

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Болгарская Академия наук
ООО «ЛИТТ»

ИННОВАТИКА-2017

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**XIII Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых
20–22 апреля 2017 г.
г. Томск, Россия**

Под ред. А.Н. Солдатов, С.Л. Минькова

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2017

ВЛИЯНИЕ МИКРОДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ6 С КРУПНОЗЕРНИСТОЙ И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРАМИ

Т.Ю. Малеткина^{1,2}, В.М. Савостиков¹, В.С. Бауэр¹, С.В. Галсанов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет*

² *Томский государственный архитектурно-строительный университет*

e-mail: vsbauer@yandex.ru

INFLUENCE OF MICRODEFORMATION ON THE STRENGTH OF ION-PLY-PLASMA COATINGS ON THE TITANIUM ALLOY OF VT6 WIDE-GRAIN AND SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURES

T.Yu. Maletkina^{1,2}, V.M. Savostikov¹, V.S. Bauer¹, S.V. Galsanov¹

¹ *National Research Tomsk State University*

² *Tomsk State University of Architecture and Building*

This article describes the processes of applying antifriction coating on the titanium alloy VT6 and its further investigation on the residual plastic deformation. The study showed that the application of an antifriction coating did not entail softening of the samples.

Keywords: ultrafine structure, tribological gradient-layered coatings, physical and mechanical properties of nanostructured coatings, ion-plasma methods.

Титановые сплавы применяются практически во всех отраслях современной техники. В космонавтике и ракетостроении – это подвижные сопла двигателей; в авиации – механизация крыла, детали крепления, гидроцилиндры, диски и лопатки турбин; в химической промышленности – запорная арматура трубопроводов, насосы; в автомобилестроении – впускные и выпускные клапаны, коромысла клапанов, втулки, торсионные рычаги, детали подвески. Однако титан и его сплавы имеют низкое сопротивление изнашиванию, что обусловлено их высокой химической активностью. Оксидная пассивирующая плёнка, которая придаёт титановым сплавам уникальную коррозионную стойкость, имеет очень малую толщину – около 5 нм и при трении практически сразу разрушается. Это в свою очередь приводит к задираобразованию, интенсифицирует процессы износа, что обуславливает высокий коэффициент трения в парах фрикционных сопряжений практически со всеми металлами и сплавами и кратковременный ресурс работы.

Необходимость снижения материалоемкости изделий в технике привели к развитию методов получения структуры сплавов в ультрамелкозернистом состоянии (субмикроструктурном – средний размер зерен

$d = 100\text{--}500$ нм или нанокристаллическом $d = 100$ нм). Титановые сплавы с ультрамелкозернистой структурой имеют повышенные механические свойства – прочность при удовлетворительной пластичности, повышенный предел выносливости при циклическом нагружении и повышенную размерную стабильность при квазистатическом и циклическом нагружении и при ползучести. Однако задача предупреждения процессов схватывания в парах трения и повышения их износостойкости остается актуальной и для ультрамелкозернистых титановых сплавов.

Для решения этой проблемы разрабатываются различные методы модификации поверхности изделий из титана и его сплавов, покрытия и технологии их нанесения. К наиболее эффективным для титана и его сплавов являются композиционные покрытия, содержащие карбиды, оксиды, MoS_2 [1, 2]. Присутствие карбидов и оксидов хрома, алюминия, кремния позволяет значительно повысить твердость и износостойкость поверхности, а использование сульфида молибдена – MoS_2 , как твердая смазка, обеспечивает снижение коэффициента трения. Способы нанесения таких покрытий включают несколько методов модифицирующей обработки поверхности при достаточно высокой температуре. Однако это не подходит для сплавов с ультрамелкозернистой структурой ввиду угрозы роста зерен и снижения достигнутых при измельчении зерна свойств. Использование современного высокотехнологического оборудования, такого, как газовые плазмогенераторы, позволяет наносить композиционные покрытия различного состава в условиях вакуума или в среде определенного состава при низкой температуре. Поэтому цель исследования – провести сравнительный анализ физико-механических свойств сплава ВТ6 с крупнозернистой и субмикроструктурной структурами, а также покрытий, нанесенных при невысокой температуре.

В данной работе для исследования использовались образцы широко используемого в технике ($\alpha+\beta$) – титанового сплава ВТ6 содержащий ~ 6% Al и ~ 4,5 %V (вес. процентов) с исходной крупнозернистой (КЗ) и субмикроструктурной (СМК) структурами.

