

УДК 669.017

Д.С. Горлов¹, А.В. Щепилов¹, О.В. Заклякова¹, С.И. Гаджихалилова¹

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОКРЫТИЯ НА ДЕМПФИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-120-129

Исследована возможность снижения амплитуды колебаний свободного конца плоско-го образца при виброиспытаниях по первой изгибной форме за счет нанесения покрытий различных типов на хвостовик образца при закреплении его в технологическом захвате на оснастке для вибродинамического стенда.

Определена зависимость добротности колебательной системы от различных типов покрытий толщиной ~30 мкм, а также исследованы триботехнические характеристики исследуемых покрытий.

Показано, что твердосмазочное покрытие марки ВФП-5 повышает демпфирование, снижая амплитуду свободного конца образца при виброиспытаниях по первой изгибной форме. Покрытие на основе алюминиевого сплава марки ВСДП-28 незначительно снижает амплитуду свободного конца образца, а ионно-плазменные покрытия систем TiN/CrN, Ti-TiN и СДП-2 снижают демпфирующие свойства образцов из титанового сплава ВТ6.

Ключевые слова: ионно-плазменное покрытие, твердосмазочное покрытие, демпфирующая способность, демпфирование в замковом соединении, добротность, триботехнические характеристики, фреттинг, фреттинг-износ.

D.S. Gorlov¹, A.V. Shchepilov¹, O.V. Zaklyakova¹, S.I. Gadzhikhalilova¹

INFLUENCE OF THE COATING TYPE ON THE DAMPING ABILITY

In this research we investigated the possibility of reducing the vibration amplitude of the free end of a flat sample during vibration tests on the first bending form due to the application of different types of surfaces on the sample shank when it is fixed in the technological capture on the equipment for the vibrodynamic stand.

The dependence of the q-factor of the oscillating system on different types of coatings, the thickness of which is ~30 microns, and the tribological characteristics of the coatings are investigated.

It is shown that the solid-lubricant coating VFP-5 increases damping, reducing the amplitude of the free end of the sample during vibration tests on the first bending form. The coating based on the aluminum alloy VSDP-28, does not significantly reduce the amplitude of the free end of the sample and the ion-plasma coatings of the TiN/CrN, Ti-TiN and SDP-2 systems reduce the damping properties of samples from the titanium alloy VT6.

Keywords: ion-plasma coating, solid-lubricant coating, damping ability, blade root damping, q-factor, tribological characteristics, fretting, fretting-wear.

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

В процессе создания газотурбинных двигателей, несмотря на совершенствование известных и внедрение новых технологий, остается актуальной проблема вибропрочности лопаток газотурбинного двигателя [1]. При работе газотурбинного двигателя в лопатках возникают различного рода колебания. Высокая динамическая напряженность лопаток, обусловленная их вибрацией, зачастую приводит к усталостному разрушению. При этом срок службы лопатки напрямую зависит от амплитуды ее колебаний, которая в свою очередь зависит от того, насколько колебания близки к резонансу и насколько велико поглощение энергии колебаний [2].

Источником возбуждения колебаний лопаток является воздействие газа, колебания также могут возникать вследствие деформации ротора. Для гашения колебаний лопаток применяются различные механизмы демпфирования. Различают конструктивное демпфирование – за счет конструктивных особенностей крепления лопаток, например бандажей или демпфирующей проволоки [2, 3]. Существует также демпфирование в самом материале лопаток, которое подробно изучено в работе [4], но уровень рассеяния энергии в материале очень ограничен. Кроме того, в процессе работы газотурбинного двигателя возникает аэродинамическое демпфирование, однако его все равно недостаточно для того, чтобы предотвратить опасные амплитуды колебаний [5, 6].

