

Досліджена можливість підвищення якості плазмового покриття шляхом проведення високотемпературного дифузійного відпалу, що забезпечує збільшення міцності його зчеплення з основою та зносостійкості. Встановлено закономірності процесу даного виду термічної обробки плазмового покриття, які відображають зв'язок технологічних параметрів обробки з характеристиками його якості

Ключові слова: зносостійкість, плазмове покриття TiC-Ni-Cr, триботехнічні характеристики, дифузійний відпал, Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr

Исследована возможность повышения качества плазменного покрытия путём проведения высокотемпературного диффузионного отжига, обеспечивающего увеличение прочности его сцепления с основой и износостойкости. Установлены закономерности процесса данного вида термической обработки плазменного покрытия, которые отображают связь технологических параметров обработки с характеристиками его качества

Ключевые слова: износостойкость, плазменное покрытие TiC-Ni-Cr, триботехнические характеристики, диффузионный отжиг, Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДИФФУЗИОННОГО ОТЖИГА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ TiC-Ni-Cr

М. В. Киндрачук

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*

E-mail: Kindrachuk@ukr.net

А. Л. Шевченко

Инженер*

E-mail: LSD-Tuning@ukr.net

А. В. Башта

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: aleksandr.bashta@list.ru

Н. В. Ищук

Аспирант*

E-mail: isnav@ukr.net

*Кафедра машиноведения

Аэрокосмический институт

Национальный авиационный университет

пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03680

1. Введение

Широкое применение титана и его сплавов в промышленных масштабах было обусловлено их уникальным комплексом физических и механических свойств, коррозионной стойкостью и биосовместимостью. В зависимости от непосредственного применения, титановые сплавы конкурируют с никелевыми сплавами, нержавеющей сталью и циркониевыми сплавами. Аэрокосмическая отрасль до нынешнего времени является доминирующей в масштабном применении титановых сплавов [1, 2]. Однако титан и сплавы на его основе в последние 20 лет показывают рост своего применения в различных областях машиностроения: автомобилестроения, судостроения, химической отрасли и других [3, 4].

Узлы трения авиационной и высокоскоростной техники в значительной степени определяют ресурс, надёжность, долговечность и безопасность функциональных систем, где для их важнейших элементов, помимо высокой прочности, нужны также высокие антифрикционные свойства. Исходя из того, что титановые сплавы склонны к схватыванию и задирам в процессе

трения, следует то, что они требуют дополнительного нанесения покрытий, обладающих высокими триботехническими свойствами.

Для повышения износостойкости титановых деталей самолётов и вертолётной гражданской и военной авиации, которые работают в узлах трения, используют различные технологии нанесения функциональных покрытий [5, 6]. Наиболее продуктивной и распространённой является технология плазменного напыления порошковых материалов [6, 7]. Она хорошо изучена и позволяет при достаточно высокой продуктивности значительно увеличить ресурс работы деталей, которые работают в условиях трения при разных удельных нагрузках, повышенных скоростях скольжения. Для реализации этой технологии созданы соответствующие методики выбора порошковых материалов, способы определения режимов их нанесения, соответствующее технологическое оборудование. Существенным недостатком покрытий, полученных плазменным методом, является сравнительно невысокая прочность их сцепления с подложкой, которая не превышает $\sigma = 20-30$ МПа, высокая пористость 6-20%. Поэтому такие покрытия практически невозможно ис-

пользовать при действии циклических знакопеременных нагрузок, особенно при повышенных удельных давлениях и наличии химически активных жидкостей и газов.

2. Объект исследований

Процесс обработки плазменного покрытия системы TiC-Ni-Cr высокотемпературным диффузионным отжигом (ВТДО), которое используется для повышения износостойкости деталей машин и механизмов изготовленных из титановых сплавов.

3. Цель исследований

Повышение физико-механических и триботехнических свойств плазменного покрытия системы TiC-Ni-Cr на $(\alpha+\beta)$ -титановом сплаве Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr с применением ВТДО.