Субмикроструктурная структура была получена методом *авс*-прессования в специальной пресс-форме (последовательное прессование со сменой оси сжатия на 90° для предотвращения образования кристаллографической и механической текстуры). Прессование начинали при температуре 1073 К и проводили со ступенчатым понижением температуры до 973 К. Средний размер зерен после прессования составил 0,7 мкм с распределением зерен по размерам в интервале (0,2–1,8) мкм, при этом объемная доля β -фазы практически не изменилась на рисунке 1. Для

повышения износостойкости поверхности наносили композиционное покрытие Ti-C-Mo-S двумя способами: магнетронным и вакуумно-дуговым распылением. Магнетронное распыление осуществляли на установке «Композит-3», содержащей в рабочей камере дуомагнетрон в два распыляемыми катодными мишенями в виде дисков одинакового химического состава Ti-C-Mo-S. Выбор компонентов покрытия обусловлен химическим средством распыляемых элементов с Ti и обеспечивает повышенную адгезию покрытия к подложке. При формировании покрытия в обоих случаях был использован прием предварительного ионно-плазменного легирования поверхности подложки [2]. Режимы формирования покрытия обеспечивали температуру подложки не выше 573 К. Толщина покрытий 1–1,3 мкм. Образцы представляли собой пластины размером 45×6×0,4 мм. Электронно-микроскопическое исследование проводили на растровом электронном микроскопе VEGA3 TESCAN.

Исследование микродеформации проводили при равномерном изгибе по методу Цобкалло, который заключается в огибании плоского консольного зажатого образца по боковой поверхности цилиндрической оправки. Диаграммы нагружения снимали по методу ступенчатой «нагрузки–разгрузки». Величина напряжения при этом задается величиной радиуса оправки. Напряжение рассчитывали по формуле для изгиба плоской пластины:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1}{1+\nu} * \frac{h}{2R} \left(1 - \frac{x_{ост} * 2R}{l_0^2} \right),$$

где E – модуль Юнга, 11000 кг/мм²; ν – коэффициент Пуассона, равный 0,32; R – радиус оправки, мм; h – толщина образца, мм; l_0 – рабочая длина образца, мм; $x_{ост}$ – величина отклонения свободного конца рабочей части образца.

Остаточную деформацию измеряли по отклонению свободного конца образца от нулевого положения с использованием оптической системы и индикатора часового типа, и рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon_{ост} = \frac{x_{ост} * h}{l_0^2}$$

Точность измерения остаточной деформации составила $5 * 10^{-3}$.

Развитие микропластической деформации в сплаве ВТ6 исследовали по диаграмме нагружения, которая представляет собой зависимость накопления остаточной деформации от приложенного напряжения при

статическом нагружении. На рисунке 1 приведены диаграммы нагружения крупнозернистого и СМК сплава ВТ6 без покрытий и с нанесенными покрытиями. Из рисунка 1 видно, что кривые $(\sigma/E \cdot 10^3 - \epsilon \cdot 10^5)$ СМК состояния сплава проходят выше, чем для крупнозернистого, что говорит о более высоком уровне внутренних напряжений, сформированном при авс-прессовании, и более высоком сопротивлении микропластической деформации.

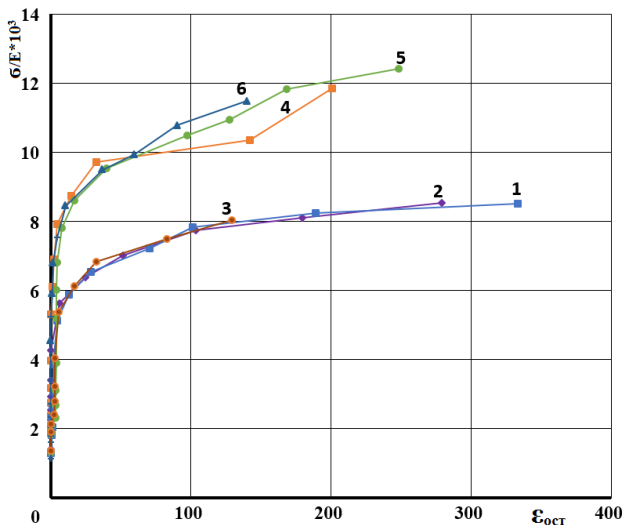


Рис. 1. Диаграмма нагружения сплава ВТ6: 1 – крупнозернистый с покрытием магнетронным способом; 2 – крупнозернистый без покрытия; 3 – крупнозернистый с покрытием вакуумно-дуговым способом; 4 – с субмикроструктурой без покрытия; 5 – с субмикроструктурой и покрытием магнетронным способом; 6 – с субмикроструктурой покрытием вакуумно-дуговым способом

Вид диаграмм нагружения сплава в крупнозернистом и СМК состояниях можно разделить на 2 стадии. Накопление деформации на первой стадии имеет линейную зависимость с высоким коэффициентом упрочнения. При этом, как известно [3], коэффициент упрочнения на первой стадии не зависит от размера зерен, поэтому он одинаков для двух состояний. Вторая параболическая стадия соответствует накоплению остаточной деформации с низким коэффициентом упрочнения, который, тем не менее несколько больше в СМК состоянии сплава. Переход от первой стадии нагружения ко второй связан с началом кооперативной пластиче-

ской деформации зерен путем формирования и распространения полос Людерса–Чернова [3] и увеличением скорости накопления микродеформации. Переход от линейной стадии к параболической есть макроскопический предел упругости σ .