Исследования демпфирующей способности соединения типа «ласточкин хвост» лопаток компрессора показали [7], что уровень энергетических потерь в исследованных соединениях при плотной посадке хвостовика лопатки в паз диска весьма мал. Он сравним с потерями энергии в материале колеблющегося образца и, понижаясь с ростом растягивающего усилия и температуры, при значениях последних, соответствующих предельным рабочим условиям, практически равен нулю (характеризуется логарифмическим декрементом колебания образца, равным нескольким сотым процента). Некоторое улучшение демпфирующей способности соединения достигается при свободной посадке хвостовика лопатки в паз диска. Однако для предельных рабочих условий силовой нагрузки соединения увеличение декремента колебаний лопатки за счет свободной посадки хвостовика незначительно.

Таким образом, демпфирующую способность компрессорных лопаток с хвостовиком типа «ласточкин хвост» следует оценивать как весьма низкую, обусловленную в основном демпфирующими свойствами материала [2].

Одним из способов снижения переменных напряжений в резонансе является нанесение специальных покрытий [8].

В работе [9] авторы проводили испытания компрессорных лопаток с тонкими покрытиями рабочих поверхностей хвостовиков. В качестве покрытий наносили такие материалы как латунь, серебро, антифрикционный пленкообразующий состав ВАП-2. В результате испытаний установлено, что нанесение покрытий на хвостовики лопаток приводит к некоторому повышению демпфирующей способности. При этом наиболее эффективным оказалось покрытие из состава ВАП-2.

Демпфирующие покрытия возможно наносить с использованием вакуумно-плазменной технологии высоких энергий – дуговым распылением литых трубных катодов с заданным химическим составом, выплавляемых в вакуумных индукционных печах [10–13].

Во ФГУП «ВИАМ» отработаны технологии по изготовлению литых трубных катодов для испарения в ионно-плазменных установках типа МАП с автоматизированной системой управления технологическим процессом, а также технологии нанесения демпфирующих покрытий с заданным химическим составом [14].

Данная статья посвящена исследованиям влияния типа покрытия на демпфирующую способность плоского образца из титанового сплава в технологическом захвате на оснастке для вибродинамического стенда при виброиспытаниях по первой изгибной форме.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

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

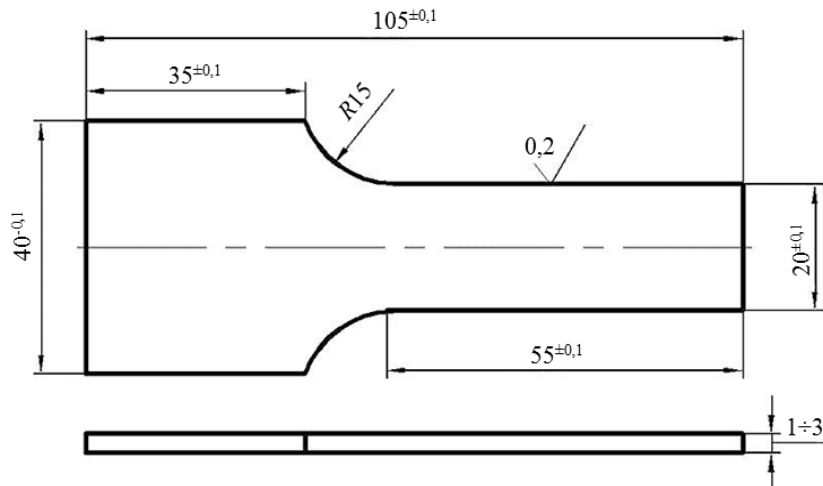


Рис. 1. Образец для виброиспытаний по первой изгибной форме

Для создания на поверхности образцов микрошероховатости с параметром $R_a=0,49$ мкм перед нанесением покрытий образцы обрабатывали в круговом вибраторе фирмы Rosler. В качестве абразивных тел для виброшлифовки использовали пирамидки типа RS 05/10ZS. В промывочную жидкость для удаления продуктов износа добавляли компаунд типа RL-1. [15].