4. Материалы и методы исследований

Для проведения исследований была применена комплексная методика, которая включает изучение состава, структуры и свойств плазменного покрытия и контролел с использованием современных физических и химических методов анализа, а также определение их триботехнических характеристик в условиях трения скольжения без смазки.

Готовились 2 партии образцов из титанового сплава Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr, изготовленных в виде сектора (колодки) на которые плазменным способом наносилось покрытие системы TiC-Ni-Cr [8]. После нанесения полученные покрытия обрабатывали до шероховатости $R_a \leq 0,32$ мкм. На контрообразцы из готовленных также из сплава Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr в форме колец с размерами $\varnothing 40 \times \varnothing 16 \times 10$ мм гальваническим методом наносили хромированное покрытие. Площадь контакта трибосопряжения не изменяется с износом, что является одним из условий стационарности процесса. Контактное трение осуществлялось при комнатной температуре в условиях трения скольжения на воздухе без смазки. При этом определялась величина износа, коэффициент трения и температура в зоне контакта. Величина износа контролировалась как весовым способом, так и с помощью индуктивного датчика.

Исследование триботехнических характеристик (сопротивление изнашиванию и коэффициент трения) исходного плазменного покрытия нанесённого на $(\alpha+\beta)$ -титановый сплав Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr (рис. 1) и плазменных покрытий подвергнутых ВТДО, проводились на усовершенствованной машине трения «2070 СМТ-1», которая позволяет проводить испытания при скоростях скольжения $V_{ск} = 0,1-4$ м/с (частота вращения вала контрообразца $\omega = 1,25-25$ Гц) и нагрузках на образцы $F = 200-2000$ Н по схеме «торцовое трение образца колодки и кольцевого контрообразца». В отличие от стандартного варианта, усовершенствованная машина трения дополнительно включает в себя измеритель линейного износа механических трибоси-

стем, а также компьютерную измерительно-вычислительную систему сбора и обработки триботрической информации.

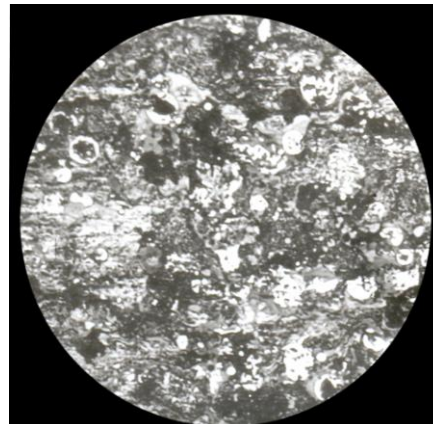


Рис. 1. Структура плазменного покрытия системы TiC-Ni-Cr нанесённого на титановый сплав Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr, $\times 400$

5. Результаты и анализ исследований состава, структуры, физико-механических свойств, и триботехнических характеристик исследуемого плазменного покрытия

В напылённых плазменных покрытиях наблюдаются слабо протравленные области, названные «белыми слоями» (составляют основной объём покрытий), нерасплавленные или частично расплавленные порошки, а также небольшое количество пор. Необходимо отметить, что пористость полученного плазменного покрытия составляла 12,5 %, плотность $\rho = 7,7$ г/см³, а микротвёрдость матрицы плазменного покрытия составляла $H_{0,98} = 5,4$ ГПа.

