

УДК 620.1

*Д.С. Горлов<sup>1</sup>, В.И. Скрипак<sup>1</sup>, С.А. Мубояджян<sup>1</sup>, Л.П. Егорова<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО, ШЛИКЕРНОГО И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-7-7

*Приведены данные испытаний на фреттинг-износ антифреттинговых покрытий, разработанных в ВИАМ за последнее время. Испытывали твердосмазочное покрытие ВФП-5, шликерное покрытие ВПМСА и микрослойное покрытие системы Ti–TiN, полученное по ионно-плазменной технологии.*

*Для исследования триботехнических свойств был выбран метод «палец-по-пластине». По результатам испытаний оценивали кривые износа, графики коэффициента трения и сопротивления, внешний вид пятен износа.*

*Работа была 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:** *фреттинг-износ, антифреттинговое покрытие, твердосмазочное покрытие, шликерная технология, ионно-плазменная технология, триботехнические свойства, метод «палец-по-пластине».*

*This article provides test data on fretting-wear antifretting coatings developed at VIAM for the last time. Experienced hard lubricant coating VFP-5, slip VPMSA and microcline coating system Ti–TiN, obtained by ion-plasma technology.*

*For the research of the tribological properties was chosen as the method of «finger-plate». According to test results was estimated wear curves, graphs of the coefficient of friction and resistance, the appearance of spots of wear.*

*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:** *fretting wear, antifretting coating, hard lubricant coating, slip technology, ion-plasma technology, tribological properties, method «finger-plate».*

---

<sup>1</sup>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**

В современном мире все большее внимание уделяется проблеме продления ресурса техники – в частности, увеличению срока службы, повышению надежности и долговечности машин. Одним из актуальных вопросов является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различного рода защитные и восстанавливающие покрытия, которые позволяют

продлить ресурс деталей авиационной техники, а также благодаря использованию недорогих компонентов повысить ее рентабельность [2, 3].

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинной установки (ГТУ), а также паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных динамических и вибрационных нагрузок. Под воздействием микроперемещений условно неподвижных сопряжений (детали крепежа, прессовые соединения) возникает особый вид износа – фреттинг. Фреттинг совмещает несколько процессов разрушения материала поверхности: абразивное, коррозионное и усталостное изнашивания. В различных условиях каждый из них может стать основным процессом, определяющим вид и характер износа [4–6].

Когда трибологические пары испытывают относительное колебательное перемещение менее чем 10 мкм, массопереноса не происходит, т. е. все точки контакта испытывают относительное проскальзывание по замкнутому циклу. Упругое поведение реальных контактов может обеспечивать это движение, и фреттинг-износ не будет проявляться.

В настоящее время для защиты от фреттинга в авиационной промышленности используют твердосмазочное покрытие ЦВСП-3С и покрытие ВФП-5, разработанное в ВИАМ, с рабочей температурой до 250°C [7]. С целью исследования свойств трибологической пары из титанового сплава ВТ6 и нанесенных на него покрытий в контакте со сплавом ВТ8 проведены испытания на трибометре для изучения свойств данных антифреттинговых покрытий в условиях фреттинг-износа.

#### Материалы и методы

Испытания на фреттинг-износ проводили на универсальном трибометре SETR UMT-3MT с использованием привода R33HE350 для возвратно-поступательного движения согласно СТО 1-595-2-507–2016. Режимы испытания на фреттинг-износ: нагрузка 10 Н, частота относительных колебаний 13 Гц, амплитуда колебаний 300 мкм, температуры испытаний 20 и 350°C, длительность  $10^5$  циклов или 128 мин.

Для исследования триботехнических свойств выбран метод «пальчик-по-пластине». На рис. 1 представлена схема проведения испытания. На пальчик, находящийся в контакте с пластиной, прикладывается нормальная сила, что создает контактное давление между испытываемыми образцами. В качестве образцов для испытаний на фреттинг-износ использовали пластины (25×43 мм) из титанового сплава ВТ6 с нанесенными покрытиями и без них, а контртело представляло собой цилиндрические пальчики  $\varnothing 2$  мм из титанового сплава ВТ8.

