

УДК 539.43; 539.53+623.4

УПРОЧНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

д-р техн. наук, проф. Б.А. ЛЯШЕНКО, А.В. РУТКОВСКИЙ
(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев),
канд. техн. наук В.И. МИРНЕНКО
(Национальная академия обороны Украины, Киев)

Предложено решение проблемы повышения эффективности использования деталей из титановых сплавов путем формирования на поверхности многофункциональных защитных покрытий. Показана целесообразность применения вакуум-плазменной технологии для повышения характеристик прочности и эрозионной стойкости титановых сплавов при температурах до 640 °С.

Введение. Конструкционная прочность и надежность машин существенным образом зависят от выбора материалов для их изготовления. Наиболее ценными конструкционными материалами являются сплавы, которые объединяют в себе важные эксплуатационные качества: высокую прочность, стойкость к агрессивной среде, достаточную прочность при повышенных температурах и др. К таким материалам можно отнести титановые сплавы. Наибольшее применение титан находит в аэрокосмической промышленности [V]. В авиастроении применение титановых сплавов в деталях простой конфигурации экономически целесообразно, если это дает около 30 % экономии веса, а в деталях сложной формы - уже при 10 % экономии веса. Одно из важнейших достоинств таких сплавов - превышение стальных сплавов в 2 раза по удельной прочности в диапазоне температур до 300 °С. Предел прочности σ_b сложнелегированных титановых сплавов достигает 1500 МПа при относительном удлинении при разрыве 8 до 15 %. Жаропрочные титановые сплавы эксплуатируются в интервале температур до 700 °С. Коррозионная стойкость титановых сплавов во многих агрессивных средах находится на уровне стойкости серебра и платины.

Сдерживает применение титановых сплавов низкое сопротивление ползучести при температурах выше 550 °С, невысокая устойчивость к вибрациям, взаимодействие с газовой средой при повышенных температурах. В узлах трения эти сплавы неработоспособны без упрочняющей поверхностной обработки и покрытий.

В практике поверхностного упрочнения титановых сплавов известно применение практически всех традиционных технологий упрочняющих покрытий. Хотя накоплен значительный опыт по улучшению механических и триботехнических характеристик титановых сплавов, удовлетворительного решения получено не было. Общим недостатком являлось то обстоятельство, что улучшение одной характеристики при нанесении покрытия приводило к существенному снижению остальных характеристик. Например, повышение эрозионной стойкости сопровождалось снижением предела выносливости и т.п.

Цель настоящей работы заключалась в создании многофункционального многослойного покрытия на Ti-сплаве и технологии его нанесения при одновременном повышении всего комплекса его характеристик прочности и эрозионной стойкости.

Методы исследования. Для исследования технологического процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий использован метод многофакторного планирования эксперимента и математической обработки статистических данных, позволяющий представить процесс формирования покрытий в виде функциональных зависимостей входных и выходных параметров. В качестве критериев оптимизации были выбраны характеристики прочности и эрозионной стойкости композиции «основа - покрытие»: предел прочности, условный предел текучести, изотермическая и термоциклическая ползучесть, предел выносливости и интенсивность изнашивания абразивными частицами. Выбирая управляемые факторы, к изучению технологического процесса формирования вакуум-плазменных покрытий подходили комплексно, т.е. учитывали влияние конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов.

В качестве технологии покрытий выбран метод PVD (физическое осаждение из парогазовой фазы), который является наиболее перспективным в промышленности как Украины, так и зарубежья. Технология нанесения включает три этапа: ионную очистку поверхности, плазмохимический синтез испаряемого материала в объеме камеры и на поверхности, а также конденсацию покрытия на детали. Использована и модернизированная установка ННВ-6,6-И1 типа «Булат» с одновременным распылением материалов из трех катодов (мишеней) в импульсном режиме, наличием дополнительного нагревателя и устройства для сепарации плазменного потока.