Испытания по определению влияния типа покрытия на снижение амплитуды свободного конца плоского образца проводили на вибродинамическом стенде ETS Solution MPA 403-M124M при температуре 20°C согласно СТО 1-595-2-506–2016.

Испытания проходили в несколько стадий – испытание методом оценки эффективности работы покрытия до и после его нанесения и сравнительное исследование демпфирующей способности материала до и после нанесения покрытия путем определения добротности колебательной системы.

Метод оценки эффективности работы покрытия до и после нанесения предусматривает в начальный период испытаний нахождение резонанса образцов без покрытия – регулируя амплитуду рабочего стола вибростенда и выставляя необходимую амплитуду свободного конца образца, соответствующую заданному напряжению в опасном сечении, фиксировали амплитуду стола.

После нанесения покрытия снова находили резонанс – устанавливая значение амплитуды стола с испытания до нанесения покрытия, определяли амплитуду свободного конца образцов.

В данной работе амплитуда свободного конца плоского образца соответствовала напряжению в опасном сечении, равному 70 МПа.

Амплитуду конца образца без покрытия, соответствующую заданному напряжению в его опасном сечении, определяли расчетным путем с использованием известных соотношений по консольному изгибу образца. Эффективность демпфирования покрытия (Δ) в процентах определяли по зависимости $\Delta = (A_{p1} - A_{p2}) \cdot 100 / A_{p1}$, где A_{p1} – амплитуда свободного конца образца без покрытия при резонансной частоте, мм; A_{p2} – амплитуда свободного конца образца с покрытием при резонансной частоте, мм.

Сравнительное испытание на исследование демпфирующей способности материала до и после нанесения покрытия путем определения добротности колебательной системы предполагает нахождение резонанса образцов без покрытия, фиксирование полученной амплитуды стола вибростенда. После нанесения покрытия необходимо также найти резонансную частоту образца с покрытием и, регулируя амплитуду стола вибростенда, установить значение амплитуды свободного конца образца до нанесения покрытия. При этом необходимо зафиксировать полученную добротность колебательной системы.

Согласно СТО 1-595-2-506–2016, сравнительное испытание плоского образца без покрытия и с покрытием проводят при резонансной частоте по первой изгибной форме колебаний при одинаковой амплитуде рабочего стола вибродинамического стенда, при которой амплитуда свободного конца образца без покрытия соответствует заданному уровню напряжения в опасном сечении, а амплитуда конца образца с покрытием в первом приближении пропорциональна уровню напряжений в том же сечении образца.

При определении параметров демпфирования исследуемых образцов, колебания свободного конца образцов регистрировали при помощи бесконтактного лазерного триангуляционного датчика перемещения Riftek Rf603 с точностью $\pm 0,003$ мм.

Возбуждение колебаний образцов производили с помощью системы управления стендом (контроллер Vibration Research VR8500), определение действующей частоты и амплитуды колебаний проводили по записи сигнала модуля Resonance Search программы VibrationView 6.0.

Одинаковые условия испытаний на стенде обеспечиваются затяжкой образцов прижимным болтом оснастки с моментом 200 Н·м. Указанная величина момента затяжки для оснастки стенда обеспечивает минимум потерь энергии за ее счет.

Внешний вид оснастки с закрепленным образцом на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид оснастки с закрепленным образцом на вибростенде ETS Solution MPA 403-M124M

Для оценки триботехнических свойств образцов из титанового сплава ВТ6 выбран метод «палец-по-пластине», в котором «палец» трется по двигающемуся возвратно-поступательно образцу-пластине.

Испытания на фреттинг-износ проводили, согласно СТО 1-595-2-507–2016, на универсальном трибометре SETR UMT-3MT с использованием привода R33HE350 для возвратно-поступательного движения. Режимы испытания на фреттинг-износ: амплитуда колебаний 300 мкм, температура испытаний 20°C, нагрузка $P=10$ Н, частота относительных колебаний $f=13$ Гц, длительность 10^5 циклов или 128 мин.