Как видно из рисунка 1, влияние покрытия и способа его нанесения на развитие микродеформации в крупнозернистом состоянии сплава не наблюдается, в то время как в СМК состоянии покрытие, полученное как магнетронным, так и вакуумно-дуговым распылением, увеличивает сопротивление развитию микродеформации и связано, вероятно, с более высоким модулем упругости покрытий.

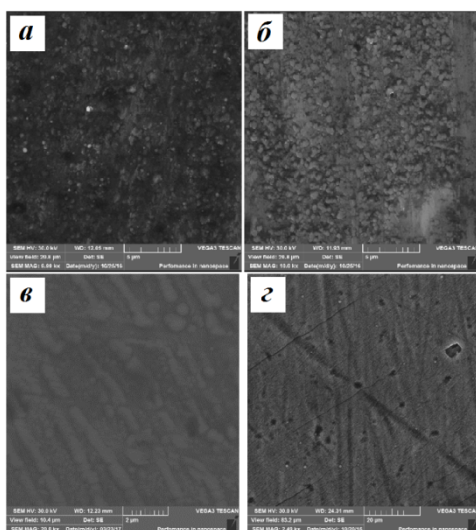


Рис. 2. Сплав ВТ6: *а* – СМК структура с вакуумно-дуговым покрытием; *б* – СМК с магнетронным покрытием; *в* – КЗ структура с магнетронным покрытием; *г* – КЗ структура с магнетронным покрытием после механических испытаний

Исследования с помощью растрового электронного микроскопа показывают (рис. 2а и 2б), что поверхность покрытия, нанесенного методом магнетронного напыления, имеет более однородную и плотную структуру без видимых дефектов (трещин, пор и др.), по сравнению с микродуговым покрытием. Основными элементами рельефа являются островки в виде куполообразных зерен. При этом хорошо проявлена структура $(\alpha+\beta)$ фазы (рисунок 2в). При увеличении в $1 \cdot 10^4$ раз на рисунке 2 видно, что

покрытие состоит из мелких зерен, вероятно, аморфной или нанокристаллической структуры, учитывая невысокую температуру нанесения покрытия. Отличительной чертой морфологии обоих покрытий является различная величина дисперсии распределения зерен по размерам. Отличие в морфологии покрытий связано с тем, что метод вакуумно-дугового осаждения обладает такими достоинствами как высокая скорость распыления катодного материала (а значит, и высокая скорость осаждения покрытий) и высокая степень ионизации распыляемых атомов и молекул.

Однако к его недостаткам относится присутствие в плазменном потоке рабочего вещества относительно крупных (от единиц до десятков микрон) частиц так называемой «капельной фазы», которые приводят к неоднородности и дефектности структуры осаждаемого покрытия, снижению прочности его сцепления с подложкой. Метод магнетронного распыления позволяет генерировать ионизированные потоки рабочего вещества практически однородного атомарного вида. Но по плотности генерируемого плазменного потока и скорости осаждения покрытий этот метод уступает вакуумно-дуговому распылению.

Исследование покрытий после механического испытания на микродеформацию показало, что на поверхности образцов с магнетронным покрытием, подвергавшейся растяжению при деформации на оправке, появились разрыв в направлении, перпендикулярном оси образца (рис. 2г). На поверхности образцов с микродуговым покрытием разрывов покрытия не наблюдается, что связано, вероятно, с большей толщиной покрытия.

Проведенные исследования показывают, что субмикрокристаллическая структура сплава ВТ6 обладает более высоким сопротивлением микродеформации. Антифрикционные покрытия, нанесенные методами микродугового и магнетронного напыления, повышают сопротивление микродеформации для СМК состояния сплава и не оказывают влияния на сопротивление микродеформации в крупнозернистом состоянии.

Литература

1. Пат. 2427666. Российская Федерация, МПК⁷С22F 1/18, С23С 8/36. Способ упрочнения поверхности изделий из титановых сплавов; опубл. 27.08.2011. Бюл. № 24.
2. Пат. 2502828. Российская Федерация, МПК⁷С23С14/34, С23С14/02. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы; опубл. 27.12.2013.
3. Дударев Е. Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов / Е.Ф. Дударев; Сиб. физ.-техн. ин-т им. В. Д. Кузнецова при Том. гос. ун-те. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1988. – 254 с.