В исследуемом плазменном покрытии было отмечено появление неравновесных структур тонкого конгломерата фаз, что открывает возможности изменения свойств этих покрытий при переходе к более равновесным состояниям. Представляло интерес с одной стороны проследить изменения структуры и, следовательно, изменение свойств плазменного покрытия, вызванных таким ВТДО, с другой стороны изучить состояние полученных покрытий, переведённых путём ВТДО из исходного в более равновесное состояние. Поэтому, с этой целью вторую партию образцов с полученными плазменными покрытиями отжигали в вакуумной установке «СШВЛ» при температуре 1173 К. Температура ВТДО выбиралась, исходя из построенных ранее диаграмм фазовых равновесий и составляла $0,75 T_{пл}$. Такая температура предполагает отсутствие морфологических изменений, но в то же время, может существенно повлиять на диффузионные процессы и распад металлической матрицы, а также коагуляцию дисперсных кристаллов фаз внедрения, находящихся в «белых слоях». Время выдержки при высокой температуре составляло $18 \times 10^2, 54 \times 10^2, 18 \times 10^3$ с и выбиралось с учётом возможности различной степени приближения к равновес-

ному состоянию. Вакуум составлял 2×10^{-3} мм рт. ст., охлаждение проходило с печью в течение 2 часов. Таким образом, выбранный режим ВТДО позволял изменять структурное состояние и термодинамическое равновесие «белых слоёв», не изменяя при этом состояние областей со структурой исходного порошка.

Начиная со времени выдержки в печи 18×10^2 с, заметно снижение пористости и уменьшение границ между «белыми слоями». В покрытиях, начиная с минимальной выдержки, наблюдается распад «белых слоёв». В плазменном покрытии после ВТДО в течение 18×10^2 с видно увеличение количества «серых слоёв», т.е. частично распавшихся «белых слоёв», что подтверждает предположение о наличии частичного распада в исходном напылённом покрытии. В результате увеличения продолжительности выдержки до 54×10^2 с происходит более полный распад «белых слоёв», т.е. выделение и них дисперсных частиц фаз внедрения. Одновременно с этим развиваются процессы коагуляции и коалесценции, что приводит к увеличению размера выделившихся частиц и появлению твёрдого раствора со значительно меньшим количеством фаз внедрения, находящихся в твёрдом растворе. Более длительная выдержка в печи в течение $54 \times 10^2 - 18 \times 10^3$ с приводит к снижению коррозионной стойкости плазменного покрытия (увеличивается травимость металлографического шлифа). Необходимо отметить, что выделяющиеся и коагулирующиеся частицы фаз внедрения по своим размерам приближаются с увеличением времени выдержки к их размерам в исходном порошке.

На рис. 2 представлены зависимости интенсивности изнашивания исходного и оттожжённого плазменного покрытия от изменения удельной нагрузки в контакте при трении скольжения без смазки.

Исходное (неотожжённое) плазменное покрытие, обладает низкой микропластичностью «белых слоёв» и их высокой твёрдостью, выкрашивается в процессе трения. Увеличение времени ВТДО приводит к возрастанию микропластичности, снижению микротвёрдости «белых слоёв» и, как следствие, существенному возрастанию износостойкости покрытия и одновременному снижению износа контртела. При этом оптимальным режимом является ВТДО в течение 18×10^3 с (до нагрузки 2,5 МПа). Значения интенсивностей изнашивания, как покрытия, так и контртела при более высоких удельных нагрузках незначительно отличаются и сохраняется тенденция к стабилизации величины износа до нагрузки 10 МПа. ВТДО плазменного покрытия системы TiC-Ni-Cr приводит к увеличению пластичности его структурных составляющих, появлению на поверхности трения окисных плёнок состава Me_3O_4 как при отжиге в течение 18×10^2 с, так и при отжиге с продолжительностью в 10 раз большей.

Окисел на поверхности образца, оттожжённого при минимальной выдержке, содержит (мас. %): O – 25,8; Ti – 0,3; Cr – 1,4; Ni – 6,32. При ВТДО в течение 18×10^3 с обнаружены окислы того же состава, но с отличным содержанием легирующих элементов. Более светлый окисел содержит (мас. %): O – 28,04; Ti – 0,2; Cr – 2,11; Ni – 0,38, а более тёмный – O – 29,5; Ti – 0,4; Cr – 3,4; Ni – 0,12. Следует отметить, что с увеличением продолжительности ВТДО концентрация легирующих элементов в поверхностных плёнках, образующихся

при трении, уменьшается, приближаясь к значениям, соответствующим их содержанию в окислах на поверхности трения исходного плазменного покрытия.

