УДК 620.1

Д.С. Горлов[1], А.В. Щепилов[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИЦИИ «СПЛАВ–ПОКРЫТИЕ» ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-62-69

Исследована демпфирующая способность образцов из титанового сплава ВТ6 без покрытия и с новым покрытием системы Al–Ni–Y при виброиспытаниях по первой изгибной форме при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжению 70 МПа в опасном сечении.

Исследована демпфирующая способность композиции титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным покрытием после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С на базе 500 ч, а также после выдержки в камере солевого тумана в течение 3 мес.

Показано повышение служебных характеристик демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y после пропитки поверхности 5%-ным силикатным раствором в условиях камеры солевого тумана и высокотемпературной выдержки.

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: *ассистированное осаждение, ионно-плазменное демпфирующее покрытие, демпфирующая способность, жаростойкость, камера солевого тумана, коррозионная стойкость, металлографические исследования.*

The damping capacity of the samples from titanium alloy VT6 without coating and with the new coating of Al–Ni–Y system during the vibration tests according to the first flexural modes at resonance with the same amplitude of the exciting force corresponding to a stress of 70 MPa in critical section is researched.

The damping capacity of the composition of titanium alloy VT6 with ion-plasma coating after high temperature exposure at 400°C based on 500 hours and after aging in the salt spray chamber for 3 months is studied.

The increase in performance of the damping coating of Al–Ni–Y system after surface impregnation of the five-percent silicate solution under conditions of salt fog chamber and high temperature exposure is shown.

This work was performed within the framework of strategic directions 17. «Comprehensive anticorrosion 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: *assisted deposition, ion-plasma damping coating, damping capacity, heat resistance, salt spray chamber, corrosion resistance, metallographic research.*

[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

Среди механических характеристик конструкционных материалов, определяющих пригодность их для изготовления тех или иных элементов конструкций, все большее значение приобретает демпфирующая способность материала – способность поглощать энергию на необратимые процессы при циклическом его деформировании. Особое внимание к демпфирующим свойствам материала связано, прежде всего, с ростом основных параметров (скоростей, температур, давлений) в современных машинах, вследствие чего необходим более точный расчет динамической прочности элементов конструкций и машин, которые попадают в процессе эксплуатации в резонанс [2].

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 [3].

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. [4].

В условиях, когда 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 [5–8].

Во ФГУП «ВИАМ» отработаны технологии по изготовлению литых трубных катодов для испарения в ионно-плазменных вакуумно-дуговых установках типа МАП с автоматизированной системой управления технологическим процессом, а также технологии нанесения демпфирующих покрытий с заданным химическим составом [9].

Данная работа посвящена исследованиям демпфирующей способности образцов с новым ионно-плазменным покрытием на основе алюминиевого сплава, легированного никелем и редкоземельным металлом – иттрием, после высокотемпературной выдержки образцов в атмосферной муфельной печи и в камере солевого тумана [10, 11].

Материалы и методы

Для исследования демпфирующей способности изготовлены модельные образцы из титанового сплава ВТ6 толщиной 3 мм, представленные на рис. 1.

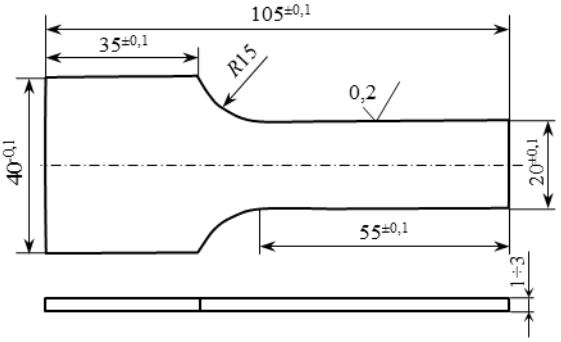

Рис. 1. Образец для испытаний на демпфирующую способность

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

Испытания на коррозионную стойкость проводили согласно СТП 1-595-7-370–2005 в камере солевого тумана марки ASCOTT S1000 в течение 3 мес.

Испытания на жаростойкость проводили согласно ГОСТ 6130–71 при температуре 400°С на базе 500 ч в атмосферной муфельной печи марки LE 14/11 фирмы Naberhterm. В качестве образцов использовали диски титанового сплава ВТ6 диаметром 30 мм и толщиной 3 мм.