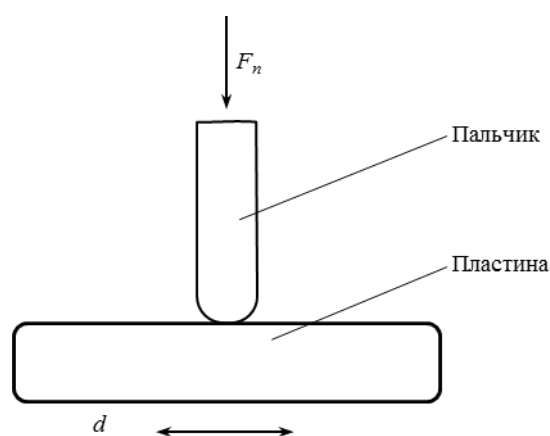


Рис. 1. Схема проведения испытания «пальчик-по-пластине»:  $F_n$  – прикладываемая нормальная нагрузка;  $d$  – относительное смещение образца (амплитуда колебаний)

Покрытия на пластины из титанового сплава ВТ6 наносили согласно разработанным технологиям:

- твердосмазочное покрытие ВФП-5 толщиной 25–30 мкм состоит из матрицы из высокотемпературного лака и твердой смазки из порошка дисульфида молибдена и углерода;
- шликерное покрытие ВПМСА толщиной 30–40 мкм состоит из матрицы на основе алюмохромфосфатного связующего с наполнителем из дисилицида молибдена;
- микрослойное ионно-плазменное покрытие системы Ti–TiN толщиной 5–7 мкм состоит из чередующихся слоев титана и нитрида титана (всего 8 слоев); слоистость покрытия достигалась при помощи периодической подачи реакционного газа  $N_2$  в камеру ионно-плазменной установки МАП-3.

### Результаты

Испытания на фреттинг-износ проводили при температуре 20 и 350°C. Известно, что согласно паспортным характеристикам: твердосмазочное покрытие ВФП-5 работоспособно при температуре 250°C; шликерное покрытие ВПМСА – при температуре 650°C; микрослойное ионно-плазменное покрытие системы Ti–TiN – при температуре 400°C.

Основная цель данного исследования – изучение триботехнических свойств различных покрытий, разработанных для снижения фреттинг-износа, по единой методике при температуре 350°C для выбранных типов покрытий и исходя из технических характеристик возвратно-поступательного привода R33HE350.

Основополагающим показателем при оценке взаимодействия двух тел является суммарный линейный износ. Результаты определения суммарного линейного износа при испытаниях при температурах 20 и 350°C на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них представлены на рис. 2.