В качестве образцов для контроля фреттинг-износа использовали пластины (40×45 мм) из титанового сплава ВТ6 с нанесенными покрытиями и контртела в виде цилиндрических пальчиков из жаропрочного титанового сплава ВТ8 с диаметром 2 мм на торце.

Результаты и обсуждение

Для исследований возможности снижения амплитуды колебаний свободного конца плоского образца при виброиспытаниях по первой изгибной форме на хвостовик образца из титанового сплава ВТ6 наносили следующие варианты покрытий: покрытие, состоящее из чередующихся нанослоев системы TiN/CrN; покрытие, состоящее из чередующихся микрослоев системы Ti–TiN; покрытие на никелевой основе из сплава марки СДП-2; покрытие на алюминиевой основе из сплава марки ВСДП-28, нанесенных на ионно-плазменной установке МАП-3, и антифрикционный пленкообразующий состав марки ВФП-5. Для каждого типа покрытия испытывали по три образца.

Параметры процесса осаждения для каждого из вариантов покрытий, нанесенных на ионно-плазменной установке МАП-3, а также для покрытия марки ВФП-5 устанавливались таким образом, чтобы получить толщину покрытий, равную 30 мкм.

Выбор покрытия марки ВФП-5 обусловлен однотипностью с покрытием ВАП-2, разработанным во ФГУП «ВИАМ», и положительным эффектом по повышению демпфирующей способности, полученным в работе [9]. Покрытие на алюминиевой основе из сплава марки ВСДП-28, легированное никелем и иттрием, по данным исследователей обладает демпфирующей способностью по снижению амплитуды свободного конца образца после нанесения на рабочую часть, имитирующую перо лопатки компрессора. Покрытие, состоящее из чередующихся микрослоев системы Ti–TiN, нанесенное при распылении катода из титанового сплава ВТ1-0 с периодической подачей реакционного газа азота, рекомендуется для нанесения на замки лопаток компрессора для защиты от фреттинг-износа, что оказывается актуально для исследования в данной работе. Покрытие, из чередующихся нанослоев системы TiN/CrN, нанесенное при распылении составного катода, состоящего из сплавов марок ВТ1-0 и ВХ-1, с подачей реакционного газа азота интересно для исследования со стороны своей слоистой структуры, в которой возможно демпфирование благодаря слоистости. Покрытие на никелевой основе из сплава марки СДП-2, легированное хромом, алюминием и иттрием, предназначенное для нанесения жаростойких покрытий, выбрано из-за своей аморфной структуры, получаемой после осаждения в исходном состоянии.

Результаты испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 до и после нанесения покрытий на эффективность демпфирования (снижение амплитуды свободного конца образца) при температуре 20°C при напряжении 70 МПа в опасном сечении представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из титанового сплава ВТ6 до и после нанесения покрытий на эффективность демпфирования (снижение амплитуды свободного конца образца) при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении 70 МПа

Покрытие	Условный номер образца	До нанесения покрытия		После нанесения покрытия		
		Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Частота резонанса, Гц	Амплитуда свободного конца образца, мм	Эффективность, %
TiN/CrN	1	469,4	1,45	478,4	2,07	-42,7
	2	463,9	1,45	470,1	2,05	-41,4
	3	468,1	1,45	473,6	1,99	-37,2
ВФП-5	4	469,3	1,45	473,4	1,12	22,7
	5	477,3	1,45	475,1	1,02	29,6
	6	470,8	1,45	471,8	1,07	26,2
Ti-TiN	7	472,4	1,45	480,3	1,91	-31,7
	8	469,1	1,45	477,6	2,06	-42
	9	474,6	1,45	482,4	1,88	-29
СДП-2	10	466,5	1,45	478,3	1,75	-20,6
	11	467,2	1,45	475	1,77	-22
	12	472,8	1,45	480,5	1,61	-11
ВСДП-28	13	469,2	1,45	476,4	1,27	12,4
	14	469,4	1,45	477,4	1,35	6,9
	15	468,4	1,45	480,2	1,37	5,5