Результаты

Для исследований на ионно-плазменной установке МАП-3 на образцы из титанового сплава ВТ6 методом ассистированного осаждения наносили новое демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y толщиной 60 мкм.

Ассистирование проводили при помощи имплантора газовых ионов (ускорителя ионов), расположенного в камере установки МАП-3, обеспечивающего на обрабатываемой поверхности ток ионов на уровне 200 мкА/см^2 с ускоряющим напряжением 30–40 кВ [12].

Контроль параметров технологического процесса нанесения покрытий осуществляли с помощью компьютерной программы с их последующим протоколированием. Самый главный критерий при осаждении демпфирующих покрытий – температура на образцах из титанового сплава ВТ6, которая не превышала 400°С, чтобы исключить разупрочнение материала основы [13].

Для предотвращения диффузии элементов из покрытия в титановый сплав использовали ионную имплантацию азотом перед нанесением покрытия.

Демпфирующую способность при виброиспытаниях по первой изгибной форме определяли

согласно СТО 1-595-2-506–2016 по снижению амплитуды колебаний свободного конца образца при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжениям 70 МПа в опасном сечении образцов (по методу А – сравнительное испытание образцов из титанового сплава ВТ6 методом оценки эффективности работы покрытия до и после нанесения).

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

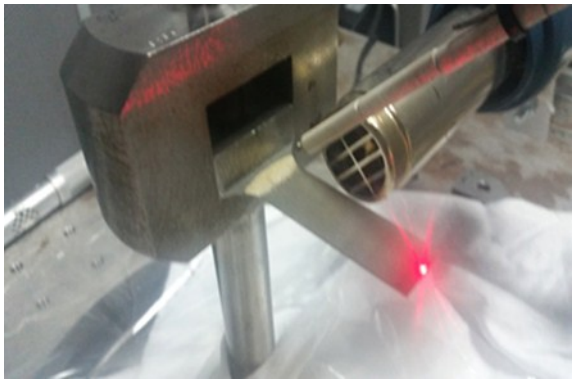

Рис. 2. Внешний вид вибростенда ETS Solution MPA 403-M124M с закрепленным образцом в оснастке

Расчетным методом перед испытаниями на демпфирующую способность определяли необходимую амплитуду свободного конца образца, соответствующую напряжению в опасном сечении, равному 70 МПа. При помощи управляющей программы от вибростенда подбирали такие параметры (амплитуда рабочего стола и частота), при которых амплитуда свободного конца образца соответствовала расчетным значениям.

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 показывает на сколько процентов снизилась амплитуда колебаний свободного конца образца.

Результаты испытаний на демпфирующую способность по методу А при температуре 20 и 400°С образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y и без него в исходном состоянии представлены в табл. 1 и 2.

Установлено, что демпфирующая способность композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие системы Al–Ni–Y» толщиной 60 мкм в исходном состоянии повышается в среднем на 22% при температуре 20°С и на 40% – при температуре 400°С.

Для оценки влияния высокотемпературной выдержки и коррозионной среды на демпфирующую способность композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие» проведены испытания в атмосферной печи при температуре 400°С в течение 500 ч и камере солевого тумана в течение 3 мес. Для этого образцы из титанового сплава ВТ6 с покрытием и без него испытывали на демпфирование до

Таблица 1

Демпфирующая способность покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца из титанового сплава ВТ6 при температуре 20°С в исходном состоянии

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
1	Без покрытия	500,2	1,45	0
2	С покрытием	493	1,13	22,0
3	С покрытием	504,8	1,15	20,7
5	С покрытием	494	1,14	21,4
6	С покрытием	508,1	1,09	24,8

Таблица 2

Демпфирующая способность покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца из титанового сплава ВТ6 при температуре 400°С в исходном состоянии

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
1	Без покрытия	449,7	1,21	0
2	С покрытием	463,3	0,7	42,1
3	С покрытием	478,1	0,73	39,7
5	С покрытием	465,3	0,74	38,8
6	С покрытием	481,7	0,74	38,8