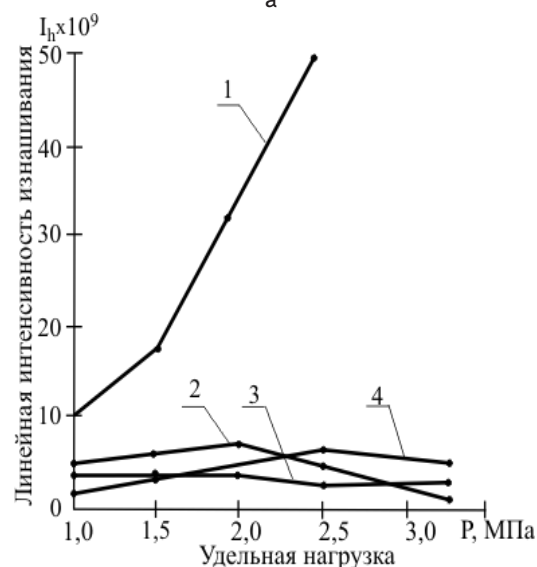
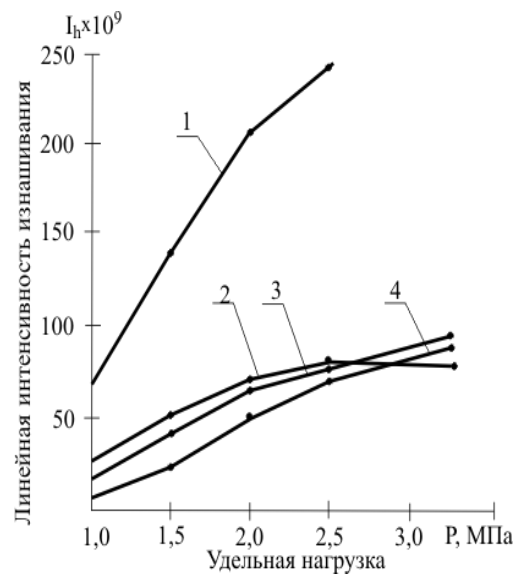


Рис. 2. Графики зависимостей линейных интенсивностей изнашивания от удельной нагрузки: а – хромированного контртела из Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr и б – плазменного покрытия TiC-Ni-Cr в зависимости от удельной нагрузки: 1 – неотожжённое покрытие; 2, 3, 4 – оттожжённые покрытия в течение 18×10^2 , 54×10^2 , 18×10^3 с соответственно (при $V_{ск} = 0,5$ м/с)

В соответствии с данными работы [9], основное требование к материалам, обеспечивающим необходимую долговечность при трении, это, с одной стороны, высокое сопротивление деформированию в тонких поверхностных слоях, а с другой стороны, возможность релаксации напряжений в этих слоях. Именно поэтому явление пластификации оказывается особенно эффективным в области хрупкого (преимущественно упругого) деформирования, имеющего место

при трении гальванических покрытий. Малый уровень пластической деформации при трении исходного (неотожжённого) плазменного покрытия, позволяет распространить полученные в работе выводы на исследуемый класс материалов.

ВТДО плазменного покрытия приводит к выравниванию рельефа поверхности трения, на которой не наблюдается хрупкого выкрашивания, как в исходном (напылённом) состоянии. На трущихся поверхностях становятся видны следы усталостного разрушения. Наряду с этим наблюдаются частицы продуктов износа, «пропахивающие борозды» в покрытии, а также следы пластического оттеснения (рис. 3).