Из представленных данных следует, что нанесение покрытий на поверхности образцов, имитирующих хвостовик лопатки, позволяет несколько повысить демпфирующую способность. При выбранных режимах испытаний образцов с покрытиями наилучшим образом показало себя твердосмазочное покрытие ВФП-5, снизив амплитуду свободного конца образцов на 22–29%. Некоторое снижение амплитуды также наблюдается на образцах с ионно-плазменным покрытием ВСДП-28: 5–12%. Однако на пластинах с ионно-плазменными покрытиями TiN/CrN, Ti-TiN и СДП-2 наблюдается увеличение амплитуды в резонансе в среднем: для TiN/CrN – на 40%, для Ti-TiN – на 34%, для СДП-2 – на 18%.

Гистограммы влияния изменения амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 в резонансе до и после нанесения покрытий на эффективность демпфирования при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении 70 МПа представлены на рис. 3.

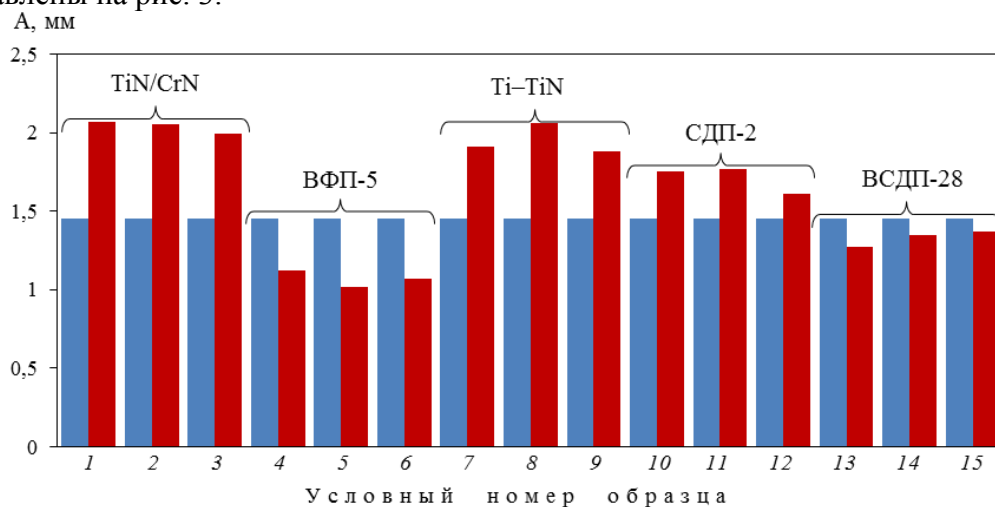


Рис. 3. Гистограммы влияния изменения амплитуды колебаний свободного конца образцов из титанового сплава ВТ6 в резонансе до (■) и после нанесения покрытий (■) на эффективность демпфирования при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении 70 МПа

Данный эксперимент наглядно показывает изменение амплитуды свободного конца образца в зависимости от типа нанесенного покрытия при одинаковых параметрах испытаний.

Объяснением полученных данных могут служить материалы и структура исследуемых покрытий. Для покрытия марки ВФП-5 снижение амплитуды в данном случае, по-видимому, связано с потерей энергии, передающейся от вибродинамического стенда к образцу за счет взаимного проскальзывания на контактных поверхностях в зажиме оснастки из-за наполнителя из дисульфида молибдена и графита. Для ионно-плазменного покрытия на алюминиевой основе из сплава марки ВСДП-28 снижение амплитуды, вероятно, связано с пластическим деформированием покрытия из-за основы.