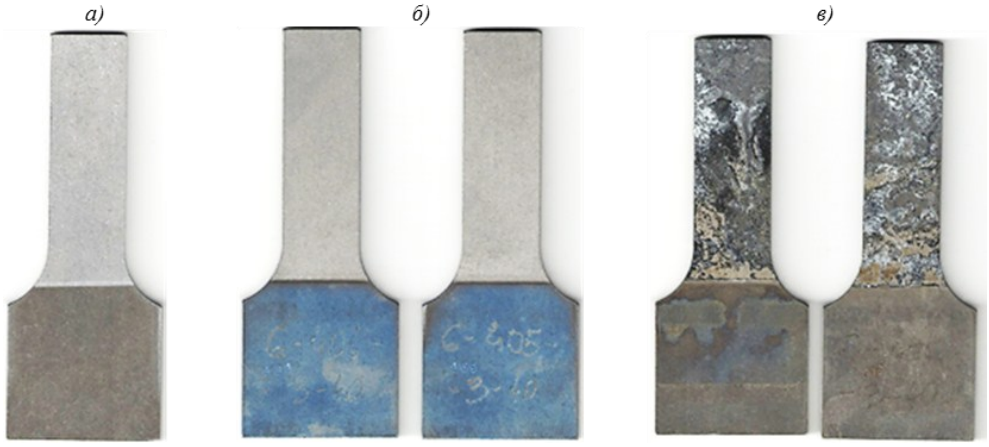

Рис. 3. Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ6 для испытаний на демпфирующую способность с нанесенным покрытием системы Al–Ni–Y:
а – в исходном состоянии; *б* – после высокотемпературной выдержки в атмосферной печи при температуре 400°С в течение 500 ч; *в* – после выдержки в условиях камеры солевого тумана в течение 3 мес

воздействия высокотемпературной выдержки и условий камеры солевого тумана и после полученных повреждений покрытия [14, 15].

Внешний вид образцов из титанового сплава ВТ6 для испытаний на демпфирующую способность с нанесенным покрытием системы Al–Ni–Y в исходном состоянии, после высокотемпературной выдержки в атмосферной печи при температуре 400°С в течение 500 ч и камере солевого тумана в течение 3 мес представлены на рис. 3.

На образцах из титанового сплава ВТ6 после высокотемпературной выдержки в атмосферной печи при температуре 400°С в течение 500 ч видны цвета побежалости. На образцах после камеры солевого тумана в течение 3 мес видна деградация покрытия. Испытания в камере солевого тумана в течение 3 мес достаточно жесткие, но однозначного вывода о коррозионной повреждаемости демпфирующего покрытия системы Al–Ni–Y сделать невозможно.

После высокотемпературной выдержки в атмосферной печи при температуре 400°С в течение 500 ч и экспозиции в камере солевого тумана в течение 3 мес образцы из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y подвергли испытаниям на демпфирующую способность.

Результаты испытаний на демпфирующую способность по методу А при температуре 20 и 400°С образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием и без него до и после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С в течение 500 ч представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Эффективность работы покрытий по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 20°С после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С в течение 500 ч

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
1	Без покрытия в исходном состоянии	500,2	1,45	0
2	С покрытием в исходном состоянии	493	1,13	22,0
	С покрытием после выдержки при 400°С	484,2	1,48	-2,1
3	С покрытием в исходном состоянии	504,8	1,15	20,7
	С покрытием после выдержки при 400°С	507,3	1,48	-2,1

Таблица 4

Эффективность работы покрытий по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 400°С после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С в течение 500 ч

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
1	Без покрытия в исходном состоянии	449,7	1,21	0
2	С покрытием в исходном состоянии	463,3	0,7	42,1
	С покрытием после выдержки при 400°С	459,6	0,96	20,6
3	С покрытием в исходном состоянии	478,1	0,73	39,7
	С покрытием после выдержки при 400°С	482	1	17,4

Следует отметить, что для понимания и расчетов демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие» в таблицах приведены данные для образца из титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии без покрытия и без воздействия высокотемпературной выдержки и условий камеры солевого тумана.

Установлено, что после воздействия высокотемпературной выдержки при температуре 400°С на базе 500 ч демпфирующая способность резко снижается как при температуре 20°С, так и при температуре 400°С – на 20%. Это может быть связано с ослаблением адгезионной составляющей на границе раздела «титановый сплав ВТ6–демпфирующее покрытие системы Al–Ni–Y» из-за разницы в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР).