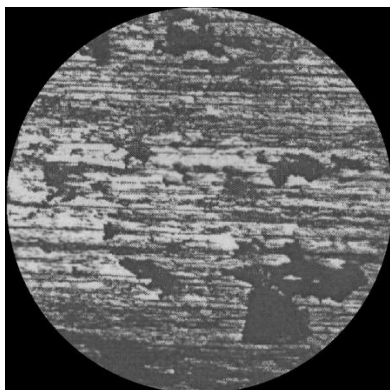


Рис. 3. Поверхности трения отожжённого в течение 18×10^2 с плазменного покрытия

Таким образом, можно отметить высокую износостойкость исследованного плазменного покрытия, которая определяется структурным состоянием покрытия, его способностью образовывать защитные окисные плёнки, а также различной степенью упрочнения, которую характеризует дисперсность фаз внедрения и его связь с металлической матрицей. В отличие от исходного покрытия того же состава, в котором основным является механизм композиционно-го упрочнения, в отожжённом плазменном покрытии реализуется механизм дисперсионного упрочнения (в «белых слоях»), который, как известно, сильно зависит от количества, состава, степени дисперсности и величины связей с упрочняемой матрицей [10]. Управляя величиной дисперсных кристаллов фаз внедрения и одновременно состоянием металлической матрицы, можно подобрать параметры ВТДО, при которых на поверхности трения покрытия образуются оптимальные по составу, количеству и толщине окисные плёнки при сохранении достаточно высокой микротвёрдости

структурных составляющих. Это позволяет минимизировать суммарный износ пары трения в широком диапазоне параметров – материал контртела, удельные нагрузки, скорость скольжения, температура и состав внешней среды, её коррозионная активность.

6. Апробация результатов исследований

Результаты *проведенных* исследований могут быть применены инженерами-конструкторами при проектировании различных деталей машин и механизмов, изготовленных из титановых сплавов. Практическое применение результатов исследований было подтверждено актом испытаний технологических процессов поверхностного упрочнения и восстановления титановых деталей авиационной техники с плазменными покрытиями, проведённых в условиях ГП МО «Луцкий ремонтный завод «МОТОР», которые прошли без замечаний и показали, что эта технология может обеспечить повышение износостойкости в 1,2-1,5 раза по сравнению с существующей заводской технологией восстановления.

7. Выводы

1. В процессе плазменного напыления в структуре полученного покрытия на титановом сплаве образуются слаботравящиеся «белые слои» с высокой твёрдостью, которые в основном определяют триботехнические характеристики.

2. Показано, что в плазменном покрытии благодаря развитию диффузионных процессов при ВТДО наблюдаются фазовые превращения, сопровождающиеся приближением структуры и фазового состава к более равновесному состоянию. Это даёт возможность подбирать такие параметры термообработки плазменного покрытия, когда в заданных реальных условиях трения износ пары трения будет минимальный.

3. Состав вторичных структур и фрактографии поверхностей трения показали, что ВТДО плазменного покрытия изменяют механизм трения по сравнению с исходным напылённым состоянием. Вместо хрупкого разрушения твёрдых и хрупких областей со структурой тонкого конгломерата фаз, увеличение их пластичности приводит к появлению следов пластического оттеснения, выглаживанию поверхности трения и, как следствие, снижению износа пары трения. Основными компонентами трибологических структур являются окисные плёнки.

Литература

- Henriques, V. Titanium production for aerospace applications [Текст] / Vinicius A. R. Henriques // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2009. – V. 1. – N. 1, P. 7–18.
- Boyer, R. The use of β titanium alloys in the aerospace industry [Текст] / R. R. Boyer, R. D. Briggs // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2005. – V. 14, I. 6. – P. 681-685.
- Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts [Электронный ресурс] / Nippon Steel. – Режим доступа : \www/URL: <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/n8815.pdf> – 07.2003 г. – Загл. с экрана.
- Froes, F. Titanium in the family automobile: The cost challenge [Текст] / F. H. Froes, H. Friedrich, J. Kiese, D. Bergoint // JOM. – 2004. – V. 56, I. 2. – P. 40-44.