Значительное увеличение амплитуды свободного конца на образцах с ионно-плазменными покрытиями систем TiN/CrN, Ti-TiN и СДП-2, вероятно, связано с контактным схватыванием в зонах взаимодействия покрытия и зажима оснастки, исключаяющим смятие покрытия из-за высокой твердости (для покрытия системы TiN/CrN) и малых диссипативных свойств при внутреннем трении в данных типах покрытий. Покрытие из сплава марки СДП-2 относительно покрытий систем TiN/CrN и Ti-TiN более пластичное, однако также показало повышение амплитуды свободного конца образца.

Проведены также испытания образцов на определение добротности колебательной системы в зависимости от типа нанесенного покрытия. Результаты испытаний образцов на определение добротности колебательной системы до и после нанесения покрытий при температуре 20°C при напряжении в опасном сечении 70 МПа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на определение добротности колебательной системы до и после нанесения покрытий при температуре 20°C и напряжении в опасном сечении 70 МПа

Покрытие	Условный номер образца	До нанесения покрытия		После нанесения покрытия	
		Частота резонанса, Гц	Добротность Q	Частота резонанса, Гц	Добротность Q
TiN/CrN	1	469,4	915,6	478,3	1536,9
	2	463,9	768,3	470	1406,8
	3	468,1	935,1	473,9	1433,2
ВФП-5	4	469,3	1076,8	472,8	606
	5	477,3	981,9	475	843,6
	6	470,8	1086,2	471,4	894,4
Ti-TiN	7	472,4	920,3	480,2	1623,8
	8	469,1	875,3	477,4	1910,9
	9	474,6	947,5	482,3	1505,7
СДП-2	10	466,5	1073	478	3508,1
	11	467,2	922,1	474,7	3487
	12	472,8	988,4	480,3	3256
ВСДП-28	13	469,2	1042,2	475,6	822,3
	14	469,4	944,7	475,3	903
	15	468,4	951,7	480	873

Как видно из данных табл. 2, наименьшие значения добротности показали образцы с антифрикционным покрытием ВФП-5. Снижение добротности также наблюдается на образцах с покрытием ВСДП-28. На образцах с покрытиями систем TiN/CrN, Ti-TiN и СДП-2 значение добротности увеличивается в сравнении с образцами в исходном состоянии без покрытий.

Гистограммы изменения значения добротности колебательной системы в резонансе до и после нанесения покрытий при температуре 20°C при напряжении в опасном сечении 70 МПа представлены на рис. 4.