Результаты испытаний на демпфирующую способность по методу А при температурах 20 и 400°С образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием и без него до и после условий камеры солевого тумана (КСТ) в течение 3 мес представлены в табл. 5 и 6.

Установлено, что демпфирующая способность композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие системы Al–Ni–Y» толщиной 60 мкм после условий камеры солевого тумана в течение 3 мес снижается в среднем на 20% при температуре 20°С и более 40% – при температуре 400°С.

Возможно это связано с деградацией покрытия.

Исходя из полученных результатов требуется техническое решение, которое позволит сохранить покрытие в условиях воздействия камеры солевого тумана и высокотемпературной выдержки при 400°С. Для этого возможно провести пропитку 5%-ным силикатным раствором поверхности образцов с покрытием из сплава системы Al–Ni–Y. Нанесение покрытия проводили без предварительной обработки поверхности ионным источником. После нанесения покрытия образцы подвергали пропитке в 5%-ном силикатном растворе с последующей сушкой при температуре 60°С для удаления натеков раствора.

Затем образцы без покрытия и с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, а также с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, пропитанным 5%-ным силикатным раствором, помещали в атмосферную печь и камеру солевого тумана. Выдержка в атмосферной печи при температуре 400°С составила 500 ч, а в камере солевого тумана 3 мес.

Далее образцы испытали на демпфирующую способность. Результаты испытаний на демпфирующую способность образцов из титанового сплава ВТ6 без покрытия и с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, а также с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, пропитанным 5%-ным силикатным раствором, после камеры солевого тумана в течение 3 мес представлены в табл. 7 и 8.

Установлено, что пропитка поверхности покрытия системы Al–Ni–Y 5%-ным силикатным раствором позволяет защитить покрытие от воздействия условий солевого тумана. Демпфирующая способность образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y без пропитки силикатным раствором в течение 3 мес в условиях камеры солевого тумана составила ~17%, а с пропиткой ~40% как при температуре 20°С, так и при температуре 400°С.

Результаты испытаний на демпфирующую способность образцов из титанового сплава ВТ6 без покрытия и с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, а также с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y, пропитанным 5%-ным силикатным раствором, после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С на базе 500 ч представлены в табл. 9 и 10.

Показано, что различия в демпфирующей способности образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием системы Al–Ni–Y после пропитки 5%-ным силикатным раствором и без нее практически не различимы и составляют при испытаниях при 20°С порядка 30%, а при температуре испытания 400°С − порядка 57%.

Эксперимент с пропиткой поверхности образца из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием системы Al–Ni–Y 5%-ным силикатным раствором показал положительный результат по защите от агрессивной среды камеры солевого тумана, а также от высокотемпературного окисления. Представленные данные можно использовать в дальнейших работах для повышения служебных характеристик разрабатываемых материалов.

Таблица 5

Эффективность работы покрытия по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 20°С после условий камеры солевого тумана в течение 3 мес

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
4	Без покрытия в исходном состоянии	500,2	1,45	0
5	С покрытием в исходном состоянии	494	1,14	21,4
	С покрытием после выдержки в КСТ	476,6	1,5	-3,4
6	С покрытием в исходном состоянии	508,1	1,09	24,8
	С покрытием после выдержки в КСТ	492,4	1,43	1,4

Таблица 6

Эффективность работы покрытия по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 400°С после условий камеры солевого тумана в течение 3 мес

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Демпфирующая способность, %
4	Без покрытия в исходном состоянии	449,7	1,21	0
5	С покрытием в исходном состоянии С покрытием после выдержки в КСТ	465,3 451,2	0,74 1,28	38,8 -5,8
6	С покрытием в исходном состоянии С покрытием после выдержки в КСТ	481,7 467,6	0,74 1,43	38,8 -18,2

Таблица 7

Эффективность работы покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 20°С после условий камеры солевого тумана в течение 3 мес

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	До нанесения покрытия		С покрытием		Демпфирующая способность, %
		частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	
7	Без покрытия	500,8	1,45	505	1,24	14,5
8	С покрытием системы Al–Ni–Y	496,7	1,48	498	1,22	17,5
9	С покрытием системы Al–Ni–Y+пропитка	490	1,51	492,2	0,86	43

