

УДК 669.058

К.С. СЕЛИВАНОВ, Р.Ф. ГАЛИАКБАРОВ

*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия***ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГ-СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
КОМПЛЕКСНОЙ ВАКУУМНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Рассматривается возможность повышения фреттинг-стойкости деталей из стальных и титановых сплавов комбинированной вакуумно-плазменной обработкой, совмещающей ионную имплантацию и нанесение многослойного покрытия системы Ti-TiN. Приводятся результаты исследования микрогеометрии поверхности образцов с различной толщиной покрытия после испытания на фреттинг. Полученные результаты подтверждают, что проведенная обработка надежно защищает контактные поверхности от фреттинг-износа. Сколов, отслоений или следов окисления поверхности не возникает, износ покрытия после принятого количества циклов $2 \cdot 10^5$ не превышает величины шероховатости. При этом значительное снижение фреттинг-износа образцов из титанового сплава (до 8,5 раз) по сравнению с исходным, неупрочненным состоянием, объясняется блокированием адгезионного взаимодействия поверхностей основного материала и предотвращения их «схватывания».

Ключевые слова: изнашивание, фреттинг, упрочнение, вакуумная обработка, плазменные покрытия.

Введение

Рабочие лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) и газотурбинной установки (ГТУ), а также паровых турбин в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям значительных динамических и вибрационных наг. Под воздействием микроперемещений условно неподвижных сопряжений (детали крепежа, прессовые соединения) возникает особый вид износа, известный как фреттинг. Фреттинг совмещает в себе несколько процессов разрушения материала поверхности: абразивное изнашивание, коррозионное и усталостное. В различных условиях каждый из них может стать ведущим, определяющим вид и характер износа.

В силу комплексного проявления фреттинга в настоящее время еще не разработано универсальных способов защиты от этого вида износа. Наиболее перспективным направлением повышения фреттинг-стойкости является применение различных технологических обработок, в частности ионно-имплантационных и вакуумно-плазменных методов упрочнения [1,2].

Способ комбинированной обработка, включающей ионную отчистку в вакууме, последующую имплантацией ионов азота и нанесение многослойного вакуумно-плазменного покрытия нитрида титана (Ti-TiN) эффективно препятствует развитию поверхностных дефектов при фреттинг-износе и обеспечивает усталостную прочность на уровне основного материала [3].

Одной из задач при разработке технологии защиты от фреттинга бандажных полок лопаток ком-

прессора ГТД и паровых турбин ставилась оптимизация режимов вакуумно-плазменного нанесения многослойного нитрида титана системы Ti-TiN с различной толщиной и количеством промежуточных слоев.

Методика и результаты эксперимента

Испытания на фреттинг-износ [3] проводили на образцах сопряжения «вал-втулка» из титанового сплава ВТ6 и стали ЭИ961. Упрочняющая обработка включала механическое полирование с последующей ионной отчисткой в вакууме, ионную имплантацию N^+ и осаждение методом КИБ многослойного покрытия системы Ti-(Ti-TiN) с различным количеством промежуточных слоев. Исследовали несколько вариантов толщин покрытий: $h = 15^{+3}$ мкм; $h = 25^{+3}$ мкм; $h = 40^{+5}$ мкм.

Режимы испытания на фреттинг-стойкость, назначались, как и выше описанных экспериментах, из условия контакта антивибрационных и бандажных полок рабочих лопаток турбомашин: удельное давление $p = 10 \pm 1$ МПа; частота относительных колебаний f в диапазоне от 100 до 130 Гц; величина проскальзывания $2Am$ от 100 до 125 мкм.

После испытания на фреттинг-коррозию были проведены: металлографическое исследование поверхности образцов, исследование дефектности поверхности образцов по изменению ее шероховатости и исследование разупрочнения поверхности образцов по критерию микротвердости.

Поверхность в месте пятна контакта была исследована на световом микроскопе НЕОРНОТ-21М

при увеличении $\times 150$. Результаты исследования приведены на рис. 1.