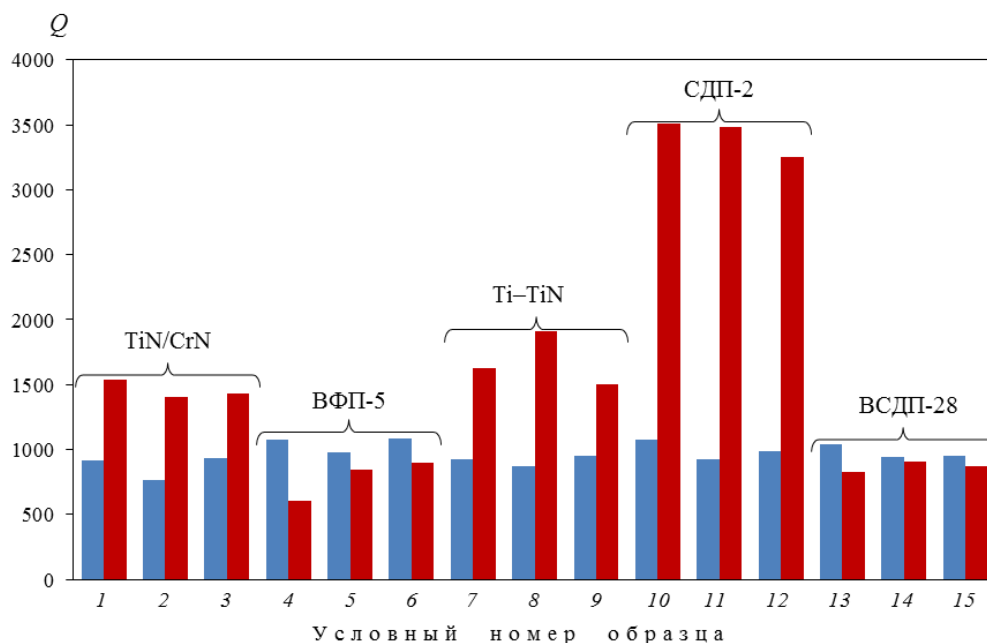


Рис. 4. Изменение значения добротности колебательной системы в резонансе до (■) и после нанесения покрытий (■) при температуре 20°C при напряжении в опасном сечении 70 МПа

Испытания на определение добротности колебательной системы в зависимости от типа покрытий также подтвердили преимущество твердосмазочного покрытия марки ВФП-5 в рассеивании подводимой энергии за счет своих триботехнических свойств по сравнению с рассматриваемыми ионно-плазменными покрытиями. Низкая добротность, показанная покрытием из сплава ВСДП-28, возможно связана с алюминиевой основой, которая рассеивает подводимую энергию за счет своей теплопроводности. Относительно низкие значения добротности для образцов с покрытиями систем TiN/CrN и Ti-TiN, вероятно, связаны со слоистой структурой данных типов покрытий. Самую высокую добротность, т. е. самое низкое рассеивание энергии, показало покрытие из сплава СДП-2, вероятно, из-за своей аморфной структуры, полученной при конденсации.

В процессе испытаний на демпфирующую способность на вибростенде в месте контакта образца с зажимной пластиной в технологическом захвате возникают микроперемещения.

Для моделирования условий, возникающих в месте контакта захвата с материалом покрытия образца, а также для определения триботехнических свойств проведены испытания на фреттинг-износ [15, 16].

Результаты испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с исследуемыми покрытиями приведены далее.

Установлено, что при испытаниях на фреттинг-износ при температуре 20°C самое минимальное значение коэффициента трения (0,3) показал образец из титанового сплава ВТ6 с антифрикционным пленкообразующим составом марки ВФП-5 при взаимодействии с контртелом из жаропрочного титанового сплава ВТ8. Далее следуют два варианта покрытий систем TiN/CrN и Ti-TiN, значения коэффициента трения у данных образцов 0,4. Далее с возрастающим значением коэффициента трения (0,5) располагается

покрытие из сплава на никелевой основе марки СДП-2. Самый большой коэффициент трения, равный 0,7, показал вариант покрытия из сплава на алюминиевой основе марки ВСДП-28.

Одновременно с измерением коэффициента трения измеряли суммарный линейный износ в зоне контакта контртела и образца с покрытием.

Самый низкий суммарный линейный износ (3 мкм) при испытаниях при температуре 20°C показал образец из титанового сплава ВТ6 с покрытием ВСДП-28. Далее с возрастающим значением суммарного линейного износа (4 мкм) располагается покрытие системы TiN/CrN и антифрикционный пленкообразующий состав ВФП-5. Образцы из титанового сплава ВТ6 с покрытиями систем Ti–TiN и СДП-2 показали суммарный линейный износ 8 мкм в паре с контртелом из жаропрочного титанового сплава ВТ8.

Заключения

Исследована демпфирующая способность композиции титанового сплава ВТ6 с различными типами покрытий, нанесенными на хвостовую часть образцов.