Таблица 8

Эффективность работы покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 400°С после условий камеры солевого тумана в течение 3 мес

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	До нанесения покрытия		С покрытием		Демпфирующая способность, %
		частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	
7	Без покрытия	470	1,46	475,7	1,48	0
8	С покрытием системы Al–Ni–Y	468,5	1,48	472,6	1,23	16,8
9	С покрытием системы Al–Ni–Y+пропитка	464,2	1,45	466,7	0,86	40,7

Таблица 9

Эффективность работы покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 20°С после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С в течение 500 ч

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	До нанесения покрытия		С покрытием		Демпфирующая способность, %
		частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	
10	Без покрытия	495	1,47	499	1,48	0
11	С покрытием системы Al–Ni–Y	493,1	1,47	508,2	0,99	32,6
12	С покрытием системы Al–Ni–Y+пропитка	496,3	1,46	511,5	1,01	30,8

Таблица 10

Эффективность работы покрытия системы Al–Ni–Y по снижению амплитуды свободного конца образца при температуре 400°С после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С в течение 500 ч

Условный номер образца	Покрытие (технологическая операция)	До нанесения покрытия		С покрытием		Демпфирующая способность, %
		частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	частота резонанса, Гц	амплитуда свободного конца образца, мм	
10	Без покрытия	465,8	1,44	470,6	1,51	-4,8
11	С покрытием системы Al–Ni–Y	168,9	1,46	480,3	0,62	57,5
12	С покрытием системы Al–Ni–Y+пропитка	469,5	1,49	486,6	0,64	57

Таблица 11

Результаты удельного изменения массы образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием и без него при температуре 400°С на базе 500 ч

Покрытие	Толщина покрытия, мкм	Удельное изменение массы образцов, г/м^2, при выдержке в течение, ч						
		5	100	150	200	300	400	500
Без покрытия	–	0,03	0,09	0,12	0,069	0,137	0,13	0,15
Система Al–Ni–Y	60	0,02	0,08	0,069	0,137	0,069	0,137	0,07

а) *б)*

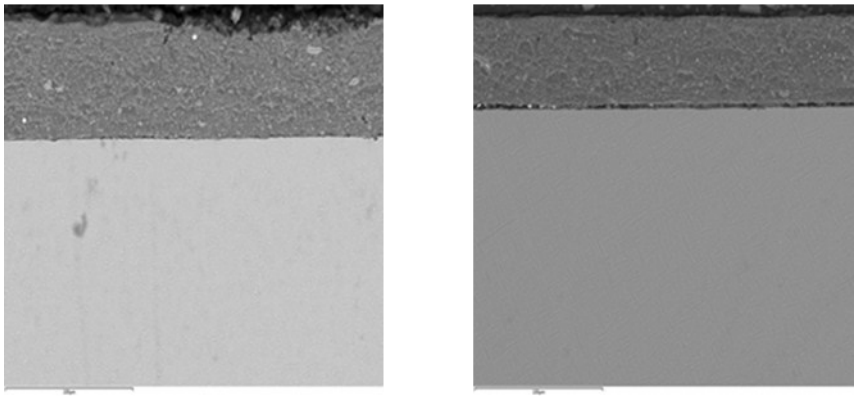

Рис. 4. Микроструктуры (×1000) образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием из сплава системы Al–Ni–Y после проведения испытаний на демпфирующую способность при температуре 400°С (*а*) и после испытаний на жаростойкость при температуре 400°С на базе 500 ч (*б*)

Немаловажным параметром для изучения демпфирующего покрытия является жаростойкость композиции «сплав–покрытие».

Результаты испытаний на жаростойкость по удельному изменению массы образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием и без него при температуре 400°С на базе 500 ч представлены в табл. 11.

Установлено, что образцы из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием по удельному изменению массы имеют высокую жаростойкость 0,07 г/м^2 (0,15 г/м^2 – без покрытия), обеспечивая защиту основы от окисления при температуре 400°С на базе 500 ч. Данные испытания показывают высокие защитные свойства покрытия системы Al–Ni–Y на титановом сплаве ВТ6.

Для определения структуры полученных конденсатов проведены металлографические исследования полученных покрытий. Микроструктуры образцов из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием в исходном состоянии после испытаний на демпфирующую способность при температуре 400°С и жаростойкость при температуре 400°С на базе 500 ч представлены на рис. 4.

