Данные по шероховатости поверхности в зависимости от толщины и последующей обработки демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y в круговом вибраторе фирмы Rosler представлены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры шероховатости поверхности в зависимости от толщины и продолжительности обработки демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y в круговом вибраторе фирмы Rosler

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Средний параметр шероховатости R_a поверхности с покрытием после виброгалтовки в течение, ч		
		Без обработки	1	2
1	20	2,57	0,76	0,74
2	40	3,19	1,09	0,92
3	60	3,16	1,87	1,18
4	80	3,1	1,52	1,25
5	100	4,24	2,31	1,61

Показано, что с увеличением продолжительности поверхностной обработки величина микронеровностей уменьшается. Наименьшее значение зафиксировано на образце из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием толщиной 20 мкм после 2 ч виброгалтовки, наибольшее – при толщине 100 мкм.

При эксплуатации ГТД при взлете и посадке лопатки компрессора испытывают воздействие абразивного потока. С целью исследования стойкости разработанного демпфирующего покрытия к абразивному износу проведены испытания на лабораторной установке для испытания композиции образцов на относительную эрозионную

стойкость при температуре 20°C. Исследование эрозионной стойкости проводили на дисковых образцах с нанесенным покрытием толщиной 60 мкм при углах атаки абразивного потока в 70 и 20 град. Это имитирует прямой (на входной кромке) и касательный (на корыте и выходной кромке) соударение абразива с лопаткой компрессора ГТД. Перед испытаниями образцы подвергали виброгалтовке в течение 1 ч. Данные по исследованиям приведены в табл. 5 [15], все образцы прошли три цикла испытаний.

Таблица 5

Относительный эрозионный износ образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием толщиной 60 мкм и без него

Условный номер образца	Относительный эрозионный износ/эрозионная стойкость, раз, при угле атаки абразивного потока, град	
	70	20
1*	1	1
2	1,55/0,6	1,32/0,8
3	1,34/0,7	1,13/0,9
4	1,87/0,5	1,5/0,7
5	1,97/0,5	1,55/0,6
6	2,29/0,4	1,37/0,7

* Образец без покрытия (контрольный).

Установлено, что демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y незначительно повышает эрозионную стойкость образца из титанового сплава ВТ6 относительно образца без покрытия: в 0,54 раза – при угле атаки абразивного потока 70 град и 0,74 раза – при угле 20 град.

Исследована зависимость демпфирующей способности после воздействия абразивного потока на новое разработанное покрытие системы Al–Ni–Y. Эрозионные испытания проводили на новом лабораторном стенде с роторной системой подачи абразива. Поскольку испытания на демпфирующую способность проводили по первой изгибной форме колебаний, то обдувке подвергали только место на образцах для демпфирования с максимальными напряжениями. Образцы располагали под прямым углом к абразивному потоку.

После обдувки образцов установлено, что покрытия толщиной 20 и 40 мкм от воздействия абразивного потока слетели, а толщиной от 60 до 100 мкм – остались.

Внешний вид испытанных образцов титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием после испытаний на эрозионную стойкость представлен на рис. 2.

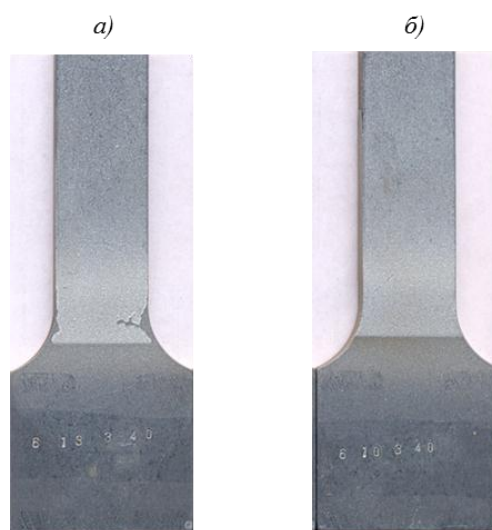


Рис. 2. Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием толщиной 40 (а) и 80 мкм (б) после испытаний на эрозионную стойкость

Данные по демпфирующей способности образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y после воздействия абразивного потока представлены в табл. 6.

Таблица 6

Данные по демпфирующей способности образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y после воздействия абразивного потока

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Без покрытия		С покрытием		Эффективность демпфирования, %
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	
1	20	490,6	1,46	495,3	1,25	13,8
2	40	492,8	1,45	497,3	1,28	11,7
3	60	488,6	1,45	490,1	1,24	14,5
4	80	498,5	1,45	511,5	1,14	21,3
5	100	496,3	1,45	514,8	1,12	22,7

Установлено, что демпфирующая способность после воздействия абразивного потока на образцах из титанового сплава ВТ6 со слетевшим покрытием увеличивается – образцы 1 и 2. Вероятно, это связано с поверхностным упрочнением титанового сплава ВТ6 абразивным потоком.

Исследовали демпфирующую способность образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y толщиной 80 и 100 мкм после воздействия абразивного потока при температуре 400°C. Испытания при повышенной температуре проводили с возбуждающей силой такой же величины, как и для испытаний при температуре 20°C. Данные представлены в табл. 7.