5. Tucker, R. Thermal Spray Coatings [Текст] / Robert C. Tucker, Jr // ASM Handbook. – V. 5. – P. 497-509.
6. Swapan, K. Functional Coatings. [Текст] / K. Swapan // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – 364 с.
7. The successful use of Plasma Spray Cylinder Coatings in a NASCAR application to achieve friction reduction and cost benefits [Текст] : матеріали Engine Expo 2010, 23 июня 2010 г. Штутгарт : Sulzer Metco, 2010. – 29 с.
8. Киндрачук, М. В. Механизм износа гетерогенных газотермических покрытий на титановом сплаве BT-22 [Текст] / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко // Междунар. науч. журнал «Проблемы трибологии». – 2011. – №1 (59). – С. 80-87.
9. Войтович, Р. Ф. Высокотемпературное окисление титана и его сплавов [Текст] / Р. Ф. Войтович, Д. И. Головкин ; Ин-т проблем материаловедения АН УССР. – К. : Наук. думка, 1984. – 255 с.
10. Войтович, Р. Ф. Высокотемпературное окисление боридов металлов IV группы: Окисление диборида титана [Текст] / Р. Ф. Войтович, Э. А. Пугач // Порошковая металлургия. – 1975. – № 2. – С. 57-62.

В роботі наведено результати дослідження зносостійких азотованих покриттів на сталях комбінованою лазерною і хіміко-термічною обробкою. Досліджено вплив вторинної структурної гетерогенності поверхні, що виникає у процесі лазерної дискретної обробки, на зносостійкість. Установлено, що попередня лазерна обробка суттєво пришвидшує дифузійні процеси азотування, підвищує мікротвердість і змінює фазовий склад порівняно з традиційними методами азотування

Ключові слова: зміцнення, дискретні покриття, азотування, лазер, напруження, структура, фаза, зносостійкість

В работе приведены результаты исследования износостойких азотированных покрытий на сталях комбинированной лазерной и химико-термической обработкой. Установлено, что предварительная лазерная обработка существенно ускоряет диффузионные процессы азотирования, повышает микротвердость и изменяет фазовый состав по сравнению с традиционными методами азотирования

Ключевые слова: упрочнение, дискретные покрытия, азотирование, свойства, лазер, напряжения, структура, фаза, износостойкость

УДК 621.891

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ДИСКРЕТНО- АЗОТОВАНИХ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

М. В. Киндрачук

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри*
E-mail: nau12@ukr.net

Н. В. Іщук

Аспірант*

E-mail: isnav@ukr.net

В. М. Писаренко

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: isnav@ukr.net

*Кафедра машинознавства

Національний авіаційний університет

Пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

**Кафедра металознавства

Київський політехнічний інститут

Вул. Політехнічна, 35, Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Лазерні технології дали змогу в останні десятиріччя створити нові методи обробки поверхні, що різко змінюють будову і структурно-напружений стан поверхневих шарів, збільшують їх твердість, зносостійкість та деякі інші властивості. Тому для підвищення надійності й довговічності об'єктів машинобудування, їх поверхневого зміцнення, ефективним є впровадження інтенсивних технологій модифікації поверхневого шару виробів з використанням висококонцентрованих джерел нагрівання (ВКДН) - лазерного й електронного променя, плазмового струменя. Поверхнева обробка ВКДН може бути ефективно за-

стосована для створення робочого шару виробів з макрөгетерогенною регулярною структурою - дискретної будови із твердими й пластичними ділянками. Завдяки дискретності структури поверхневого шару значно підвищується його працездатність - обмежуються ріст напружень і процес тріщиноутворення, підвищується зносостійкість, виключається когезійне розтріскування й адгезійне відшарування [1].

В даний час для зміцнення конструкційних сталей широко застосовується також хіміко - термічна обробка (ХТО), зокрема, азотування. Азотовані шари мають високі антикорозійні й міцнісні властивості. Проте, невеликом процесу азотування можна вважати тривалість обробки, невисоку якість отрима-