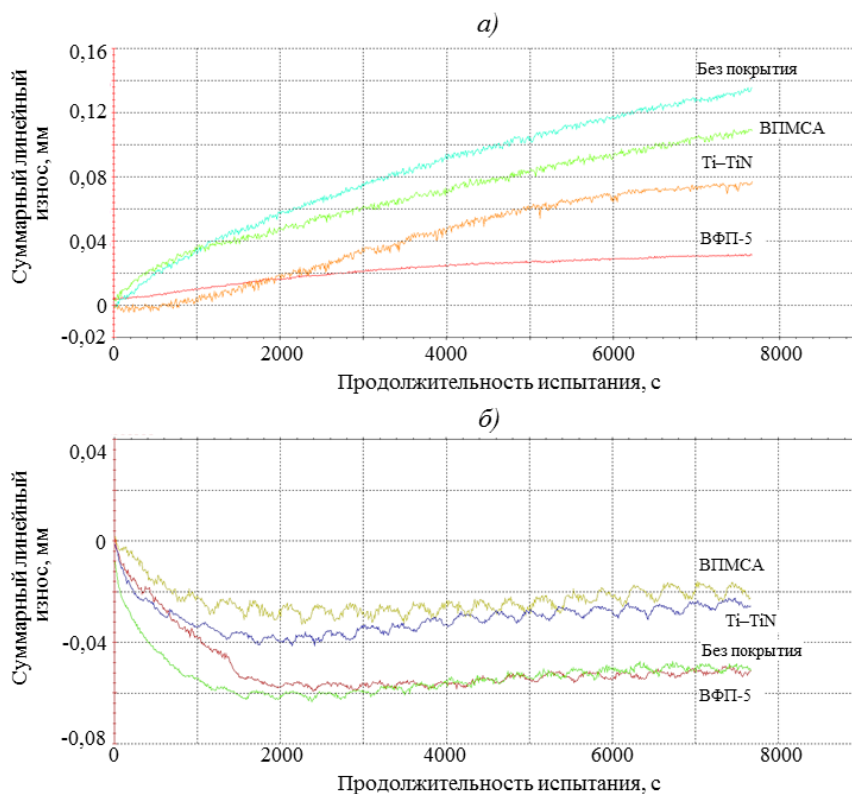


Рис. 2. Суммарный линейный износ при испытаниях при температурах 20 (а) и 350°C (б) на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них

Установлено, что самый низкий суммарный линейный износ при температуре 20°C показало покрытие ВФП-5 (толщина 30 мкм), далее покрытие системы Ti–TiN (толщина 78 мкм), а затем покрытие ВПМСА (толщина 110 мкм), самый высокий износ предсказуемо показал образец без покрытия (толщина 130 мкм). Кривые износа выглядят как плавные поднимающиеся линии, что показывает увеличение износа в течение времени испытания. Заметно влияние твердой смазки (дисульфида молибдена с графитом) в покрытии ВФП-5 – произошло значительное снижение износа.

Испытания также показали, что при температуре 350°C меньший суммарный линейный износ имеют покрытия ВПМСА и Ti–TiN; у покрытия ВФП-5 – износ на уровне титанового сплава без покрытия. Полученные результаты подтверждают данные по рабочей температуре исследуемого покрытия ВФП-5.

Для косвенной оценки работоспособности и ресурса антифреттинговых покрытий использовали опцию трибометра по определению электрического сопротивления при испытаниях на фреттинг-износ. Оценка ресурса антифреттингового покрытия заключается в средних показаниях электрического сопротивления после испытаний, которое не должно снижаться >50% от номинального значения в 1000 Ом. Этот критерий оценки хорошо подходит для покрытий, являющихся диэлектриками, – таких как твердосмазочное покрытие ВФП-5.

На рис. 3 представлены зависимости электрического сопротивления от продолжительности испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°C.

На графиках при 20°C отчетливо видно изменение электрического сопротивления от продолжительности испытания. Для покрытия ВФП-5 электрическое сопротивление не изменяется и соответствует 1000 Ом на протяжении всего испытания, что подтверждает показатель по минимальному износу и ресурсу данного покрытия.

При температуре 350°C графики электрического сопротивления значительно меняются относительно показаний при 20°C. Видно, что значения электрического сопротивления стремятся к номинальному значению в 1000 Ом. Это может свидетельствовать об образовании защитных оксидных пленок как на контртелах, так и на покрытиях.

В табл. 1 представлены средние значения электрического сопротивления по результатам испытаний на фреттинг-износ образцов титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°C.