Установлено, что толщина нанесенного демпфирующего покрытия из сплава системы Al–Ni–Y составила в среднем 60 мкм. Показано, что на микроструктурах образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным демпфирующим покрытием после испытаний отсутствует когезионное и адгезионное расслаивание, видно также наличие капельной фазы. Структура титанового сплава ВТ6 – глобулярно-игольчатая [16, 17].

Обсуждение и заключения

Исследована демпфирующая способность образцов из титанового сплава ВТ6 без покрытия и с ионно-плазменным покрытием системы Al–Ni–Y толщиной 60 мкм при виброиспытаниях по первой изгибной форме при резонансе с одинаковой амплитудой возбуждающей силы, соответствующей напряжению 70 МПа в опасном сечении.

Установлено, что демпфирующая способность композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие» в исходном состоянии повышается в среднем на 22% при температуре 20°С и на 40% – при температуре 400°С.

Исследована демпфирующая способность композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие системы Al–Ni–Y» после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С на базе 500 ч, а также после выдержки в камере солевого тумана в течение 3 мес. Показано, что демпфирующая способность композиции после высокотемпературной выдержки при температуре 400°С на базе 500 ч резко снижается на 20% как при температуре 20°С, так и при температуре 400°С. После выдержки в камере солевого тумана в течение 3 мес при температурах 20 и 400°С демпфирующая способность композиции «сплав–покрытие» не выявляется.

Пропитка 5%-ным силикатным раствором поверхности образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием повышает стойкость композиции: демпфирующая способность образцов без пропитки силикатным раствором в течение 3 мес в условиях камеры солевого тумана составила ~17%, а с пропиткой ~40% как при температуре 20°С, так и при температуре 400°С.

Показано, что различия в демпфирующей способности композиции «титановый сплав ВТ6–покрытие» после пропитки силикатным раствором и без нее практически не различимы и составляют при испытаниях при 20°С порядка 30%, а при температуре испытаний 400°С – порядка 57%.

Проведены испытания образцов из титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным покрытием системы Al–Ni–Y на жаростойкость при температуре 400°С на базе 500 ч. Показано, что образцы из титанового сплава ВТ6 с демпфирующим покрытием по удельному изменению массы имеют высокую жаростойкость 0,07 г/м^2 (0,15 г/м^2 – без покрытия), обеспечивая защиту основы от окисления при температуре 400°С на базе 500 ч. Данные испытания показывают высокие защитные свойства покрытия системы Al–Ni–Y на титановом сплаве ВТ6.

Проведены металлографические исследования титанового сплава ВТ6 с ионно-плазменным покрытием после испытаний на демпфирующую способность при температуре 400°С и жаростойкость при температуре 400°С на базе 500 ч. Показано, что толщина покрытия составила в среднем 60 мкм. На микроструктурах образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием после испытаний отсутствует когезионное и адгезионное расслаивание, видно наличие капельной фазы. Структура титанового сплава ВТ6 – глобулярно-игольчатая.

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. 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Способ получения литого трубного катода из сплавов на основе алюминия для ионно-плазменного нанесения покрытий: пат. 2340426 Рос. Федерация; опубл. 16.04.07.
7. 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.
8. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №11. Ст. 03. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 08.12.2016).
9. Установка для нанесения защитных покрытий: пат. 2318078 Рос. Федерация; опубл. 26.06.06.
10. 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.
11. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 18–22.
12. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Горлов Д.С. Повышение свойств упрочняющих ионно-плазменных покрытий при помощи ассистированного осаждения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №7. Ст. 07. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 08.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-7-7.
13. 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.
14. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 71–81.
15. Семенычев В.В., Смирнова Т.Б. Оценка коррозионной стойкости защитных и функциональных покрытий с помощью измерителя скорости коррозии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6. Ст. 12. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 09.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-12-12.
16. Панин П.В., Дзунович 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: 09.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-6-6.
17. Горбовец М.А., Ночовная Н.А. Влияние микроструктуры и фазового состава жаропрочных титановых сплавов на скорость роста трещины усталости // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4. Ст. 03. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения 09.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-3-3.