

Эффективность покрытий на основе вольфрама при обеспечении работоспособности подвижных узлов, изготовленных из титановых сплавов

*Национальный аэрокосмический университет им Н. Е. Жуковского «ХАИ»
Государственное предприятие «Антонов»*

Использование титановых сплавов в предельно нагруженных самолетных конструкциях приводит к уменьшению их массы, однако существенно усложняет работу подвижных узлов таких конструкций на трение и износ. Эффективно используемые в стальных конструкциях гальванические покрытия на основе хрома применительно к подвижным узлам из титановых сплавов себя не оправдали. Предложено и показано, что нанесение газодинамическим способом на детали из титана антифрикционных покрытий на основе карбида вольфрама позволяет обеспечить работоспособность пары трения «титан + карбид вольфрама + бронза» при более высоких температурах, уменьшить коэффициент трения, повысить параметр несущей способности и снизить интенсивность износа, т.е. делает такую пару трения конкурентоспособной с классической парой «сталь + хром + бронза».

Ключевые слова: титановые сплавы, антифрикционные покрытия, карбид вольфрама.

Введение

Титановые сплавы BT-6, BT-15, BT-22 получили широкое распространение при конструировании самолетных узлов и агрегатов. Сравнительно небольшая плотность в сочетании с довольно высокими прочностными характеристиками (табл. 1) обеспечивает титановым сплавам более высокую удельную прочность в широком интервале температур по сравнению с алюминиевыми сплавами, сталями и жаропрочными никелевыми сплавами. Это обстоятельство является решающим фактором, определяющим предпочтительность применения титана в авиационной и аэрокосмической технике.

Таблица 1

Плотность, упругие свойства, удельное электрическое
сопротивление титановых сплавов

Сплав	Удельная плотность γ , кг/м ³	Модуль упругости E, ГПа	Модуль упругости G, ГПа	Коэффициент Пуассона M
BT6-C	4451	112,8	44,1	0,33
BT6	4430	112,8	44,1	0,33
BT22	4600	112,8	40,8	0,35
BT22И	4600	112,8	40,8	0,35
BT15	4890	107,9	42,1	0,33

Наряду с этим титан и его сплавы обладают высокой склонностью к контактному схватыванию при трении. Это свойство создает известные трудности при обработке титана резанием и делает опасным его применение в трущихся узлах, так как может произойти заклинивание подвижных узлов, поскольку значение коэффициента сухого трения для пары титан – титан равно 0,47- 0,61. Относительно тонкая естественная окисная пленка на титане легко разрушается при трении за счет высоких удельных нагрузок в точках контакта (на неровностях

поверхности) благодаря значительно более высокой пластичности титана, чем у окисной пленки. На локальных участках контакта двух поверхностей происходит явление схватывания. Этому способствует и ряд других свойств титана: повышенная упругая деформация из-за более низкого (например, чем у стали) модуля упругости, более низкая теплопроводность и др. Кроме того, благодаря выделению теплоты трущаяся поверхность металла обогащается газами из окружающей среды, что также повышает прочность поверхностного слоя. Поэтому разрушение образовавшихся связей обычно происходит в глубине основного металла и повреждения на трущихся поверхностях из титана носят так называемый глубинный характер со значительным наволакиванием и вырывами металла. [1]

Наиболее эффективным путем решения проблемы низкого ресурса по износу титановых деталей является нанесение антифрикционных покрытий на поверхности трения.

Широко применяемое в промышленности покрытие гальваническим хромом для титанов сопряжено с рядом сложностей ввиду наличия на его поверхности прочной оксидной пленки, препятствующей удовлетворительному сцеплению наносимых на титан покрытий. Кроме того, процесс хромирования связан с отрицательным влиянием на окружающую среду, т.е. его использование ограничено по экономическим соображениям.

Учитывая особенности титановых сплавов, анодирование, хромирование, никелирование дают большой процент брака в производстве и ненадежны в эксплуатации. Под нагрузкой эти покрытия имеют плохую сцепляемость с основным металлом, растрескиваются, слущиваются, твердые частицы, образующиеся при этом, рвут прокладки, забивают фильтры, вызывают локальное образование раковин и углублений, нарушая размерность деталей и работу ответственных узлов шасси [2].

С учетом этого обстоятельства появились исследования по возможности применения ряда металлокомпозиционных покрытий (табл. 2), наносимых на трущиеся детали, изготовленные из титановых сплавов. Присутствие в этих порошках небольшой доли вольфрама или карбида вольфрама приводит к повышению поверхностной твердости этих покрытий, что положительно сказывается на процессах трения и износа в подвижных узлах.

Таблица 2

Порошки для газо-термического напыления

Порошки	Состав, % по массе	Твердость покрытия	Назначение
Двойной карбид W-Ti с Ni	17 Ni	HRC 71	Защита от износа
Карбид W	3,8-4,2 C		Защита от износа при невысоких температурах абразивными частицами, твердыми поверхностями
Карбид W-Co	11...21 Co 2,4...5,5 C	HRC 40...60	Защита от износа при невысоких температурах абразивными частицами
Карбид W-Ni	6...19 Ni 3,2...5,5 C	HRC 40...60	Защита от износа при невысоких температурах абразивными частицами твердыми поверхностями, при фреттинг-коррозии и эрозии.