Таблица 1

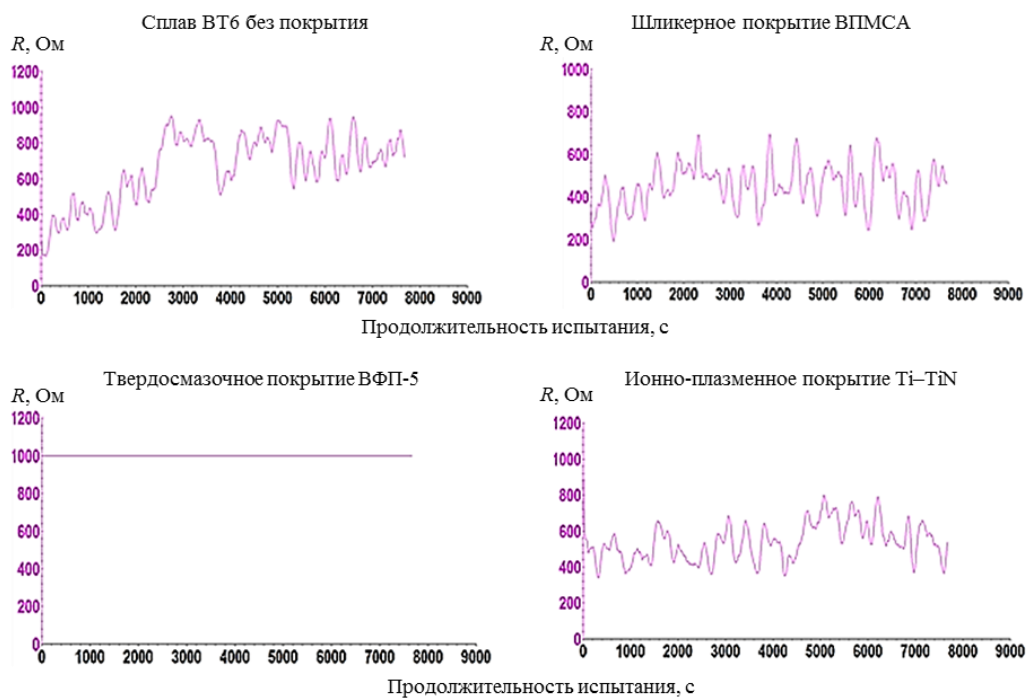
**Средние значения электрического сопротивления  
по результатам испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6  
с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°C**

Покрытие	Электрическое сопротивление, Ом, при температуре, °C	
	20	350
Без покрытия	636	902
ВПМСА	450	953
ВФП-5	1000	899
Ti–TiN	540	997

Показано, что среднее значение электрического сопротивления покрытия ВФП-5 после проведенных испытаний изменяется незначительно относительно номинального значения сопротивления (1000 Ом) по сравнению с другими вариантами покрытий. Видно, как влияет температура испытаний на образование защитных оксидных пленок на контртелах и на покрытиях.

Для подтверждения полученных результатов требуются детальные исследования как продуктов износа, так и защитных оксидных пленок на испытуемых образцах.