В ходе испытания на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 и ЭИ961 после полирования и нанесения вакуумно-плазменного покрытия нитрида титана была сформирована дефектная поверхность в виде светлых натертостей и темных пятен окислов. С увеличением толщины покрытия интенсивность разрушения уменьшалась. На поверх-

ности трения сколов, трещин, следов растрескивания или схватывания не обнаружено.

Исследование шероховатости проводилось путем снятия профилограмм с поверхности образцов до и после фреттинга по общепринятой методике на профилографе-профилометре НЕММЕЛВЕРК Т-500 с автоматическим расчетом основных параметров и записью данных на ПЭВМ. Результаты исследования приведены в табл. 1, 2.

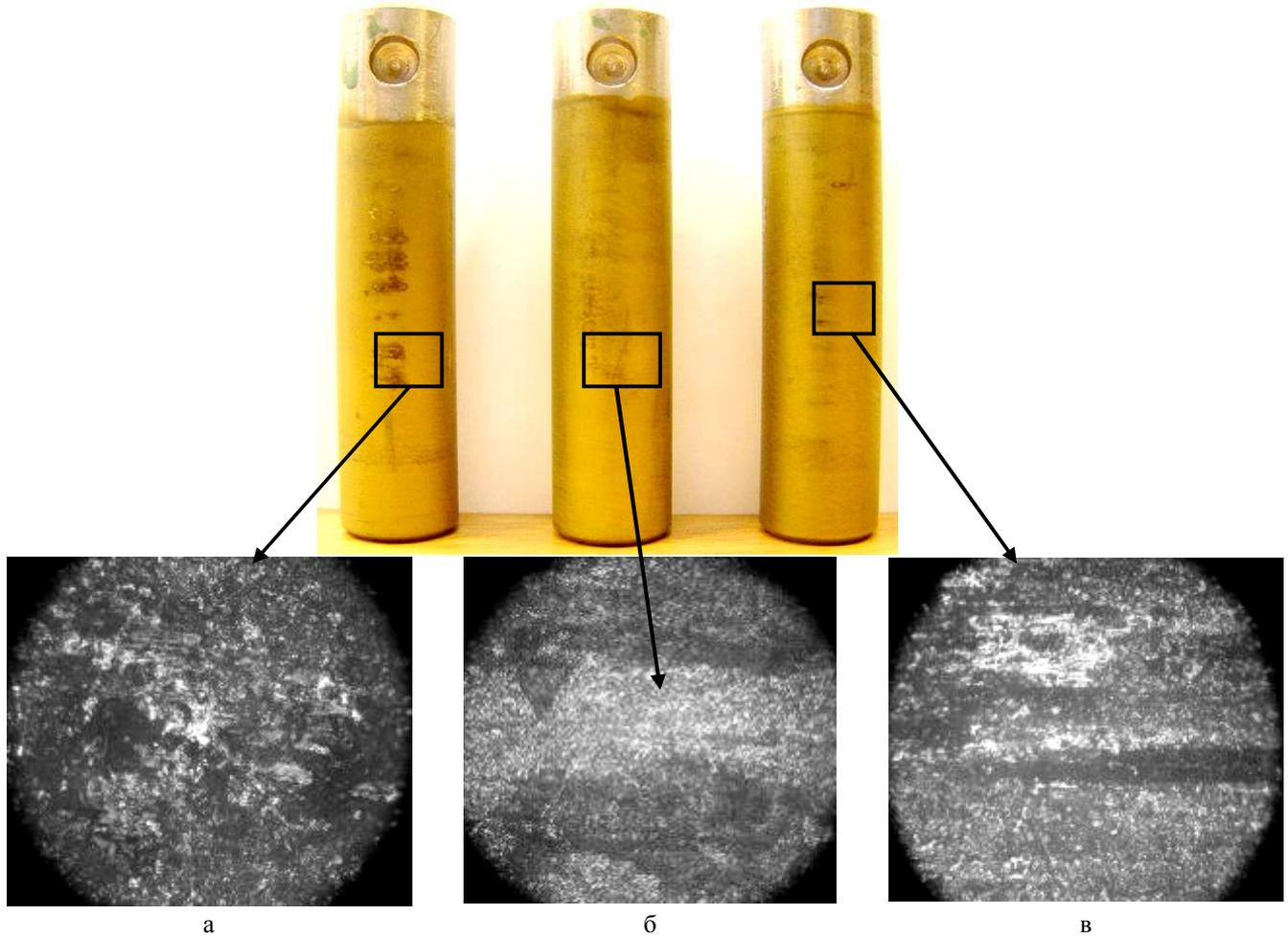


Рис. 1. Вид образцов с различной толщиной h покрытия Ti-TiN после испытания на фреттинг ($150\times$):
 а – $h = 15...18$ мкм; б – $h = 25$ мкм; в – $h = 40$ мкм

Таблица 1

Результаты исследования фреттинг-стойкости образцов из сплава ВТ6

вид обработки	перед испытанием		после испытания		Относительная фреттинг-стойкость
	Ra ₁	Rmax ₁	Ra ₂	Rmax ₂	
1. Исходное состояние (без покрытия)	0,32	2,51	2,50	43,60	1,0
2. Ti-TiN, $h = 8$ мкм*	0,23	2,48	0,49	5,09	4,0
3. Ti-TiN, $h = 15...18$ мкм	0,69	5,26	0,85	5,09	7,1
4. Ti-TiN, $h = 25$ мкм	0,78	4,98	0,79	5,98	8,1
5. Ti-TiN, $h = 40$ мкм	0,68	5,81	0,68	5,38	8,5

Таблица 2

Результаты исследования фреттинг-стойкости образцов из сплава ЭИ961

вид обработки	перед испытанием		после испытания		Относительная фреттинг-стойкость
	Ra ₁	Rmax ₁	Ra ₂	Rmax ₂	
1. Исходное состояние (без покрытия)	0,95	7,71	1,45	7,61	1,0
2. TiN, h = 15...18 мкм	0,94	7,95	0,89	7,52	1,8
3. TiN, h = 25 мкм	1,00	7,82	0,82	6,32	2,0
4. TiN, h = 40...45 мкм	0,95	7,50	0,79	6,00	2,1