Для экспериментальных исследований влияния вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N (всего 16 модификаций) на характеристики прочности и эрозионной стойкости в качестве материала основы использован Ti-сплав BT20.

Соответствующие испытания проводили на лабораторных образцах, изготовленных из листового титанового сплава, толщиной 1,0 мм как в исходном состоянии, так и после нанесения соответствующих вакуум-плазменных покрытий. Испытания на кратковременную статическую прочность и пластичность

при осевом растяжении проводили в соответствии ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 25.505-85 в жестком режиме со скоростью перемещения активного захвата = 5 мм/мин, что приблизительно соответствует скорости нагружения 30 МПа·с⁻¹ с записью диаграммы растяжения в координатах «усилие - деформация».

Сравнительные испытания на изотермическую и термоциклическую ползучесть при фиксированном уровне напряжения (0,8 σ_b) проводили также в условиях осевого растяжения при нагреве рабочей части образца путем фокусирования лучевой энергии в замкнутой оптической безынерционной системе. Это позволяет нагревать образец до 1000 °С, без влияния электромагнитопластического эффекта и осуществлять охлаждение образца со скоростью до 100 град/с. Характеристики термического цикла: 350 °С <-> 640 °С, время нагревания - 10 с, охлаждения - 15 с.

Оценка влияния вакуум-плазменных покрытий на сопротивление многоциклового усталости титановых сплавов производилась с помощью высокочастотных (до 10 кГц) ускоренных усталостных испытаний на консольный изгиб при нагреве образца от источника инфракрасного излучения до температуры 640 °С.

Сравнительные испытания на эрозионную стойкость проводили при помощи центробежного ускорителя (ГОСТ 2301-78), который позволяет моделировать процессы изнашивания. В качестве абразива использовался кварцевый песок дисперсностью 200 мкм, длительность его влияния составляла 2 ч. Скорость вращения ротора центробежного ускорителя - 3000 об/мин, при этом скорость вылета частиц достигала 80 м/с. Образцы устанавливали под углами 30,45, 75 и 90° к вектору скорости вылетающих из ротора частиц.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Проходя через сепаратор, капельная фаза ионизированного потока задерживается на его пластинах, что позволяет получать вакуум-плазменные покрытия TiN, (TiAl)N и (TiC)N с минимальной шероховатостью поверхности. Шероховатость поверхности титанового сплава BT20 с покрытиями определяли профилографом-профилометром 201ТО. Результаты приведены на рис. 1.

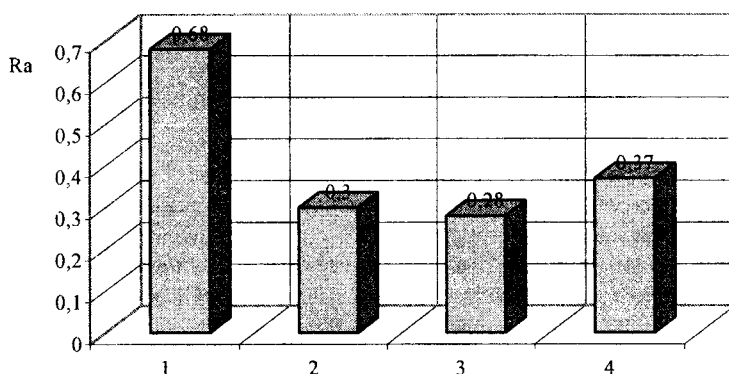


Рис. 1. Диаграмма изменения шероховатости поверхности титанового сплава BT20: 1 – без покрытия; 2 – покрытие TiN; 3 – покрытие (TiAl)N; 4 – покрытие (TiC)N

Исследования на микротвердость проводили согласно ГОСТ 9450-76 при помощи ПМТ-3, угол между противолежащими гранями алмазной пирамидки составлял 136° при нагрузке 100 г. Результаты микротвердости сплава BT20 без покрытия и с покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N приведены на рис. 2.