## Температура испытания 20°C



## Температура испытания 350°C

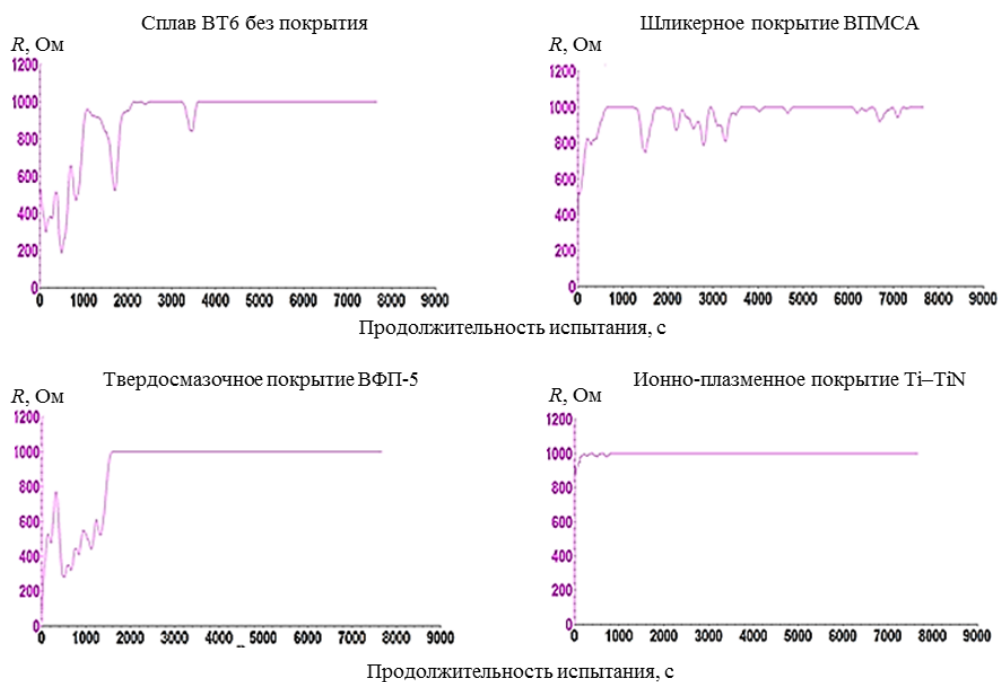
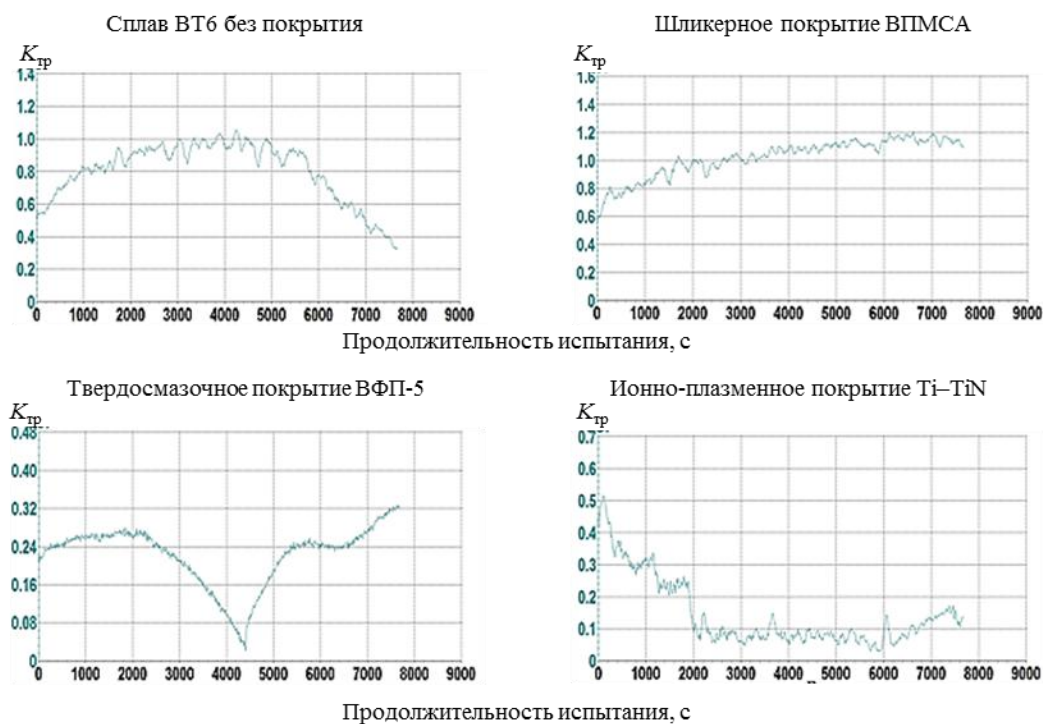


Рис. 3. Зависимости электрического сопротивления ( $R$ ) от продолжительности испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при различных температурах

Помимо суммарного линейного износа важным свойством при определении износостойкости покрытий является коэффициент трения. На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов трения от продолжительности испытания на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°C.