Поверхность в месте пятна контакта была исследована на световом микроскопе НЕОРНОТ-21М при увеличении $\times 150$. В ходе испытания на фреттинг-износ образцов из титанового сплава ВТ6 и ЭИ961 после полирования и нанесения вакуумно-плазменного покрытия нитрида титана (TiN) была сформирована дефектная поверхность в виде светлых натертостей и темных пятен окислов. С увеличением толщины покрытия интенсивность разрушения уменьшается. Следов растрескивания, сколов, схватывания покрытия не обнаружено.

Повреждаемость от действия фреттинга титановых образцов оценивали по изменению параметров ее шероховатости путем снятия профилограмм и расчета критериев повреждаемости [3, 4]. Величина фреттинг-стойкости указана в табл. 1, 2.

Заключение

Полученные результаты подтверждают, что проведенная обработка надежно защищает контактные поверхности от износа при фреттинге. Сколов, отслоений или следов окисления поверхности не выявлено, износ покрытия после принятого количества циклов $N=2 \cdot 10^5$ не превышает величины шероховатости. При этом значительное снижение фреттинг-износа образцов из титанового сплава (до 8,5 раз) по сравнению с исходным, неупрочненным состоянием, объясняется блокированием адгезионного взаимодействия поверхностей основного материала и предотвращения их «схватывания».

Принимая во внимание вышеизложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Наличие покрытия TiN и увеличение его толщины до 40 мкм обеспечивает повышение фреттинг-стойкости образцов из титанового сплава ВТ6 и стали ЭИ961.

2. Нелинейная зависимость дефектности изношенной поверхности от толщины нанесенного слоя

TiN показывает, что достаточной толщиной покрытия является величина 15...20 мкм. С дальнейшим увеличением толщины фреттинг-стойкость повышается незначительно.