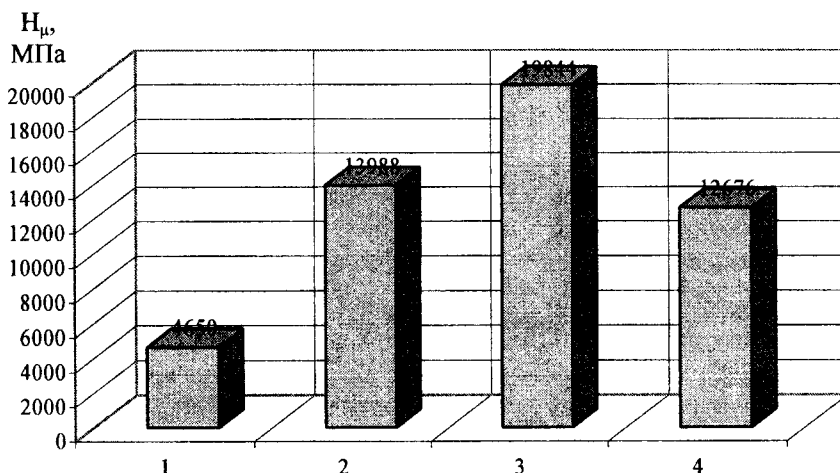


Рис. 2. Диаграмма изменения микротвердости титанового сплава BT20: 1 – без покрытия; 2 – покрытие TiN; 3 – покрытие (TiAl)N; 4 – покрытие (TiC)N

Испытания на изотермическую и термоциклическую ползучесть титанового сплава BT20 с вакуум-плазменными покрытиями проведены на установке «Щелкунчик» с фокусированным радиационным нагревом и охлаждением [2]. Методика позволяет проводить ускоренные испытания на термоциклическую ползучесть при высоких скоростях нагрева и охлаждения.

Для испытания на ползучесть при растяжении используют стандартный образец. Основными повреждающими факторами в ускоренных термоциклических испытаниях являются резкие теплосмены. Ползучесть при постоянной статической нагрузке является чувствительным инструментом для фиксации изменения состояния как покрытия, так и поверхности раздела «основа - покрытие».

Кривые изотермической ползучести сплава BT20 с покрытием (TiAl)N приведены на рис. 3. Покрытие препятствует газонасыщению поверхностного слоя титанового сплава. Это резко снижает скорость ползучести, позволяет повысить температуру эксплуатации деталей [3].

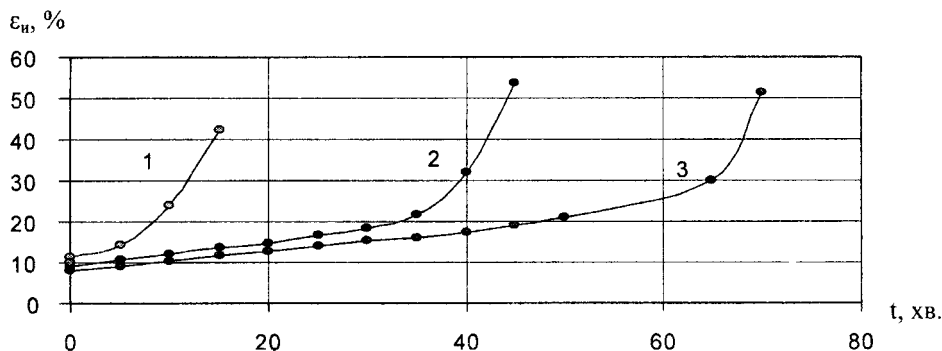


Рис. 3. Кривые изотермической ползучести сплава BT20 с покрытием (TiAl)N:
1 - без покрытия ($T = 590\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 - покрытие (TiAl)N ($T = 623,4\text{ }^{\circ}\text{C}$); 3 - покрытие (TiAl)N ($T = 606,7\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На рис. 4. приведены кривые термоциклической ползучести сплава BT20 с покрытием (TiAl)N. Статическая нагрузка составляла $0,8\sigma_b$. Нагрев и охлаждение образца осуществляли с максимальной скоростью до 100 град/с . Покрытие снижает скорость ползучести в 2...4 раза и повышает температурный интервал эксплуатации титанового сплава.