## Температура испытания 20°C



## Температура испытания 350°C

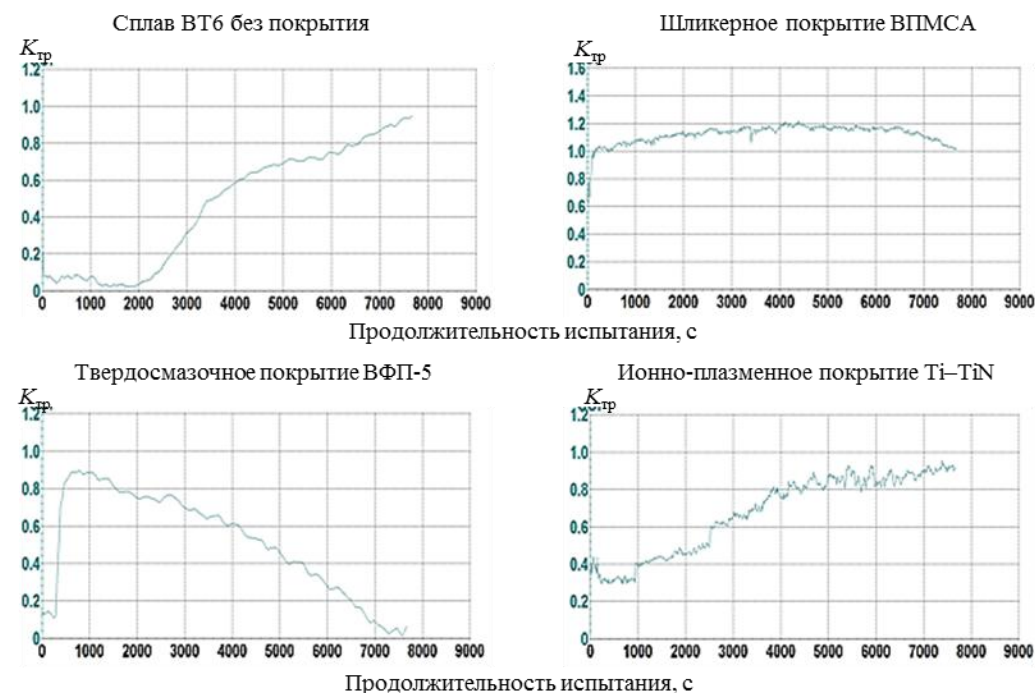


Рис. 4. Зависимости коэффициентов трения ( $K_{тр}$ ) от продолжительности испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при различных температурах

В табл. 2 приведены средние значения коэффициентов трения после проведенных испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°C.

Таблица 2

**Средние значения коэффициентов трения  
после проведенных испытаний на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6  
с антифреттинговыми покрытиями и без них при температурах 20 и 350°С**

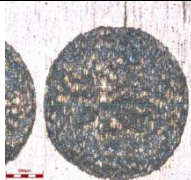


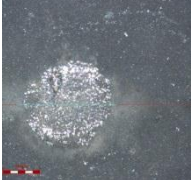
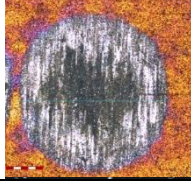
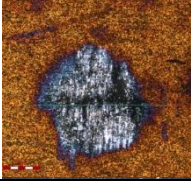
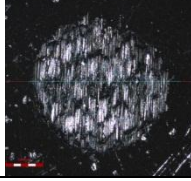
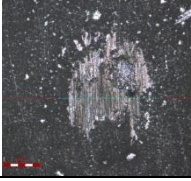
Покрытие	Коэффициент трения при температуре, °С	
	20	350
Без покрытия	0,8	0,46
ВПСМА	1,02	1,12
ВФП-5	0,22	0,14
Ti-TiN	0,7	0,67

Установлено, что наименьшее среднее значение коэффициента трения при температурах 20 и 350°С показало твердосмазочное покрытие ВФП-5; самое высокое – шликерное покрытие ВПСМА, что можно объяснить конструктивными особенностями данного типа покрытия – в состав входят частицы дисилицида молибдена произвольной формы. На образце из титанового сплава ВТ6 без покрытия при увеличении температуры значение коэффициента трения снижается в ~2 раза. Вероятно, это связано с образованием защитной оксидной пленки с такими значениями коэффициента трения, что подтверждается данными по изменению электрического сопротивления при испытаниях. Значение коэффициента трения для ионно-плазменного покрытия Ti-TiN как при температуре 20°С, так и при 350°С, практически не меняется и остается в пределах  $0,6 \div 0,7$ .