Однако несмотря на столь большое разнообразие металлокомпозиционных покрытий с незначительной долей карбида вольфрама и способов их нанесения на титаны, так и не удалось достичь тех показателей по трению и износу, которыми обладают пары сталь - твердый хром – бронза из-за недостаточной поверхностной микротвердости и их низкой адгезионной прочности с основной несущей деталью.

Исследование применимости карбида вольфрама в качестве антифрикционного покрытия

Оказалось, что наилучшим антифрикционным металлокомпозиционным покрытием, наносимым на детали из титанового сплава, является карбид вольфрама (W_4C_2), в составе которого вольфрама более чем 95 %.

Химический состав металлокомпозиционного порошка, используемого в качестве антифрикционного покрытия, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав порошка карбида вольфрама

W	C	Fe	Ch	V	Nb	Si+Al
95,6	3,98	0,12	0,12	0,06	0,07	0,05

Карбид вольфрама – одно из самых твердых керамических соединений, сравнимое по твердости с алмазом (HRC90). Кроме того, он имеет уникальный набор свойств, в том числе высокую точку плавления (2600 – 2850 °С), высокую износостойкость и сопротивляемость термоудару (градиенту температур), а также хорошую устойчивость к окислению. Высокие показатели прочности сцепления и низкая пористость также доказывают преимущество таких покрытий. Из табл. 4 можно заметить превосходство W_4C_2 покрытия по сравнению с хромированием по антикоррозионным свойствам и температурной стойкости. [6]

Таблица 4

Параметрические особенности покрытия в виде карбида вольфрама

Свойство	Покрытие из карбида титана	Гальванический хром
Микротвердость, HRC	>70	60-70
Прочность сцепления, МПа	>1050	750–850
Толщина покрытия, мкм	1,5-40	До 13
Шероховатость, Ra	<4	<4
Коррозионная стойкость, часы	720	55
Жаростойкость	550	400

Как видно из табл. 4, значение микротвердости покрытий карбида вольфрама составляет 70–80 Rc, в то время как хромированные покрытия дают твердость 60–70 Rc. Значения микротвердости покрытия карбида вольфрама и хромированного покрытия по Виккерсу составляют соответственно 1050 для W_4C_2 и 750–850 для хромового покрытия. Помимо того, что покрытия карбида вольфрама имеют преимущество при высоких температурах, нанесение этого покрытия происходит быстрее по сравнению со стандартным хромированием. Обычно процесс напыления карбида вольфрама на шток занимает 1-2 часа, в то время как хромирование – более суток. К тому же в отличие от хромирования покрытия карбида вольфрама не подвержены водородному охрупчиванию. За счет большей микротвердости пара карбид вольфрама – бронза больше, чем

пара хром - бронза приближается к идеальной модели износа вследствие большего градиента изменений свойств в такой паре. Это и является ее преимуществом перед другими парами трения.

Однако для обоснованного использования этой пары в предельно нагруженных узлах самолетных агрегатов понадобились дополнительные ее испытания. Исходные данные таких исследований приведены в табл. 5. Оценка на трение и износ подвижных узлов с такими покрытиями и с такими финишными операциями их обработки производились на стенде по методике, предложенной в работе [5].

Результаты исследований на предельные возможности таких подвижных узлов приведены в табл. 6.

Таблица 5

Исследуемые покрытия (карбид вольфрама и бронзы) а также финишные операции их обработки

Втулки в стыкуемых деталях БрАЖН-10-4-4; БрАЖМу-10-3,5-1,5		Стыкующая деталь, титан ВТ-22		
Блоки операций	Финишная обработка, микротвердость, МТВ	Покрытие, толщина мкм, микротвердость, ГПа	Блоки операций	Финишная обработка
А	Точение + чистовое развертывание, 147...151	Карбид вольфрама, 54...230 мкм, 76 ГПа	А	Шлифование
Б	Точение + протягивание, 165...175		Б	Шлифование + алмазное выглаживание
В	Точение + чистовое развертывание + свинцевание, 129...138		В	Шлифование + алмазное выглаживание + вибровыглаживание

Таблица 6

Влияние блоков финишных операций обработки поверхностей трения на предельные показатели несущей способности и долговечности подвижных узлов с покрытием из карбида вольфрама

Блоки финишных операций	Предельные значения по			
	температуре, °С	коэффициенту трения, μ	несущей способности, $p_p \alpha_q^M$, МПа	Интенсивности износа J_h , мкм/м
А-а	86	0,25	48	0,0030
А-б	90	0,26	49	0,0034
А-в	94	0,24	52	0,0021
Б-а	91	0,25	40,5	0,0032
Б-б	92	0,23	40	0,0029
Б-в	96	0,23	44	0,0019
В-а	93	0,24	45	0,0022
В-б	96	0,23	46	0,0023
В-в	90	0,21	51	0,0017

Из приведенных исследований следует, что карбидовольфрамовое покрытие в паре трения титан ВТ-22 – бронза БрАЖМу-10-3,5-1,5 делает такую

конструкцию подвижного узла по параметрам трения и износа конкурентоспособной с конструкцией хромансилевая сталь – твердый хром – бронза, обеспечивая при этом лучшую защиту не только от износа, но и от ударной нагрузки и усталости, лучшую или аналогичную защиту от коррозии.