Таблица 7

Данные по демпфирующей способности образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y толщиной 80 и 100 мкм после воздействия абразивного потока при температуре 400°C

Условный номер образца	Толщина покрытия, мкм	Без покрытия		С покрытием		Эффективность демпфирования, %
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	
4	80	498,5	1,45	481	0,58	60
5	100	496,3	1,45	483	0,54	63

Показано, что демпфирующая способность составила 60% для образца из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y толщиной 80 мкм и 63% – для образца толщиной 100 мкм.

Обсуждение и заключения

В данной статье показана зависимость демпфирующей способности от толщины нового разработанного покрытия системы Al–Ni–Y при виброиспытаниях по первой изгибной форме при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжениям 70 МПа в опасном сечении.

Установлено, что с увеличением толщины нанесенного покрытия демпфирующая способность повышается и соответствует значениям при температуре 20°C:

Толщина покрытия, мм	Эффективность демпфирования, %
20	9
40	10,3
60	14,5
80	22
100	31

После поверхностной обработки в виде виброгалтовки демпфирующая способность после 1 ч поверхностного выглаживания с увеличением толщины покрытия повышается при толщинах 20, 40 и 80 мкм и составляет соответственно: 10; 11,7 и 26,2%. При толщинах 60 и 100 мкм эффективность демпфирования уменьшилась – с 14,5 до 13,8% и с 31 до 26,2% соответственно.

После двух часов виброгалтовки демпфирующая способность уменьшается при толщинах покрытия: 20 мкм – с 10 до 7%; 40 мкм – с 11,7 до 8,9%; 80 мкм – с 26,2 до 19,3%; 100 мкм – с 26,2 до 24,1%. При толщине 60 мкм эффективность демпфирования не изменилась и составила 13,8%.

Показано также, что с увеличением толщины демпфирующего покрытия величина микронеровностей возрастает, что связано с наличием микрокапельной фазы. Характерно, что после поверхностного выглаживания шероховатость поверхности демпфирующего покрытия снижается и при этом демпфирующая способность также снижается, что связано с уменьшением толщины покрытия.

Демпфирующее покрытие разрабатывалось для снижения напряжений в лопатке компрессора ГТД. Особенности работы лопаток компрессора ГТД предполагают эрозионное воздействие на перо, особенно на вертолетных двигателях, поэтому испытания на эрозионную стойкость демпфирующего покрытия представляют значительный интерес.

На первой стадии испытывали образцы по стандартной лабораторной методике на стойкость к эрозионному воздействию, при котором образец обдувается под углом 70 град, имитирующему лобовой удар о входную кромку лопатки, и под углом 20 град – касательный удар о корыто и выходную кромку лопатки. Демпфирующее покрытие толщиной 60 мкм прошло испытание на относительную эрозионную стойкость – выдержало 3 цикла.

Установлено, что демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y незначительно повышает эрозионную стойкость образца из титанового сплава BT6 относительно образца без покрытия: в 0,54 раза – при угле атаки абразивного потока 70 град и 0,74 раза – при угле 20 град.

Образцы с демпфирующим покрытием испытывали на стойкость к абразивному износу на новом эрозионном стенде с более жесткими условиями проведения испытаний.

После обдувки абразивным потоком образцов с демпфирующим покрытием после поверхностной виброгалтовки обнаружено, что покрытия толщиной 20, 40 и 60 мкм слетели, а покрытия толщиной 80 и 100 мкм прошли жесткий цикл испытаний.

Испытания на демпфирующую способность после эрозионного воздействия показали увеличение демпфирования на образцах из титанового сплава BT6 со слетевшим покрытием. Вероятно, это связано с поверхностным упрочнением от воздействия абразивного потока.

Эксплуатация лопаток компрессора предполагает работу при повышенной температуре. Испытания на демпфирующую способность образцов из титанового сплава BT6 с устоявшим покрытием системы Al–Ni–Y после эрозионного воздействия при температуре 400°C показали снижение амплитуды свободного конца образца больше чем в 2 раза при одинаковой возбуждающей силе такой же величины, как и для испытаний при температуре 20°C.

Показано, что демпфирующая способность возросла и составила в среднем 61,5%.

Представленные данные можно использовать в дальнейших работах для повышения служебных характеристик разрабатываемых материалов.

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. 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. 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.
4. 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.
5. Шорр Б.Ф., Мельникова Г.В., Серебряков Н.Н. Расчетно-экспериментальное исследование эффективности демпфирующих покрытий для рабочих лопаток турбомашин // *Прочность материалов и элементов конструкций: тр. Междунар. науч.-техн. конференции*. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. С. 133–141.
6. Мубояджян С.А., Горлов Д.С., Щепилов А.А., Коннова В.И. Исследование демпфирующей способности ионно-плазменных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 67–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-67-72.
7. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. Влияние ионной имплантации на демпфирующую способность композиции «сплав–ионно-плазменное покрытие» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-4-4.
8. Панин П.В., Дзунувич Д.А., Ширяев А.А. Исследование термической стабильности структуры титанового сплава ВТ6 после термоводородной обработки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-6-6.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А. Инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных покрытиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-4-4.
14. Лаптева М.А., Белова Н.А., Раевских А.Н., Филонова Е.В. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, синтезированном методом СЛС // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №9. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.
15. Горлов Д.С., Мубояджян С.А., Щепилов А.А., Александров Д.А. Исследование эрозионной стойкости и теплостойкости ионно-плазменных демпфирующих покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-11-17.