Проведенные дополнительные лабораторные и стендовые испытания [3, 5] показали, что предлагаемая вакуумно-плазменная обработка наряду с повышением фреттинг-стойкости обеспечивает комплекс эксплуатационных свойств: износостойкость, коррозионную стойкость, защиту от пылевой (абразивной) и капельно-ударной эрозии и может быть рекомендована для упрочнения рабочих и направляющих лопаток компрессора ГТД, паровых турбин и других ответственных деталей турбомашин из титановых сплавов и сталей.

Литература

1. Смыслов А.М. Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбины ГТД: дисс. ... д-ра техн. наук / Смыслов Анатолий Михайлович. – Уфа: Изд-во УАИ, 1993. – 326 с.
2. Повышение эксплуатационных свойств лопаток компрессора из титановых сплавов ионным модифицированием поверхности на установке «ВИТА» / А.М. Смыслов, М.И. Гусева, М.К. Новикова и др. // *Авиационная промышленность*. – 1992. – № 5. – С. 18-24.
3. Смыслов А.М. Повышение долговечности деталей машин в условиях фреттинга / А.М. Смыслов, К.С. Селиванов. – Уфа: Гилем, 2005. – 180 с.
4. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Издание официальное. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1973.
5. Экспериментальное исследование износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий в запыленном потоке воздуха: технич. отчет ЦИАМ №10790. – 1987. – 37 с.

Поступила в редакцию 28.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук., проф. А.М. Смыслов, зав. кафедрой технологии машиностроения Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия.

ПІДВИЩЕННЯ ФРЕТТИНГ-СТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМПЛЕКСНОЮ ВАКУУМНОЮ ПЛАЗМОВОЮ ОБРОБКОЮ

К.С. Селіванов, Р.Ф. Галиакбаров

Розглядається можливість підвищення фреттинг-стійкості деталей із сталевих і титанових сплавів комбінованою вакуумно-плазмовою обробкою, що поєднує іонну імплантацію та нанесення багат шарового покриття системи Ti-TiN. Наводяться результати дослідження мікрогеометрії поверхні зразків з різною товщиною покриття після випробування на фреттинг. Отримані результати підтверджують, що проведена обробка надійно захищає контактні поверхні від фреттинг-зносу. Сколів, відшарувань або слідів окислення поверхні не виникає, знос покриття після прийнятого кількості циклів $2 \cdot 10^5$ не перевищує величини шорсткості. При цьому значне зниження фреттинг-зносу зразків з титанового сплаву (до 8,5 разів) в порівнянні з вихідним, неупрочненим станом, пояснюється блокуванням адгезійної взаємодії поверхонь основного матеріалу і запобігання їх «схоплювання».

Ключові слова: зношування, фреттинг, зміцнення, вакуумна обробка, плазмові покриття.

IMPROVING FRETTING RESISTANCE OF MACHINE PARTS INTEGRATED VACUUM PLASMA TREATMENT

K.S. Selivanov, R.F. Galiakbarov

The possibility of improving fretting resistance of parts made of steel and titanium alloys combined vacuum-plasma treatment, which combines ion implantation and application of multi-layer coating system Ti-TiN. The results of the study microgeometry surface samples with different thickness of the coating after the fretting tests. These results confirm that the processing carried out securely protects contact surfaces from fretting wear. Chipping, peeling or signs of surface oxidation does not occur, the wear of the coating after the number of cycles taken by $2 \cdot 10^5$ does not exceed the roughness. At the same time a significant reduction in fretting wear of titanium alloy samples (up to 8.5 times) compared to the original, non-reinforced condition, due to blocking of adhesive interaction surface of base material and prevent their "seizure."

Key words: wear, fretting, hardening, vacuum treatment.

Селіванов Константин Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедри технології машиностроєння Уфимського державного авіаційного технічного університета, Уфа, Росія, e-mail: ion_usatu@mail.rb.ru.

Галиакбаров Руслан Фанилевич – аспірант кафедри технології машиностроєння Уфимського державного авіаційного технічного університета, Уфа, Росія, e-mail: ion_usatu@mail.rb.ru.