Выводы

1. Узлы трения самолетных агрегатов изготовленные из титановых сплавов требуют применения антифрикционных покрытий для обеспечения их работоспособности без схватывания и задигов в зонах трения.

2. Широко применяемое в промышленности гальваническое хромирование для титановых поверхностей трения неприемлемо, поскольку наличие на поверхности титана оксидной пленки препятствует удовлетворительному сцеплению наносимых на титан покрытий. Кроме того такой тип покрытия ограничен в применении по экологическим соображениям.

3. В работе рассмотрен вопрос нанесения на трущиеся детали изготовленных из титановых сплавов металлокомпозиционных покрытий газодинамическим путем, имеющих в своем составе некоторую (небольшую) долю карбида вольфрама, что позволило повысить поверхностную твердость покрытия и улучшить работоспособность узла на трение и износ, но при невысоких температурах.

4. Для существенного улучшения работоспособности узлов трения изготовленных из титанового сплава BT-22, предложено использовать в качестве покрытия металлокомпозиционный порошок карбида вольфрама. Испытания узлов с парами «титан + карбид вольфрама + бронза» показали, что такие узлы по температуре, коэффициенту трения, несущей способности и интенсивности износа конкурируют с узлами с парами «сталь + хром + бронза» и даже превосходят.

Список литературы

1. Ильин, А. А., Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. [Текст] Справочник /Б. А. Колачев, И. С. Полкин – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009 – 520 с.
2. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. [Текст] /Т.ИИ-3 ред. совет: К. В. Фролов – М.: Машиностроение, 2001. – Т.ИИ-3 – 880 с.
3. Особенности использования титановых сплавов нержавеющей сталей и металлокомпозиционных антифрикционных покрытий в шасси современных самолетов [Текст] / В. И. Рябков, Л. В. Капитанова, Ю. В. Бабенко и др.// Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х., 2003. – Вып. 36/1. – С 6–14.
4. Борисов, Ю. С. Плазменные порошковые покрытия [Текст] / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. – К.: Техніка, 1986. – 153 с.
5. Рябков, В. И. Экспериментальные основы оценки износостойкости шарниров шасси [Текст]/ В. И. Рябков, И. Н. Волох //Авиационная промышленность. – 1986. – №19. – С. 54–64.
6. Журавлев, П. А. Повышение износостойкости титановых сплавов с помощью лазерной наплавки твердосплавных порошков [Текст] / П. А. Журавлев, Е. А. Морозов, И. В. Подборнов // Вестник ПНИПУ. П. – 2012. – №2. – С. 33–41.

Рецензент: д.т.н., проф. В.И. Рябков. Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Поступило в редакцию 10.02.2014

Ефективність покриттів на основі вольфраму при забезпеченні працездатності рухомих вузлів, виготовлених з титанових сплавів

Використання титанових сплавів у гранично навантажених конструкціях літаків призводить до зменшення їхньої маси, проте істотно ускладнює роботу рухомих вузлів таких конструкцій та тертя і знос. Гальванічні покриття на основі хрому, які ефективно використовуються в сталевих конструкціях застосовано до рухомих вузлів з титанових сплавів себе не виправдали. Запропоновано і показано, що нанесення газодинамічним способом на деталі з титану антифрикційних покриттів на основі карбиду вольфраму дозволяє забезпечити працездатність пари тертя «титан + карбід вольфраму + бронза» при більш високих температурах, зменшити коефіцієнт тертя, підвищити параметр несучої здатності и знизити інтенсивність зносу, тобто робить таку пару тертя конкурентоспроможною з класичною парою «сталь + хром + бронза».

Ключові слова: титанові сплави, антифрикційні покриття, карбід вольфраму.

Effectiveness of Coatings Based on Tungsten while Ensuring Operability of Mobile Joints Made of Titanium Alloys

Use of titanium alloys in extremely loaded aircraft structures reduces their weight, but significantly complicates operation of the mobile parts of such structures against friction and wear. Electroplating chromium coatings applied to mobile joints of titanium alloys effectively used in steel structures have not been justified. It is proposed and shown that the gas-dynamic way of application of the titanium antifriction coatings based on tungsten carbide on the parts allows for operation of the friction pair " titanium tungsten carbide + + bronze " at higher temperatures, reduction of friction factor, improvement of the bearing capacity and reduction of the wear rate, i. e. makes the friction pair competitive with classic pair " steel + chrome + bronze .

Keywords: titanium alloys , anti-friction coatings , tungsten carbide .