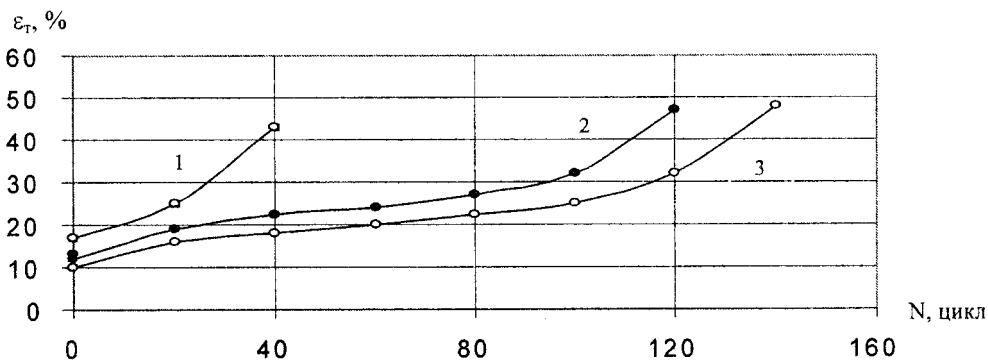


Рис. 4. Кривые термоциклической ползучести сплава BT20 с покрытием (TiAl)N:
1 - без покрытия при $T = 610 \leftrightarrow 390\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - покрытия (TiAl)N при $T = 623 \leftrightarrow 400\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3 - покрытия (TiAl)N при $T = 606 \leftrightarrow 389\text{ }^{\circ}\text{C}$

В качестве критериев оценки эрозионной стойкости использована потеря массы образца и интенсивность изнашивания K . Зависимость интенсивности изнашивания K титанового сплава BT20 от угла атаки абразива α приведена на рис. 5. Материал покрытия - (TiAl)N. Основной кинематический параметр, определяющий характер разрушения материала, - угол падения абразива. Максимальная интенсивность изнашивания титанового сплава как с покрытием, так и без наблюдается при угле атаки 15° . Кроме этого, определено, что в зависимости от параметров технологического процесса эрозионная стойкость титанового сплава с вакуум-плазменными покрытиями возрастает до 10 раз [4].

Большинство покрытий на титановых сплавах, повышающих износостойкость, приводят к снижению предела многоциклового выносливости. Эта важнейшая характеристика определена на ультразвуковой установке при изгибных резонансных колебаниях образца с различными покрытиями при частоте нагружения 10 кГц [5].

Результаты испытаний для различных вариантов покрытий на титановом сплаве BT20 приведены на рис. 6 (для покрытия (TiAl)N). Все варианты покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N повышают предел выносливости σ_{-1} .

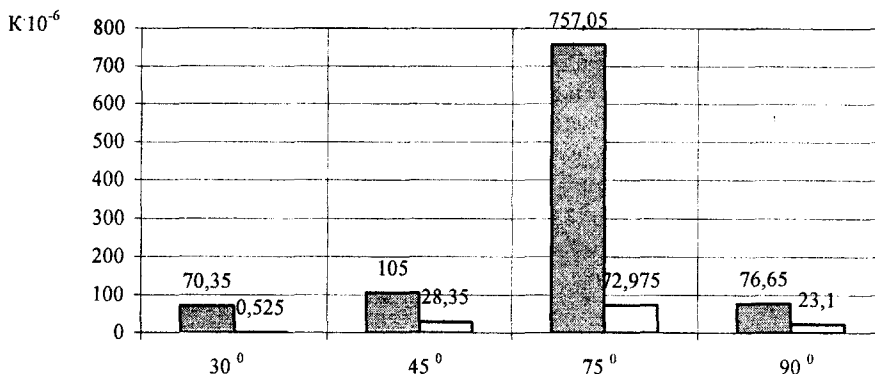


Рис. 5. Зависимость эрозионной износостойкости сплава BT20 от угла атаки абразива α :