Показано, что за счет нанесения покрытий на хвостовую часть возможно улучшить демпфирующие характеристики замковых соединений компрессорных лопаток. Однако не все типы покрытий дают положительный эффект. Из рассмотренных типов покрытий наиболее эффективным по повышению демпфирующей способности и имеющим самую низкую добротность колебательной системы является антифрикционное покрытие марки ВФП-5 на основе дисульфида молибдена и графита, нанесение которого позволяет снизить амплитуду колебаний свободного конца образца на 22–29%. Незначительный эффект также показало покрытие на основе алюминиевого сплава марки ВСДП-28, нанесенное ионно-плазменным способом, снижающее амплитуду колебаний свободного конца образца на 5–12%. При нанесении на хвостовики образцов покрытий систем TiN/CrN, Ti–TiN и сплава на никелевой основе марки СДП-2 наблюдается увеличение амплитуды колебаний свободного конца образцов.

Результаты испытания по определению параметра добротности подтверждают результаты, полученные при испытаниях на эффективность демпфирования. Так, наименьшее значение добротности показало покрытие марки ВФП-5.

Выявлено, что самый низкий коэффициент трения показал образец из титанового сплава ВТ6 с антифрикционным пленкообразующим покрытием марки ВФП-5 при взаимодействии с контртелом из жаропрочного титанового сплава ВТ8, который равен 0,3, а самый высокий, равный 0,7, – показал вариант покрытия на основе алюминиевого сплава марки ВСДП-28.

Наименьший суммарный линейный износ величиной 3 мкм при испытаниях при температуре 20°C показали образцы из титанового сплава ВТ6 с покрытием на основе алюминиевого сплава марки ВСДП-28. Далее с возрастающим значением суммарного линейного износа (4 мкм) располагается покрытие системы TiN/CrN и антифрикционный пленкообразующий состав марки ВФП-5.

Максимальные значения суммарного линейного износа (8 мкм) показали образцы из титанового сплава ВТ6 с покрытиями системы Ti–TiN и сплава на никелевой основе марки СДП-2.

Исходя из полученных результатов, оптимальным комплексом свойств для снижения амплитуды колебаний свободного конца образцов с пониженной добротностью колебательной системы обладают твердосмазочное покрытие марки ВФП-5, нанесенное шликерным способом, и покрытие из сплава на алюминиевой основе марки ВСДП-28, нанесенное ионно-плазменным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ножницкий Ю.А. Разработка ключевых (критических) технологий для создания нового поколения газотурбинных двигателей // Новые технологические процессы и надежность ГТД: науч.-технич. сб. 2000. Вып. 1: Блиски и блинги турбомашин. С. 5–34.
2. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
3. Адаменко А.Я. Демпфирующая способность парных рабочих лопаток газотурбинных двигателей в условиях воздействия центробежных сил и температуры: дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1984. 238 с.
4. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справ. Киев: Наукова думка, 1971. 376 с.
5. Писаренко Г.С., Каминер А.А. Аэродинамическое демпфирование колебаний лопаток турбомашин. Киев: Наукова думка, 1991. 302 с.
6. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 301 с.
7. Матвеев В.В., Яковлев А.П., Балюк А.Д., Ржавин Л.Н. Исследование демпфирующих свойств замкового соединения компрессорных лопаток при повышенной температуре // Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Киев: Наукова думка, 1967. Вып. 4. С. 396–401.
8. Оспенникова О.Г., Мубояджян С.А., Доронин О.Н., Горлов Д.С. Исследование демпфирующей способности плоских образцов из титанового сплава ВТ6 с покрытием // Металлы. 2018. №2. С. 11–20.
9. Токарь И.Г., Зиньковский А.П., Матвеев В.В. К вопросу о возможностях повышения демпфирующей способности рабочих лопаток современных газотурбинных двигателей // Проблемы прочности. 2003. №4. С. 58–68.
10. Горлов Д.С., Щепилов А.В. Исследование демпфирующей способности композиции «сплав–покрытие» после испытаний на жаростойкость и коррозионную стойкость // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4 (49). С. 62–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-62-69.
11. 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.
12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
13. 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.
14. 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.
15. Сибилева С.В., Каримова С.А. Обработка поверхности титановых сплавов с целью обеспечения адгезионных свойств // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 25–35.
16. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.