Для наглядности исследовали места взаимодействия контртела с образцами с антифреттинговыми покрытиями и без них. Для этого при увеличении  $\times 108$  сняли следы контактов после испытаний на фреттинг-износ. Фотографии следов контактов контртела с образцами с антифреттинговыми покрытиями и без них после испытаний при температурах 20 и 350°С представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Следы контактов контртела и образцов с антифреттинговыми покрытиями  
и без них после испытаний при различных температурах**

Покрытие	Следы износа после испытаний на фреттинг-износ при температуре, °С	
	20	350
Без покрытия		
ВПСМА		
Ti-TiN		
ВФП-5		

На фотографиях следов износа при температурах 20 и 350°C на всех образцах из титанового сплава ВТ6 с антифреттинговыми покрытиями и без них видны следы отблесков металлического цвета, характерные для оксидных пленок, что подтверждается данными по электрическому сопротивлению.

### Обсуждение и заключения

Приведены данные испытаний на фреттинг-износ при температурах 20 и 350°C антифреттинговых покрытий, разработанных в ВИАМ за последнее время.

Испытывали твердосмазочное покрытие ВФП-5, шликерное покрытие ВПМСА и микрослойное покрытие системы Ti–TiN, полученное по ионно-плазменной технологии. По результатам испытаний оценивали кривые износа, графики коэффициента трения и электрического сопротивления, а также внешний вид пятен износа.

Наименьший износ показало твердосмазочное покрытие ВФП-5 при 20°C, а при 350°C – шликерное покрытие ВПМСА. Наименьший коэффициент трения показало покрытие ВФП-5 при комнатной и повышенной температурах. Показано положительное влияние твердой смазки (дисульфида молибдена и графита) в условиях фреттинг-износа, однако данное покрытие имеет ограничение по температуре применения.

Шликерное покрытие ВПМСА имеет более высокую рабочую температуру и может нести бóльшую контактную нагрузку из-за наличия наполнителя из дисилицида молибдена. Высокие значения коэффициента трения у данного покрытия могут быть восприняты как нежелательные для некоторых случаев применения. В настоящее время покрытие ВПМСА успешно применяется на замках лопаток компрессора ГТД для защиты от фреттинга.

Микрослойное покрытие системы Ti–TiN показало средние значения суммарного линейного износа, коэффициента трения в условиях фреттинг-износа. Из всех испытанных типов покрытий данное покрытие имеет наименьшую толщину 7 мкм. Ионно-плазменный метод нанесения этого покрытия обеспечивает высокую воспроизводимость (95–99%) по параметрам покрытия.

Определение модуля сопротивления при испытаниях на фреттинг-износ позволяет выявлять образование защитных оксидных пленок, исследование которых необходимо учитывать при разработке антифреттинговых покрытий.

Испытания на трибометре при завышенной амплитуде 300 мкм с частотой 13 Гц и удельном давлении 68 МПа позволяет оценить величины суммарного линейного износа, электрического сопротивления и коэффициента трения контактной пары. Оценить работоспособность антифреттингового покрытия на основании полученных результатов не представляется возможным. Для оценки работоспособности антифреттингового покрытия необходимо дополнительно провести испытания на фреттинг-усталость.

### 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. 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. №8. С. 71–81.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. С. 531–534.

5. Виноградов С.С., Теркулова Ю.А., Курдюкова Е.А., Никифоров А.А. Износостойкое, антифрикционное и фреттингостойкое покрытие на основе Ni–B // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2.
6. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
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. Fouvry S., Duo P., Perruchaut Ph. A quantitative approach of Ti–6Al–4V fretting damage: friction, wear and crack nucleation // Wear. 2004. Vol. 257. No. 9–10. P. 916–929.
9. ASTM Standard G133-05. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. 2010.
10. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2016).
11. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2016).
12. Галоян А.Г., Мубояджян С.А., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Коррозионностойкое покрытие для защиты деталей ГТД из высокопрочных конструкционных мартенситостареющих сталей на рабочие температуры до 450°C // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №6. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-3-3.
13. Уманский А.П., Пугачевская Е.П., Химко А.Н. Разработка технологии нанесения новых износостойких композиционных покрытий для упрочнения деталей авиационных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. №9. С. 38–44.
14. 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.
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.