■ – без покрытия; □ – покрытие (TiAl)N

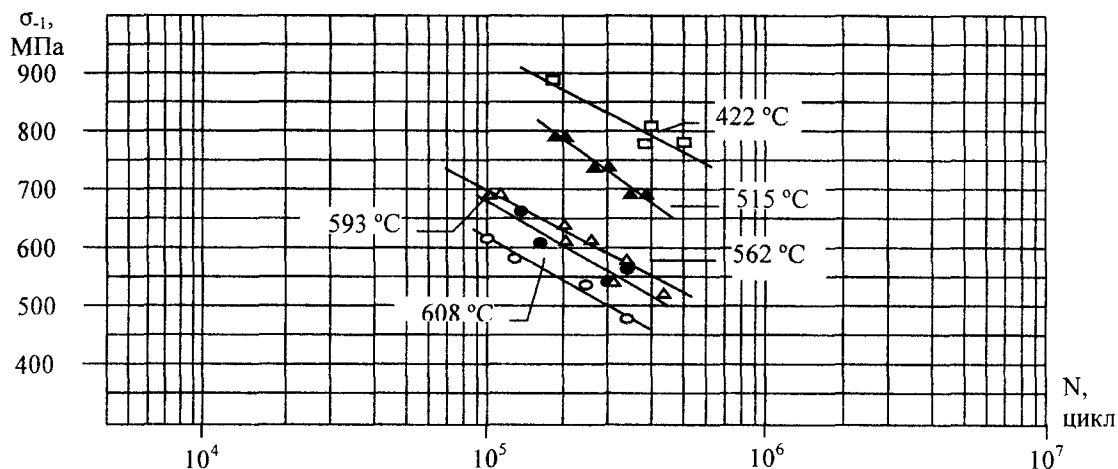


Рис. 6. Усталостная прочность титанового сплава BT20 с покрытием (TiAl)N

Выводы

1. Вакуум-плазменные покрытия многократно повышают комплекс механических характеристик титановых сплавов в зависимости от материала покрытия и режимов его нанесения. Наилучшие характеристики имеют титановые сплавы с покрытием (TiAl)N.

2. Использование многофункциональных покрытий создает возможность существенно влиять на эксплуатационную надежность и долговечность конструктивных элементов из титановых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк и др. - Запорожье: Мотор Сич, 2000. - 110 с.
2. Ляшенко Б.А., Гречанюк Н.И. Оптимизация и ресурс теплозащитных покрытий деталей ГТД // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: Труды междунар. конф. - Киев: ИПП НАН Украины. - 2000. - С. 819 - 824.
3. Мірненко В.І., Рутковський А.В., Петренко А.М. Вплив вакуум-плазмових покриттів на ізотермічну та термоциклічну повзучість титанового сплаву BT20 // Вісник Черкаського державного технологічного університету. - Черкаси: ЧДТУ. - 2004. - № 1. - С. 41 - 45.
4. Газоабразивна стійкість титанового сплаву BT20 з вакуум-плазмовими покриттями / Б.А. Ляшенко, В.І. Мірненко, А.В. Рутковський, А.М. Петренко // Проблеми трибології. - 2004. - № 2. - С. 142 - 149.
5. Трапезой А.Г., Мирненко В.И., Бондарь А.В. Циклическая прочность титановых сплавов при нормальных и повышенных температурах в условиях высокой частоты нагружения // Вібрації в техніці та технологіях. - 2004. - № 5(37). - С. 85 - 88.