

на внешней). В результате попадания ионов между сетками, они разгоняются и выбрасываются в пространство, ускоряя корабль, согласно третьему закону Ньютона. Электроны, пойманные в катодную трубку, выбрасываются из двигателя под небольшим углом к соплу и потоку ионов. Это делается, во-первых, для того, чтобы корпус корабля оставался нейтрально заряженным, а во-вторых, чтобы ионы, «нейтрализованные» таким образом, не притягивались обратно к кораблю.

Недостаток двигателя в его нынешних реализациях – очень слабая тяга (порядка 50–100 мН). Таким образом, нет возможности использовать ионный двигатель для старта с планеты, но, с другой стороны, в условиях невесомости, при достаточно долгой работе двигателя, есть возможность разогнать космический аппарат до скоростей, недоступных сейчас никаким другим из существующих видов двигателей.

УДК 533.762.4

Демуськов П.А.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ Ti ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

БНТУ, Минск

Научный руководитель: Асташинский В.М.

Титан и титановые сплавы благодаря таким свойствам, как низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и биосовместимость находят широкое применение во многих отраслях промышленности, таких как авиастроение, судостроение и производство имплантатов. Однако высокое значение коэффициента трения и низкая износостойкость не позволяют использовать титан в парах трения. В связи с этим разрабатывают различные способы модификации титана и его сплавов. Традиционный способ – формирование высокотемпературной

β -фазы титана, стабилизированной при комнатной температуре легирующими элементами. Среди многообразия методов поверхностной модификации (термическое и химико-термическое воздействие, нанесение защитных покрытий, обработка электронными, ионными и плазменными потоками и др.) наибольшее распространение получил процесс азотирования, связанный с насыщением поверхностных слоев азотом и образованием нитрида титана, характеризующегося высоким значением твердости. Анализ современных способов азотирования титана (плазменное и лазерное азотирование, термическая обработка в атмосфере азота и др.) показал, что используемые методы позволяют создать нитридные слои толщиной до 3 мкм и твердостью до 9ГПа. Разработка способа модификации, обеспечивающего одновременное азотирование и легирование необходимыми элементами – перспективное направление в области создания новых многофункциональных материалов на основе титана.

Ранее проведенные исследования показали перспективность использования компрессионных плазменных потоков (КПП) для улучшения механических характеристик поверхностных слоев стали путем насыщения поверхностного слоя атомами плазмообразующего вещества (азот) и одновременного легирования атомами переходных металлов, причем время обработки составляло $\sim 10^{-4}$ с при толщине модифицированного слоя до 20 мкм. Улучшение механических свойств достигалось формированием нитридов и метастабильных фаз (пересыщенных твердых растворов, высокотемпературных фаз). Таким образом, КПП позволяют синтезировать поверхностные композиционные слои различного функционального назначения с высокой адгезией к матрице. Фазовый и элементный состав таких слоев контролируется параметрами обработки.

Объекты исследования – образцы (размером $10 \times 10 \times 2$ мм) технически чистого титана марки ВТ1-0 с максимальным содержанием примесей (состав в вес. %: 0,18 Fe; 0,12 O; 0,07 C; 0,04 N; 0,01 H). Осаждение покрытий хрома и молибдена осуществляли на установке ВУ-2МБС методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой при следующих параметрах процесса: ток горения дуги 100 А (осаждение хрома) и 180 А (осаждение молибдена), отрицательное напряжение смещения 120 В (осаждение хрома) и 60 В (осаждение молибдена), время предварительной очистки 1 мин, время нанесения 10 мин. Данные режимы позволяют сформировать покрытия хрома и молибдена толщиной ~ 1 мкм и $\sim 2,5$ мкм, соответственно.

Обработку сформированных систем «хром – титан» и «молибден – титан» компрессионными плазменными потоками проводили в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре (МПК) компактной геометрии в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откаченную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом (азотом) до давления 400 Па. Длительность разряда составляла ~ 100 мкс, напряжение на накопительной батарее конденсаторов 4 кВ. Плотность энергии, поглощенной образцом за импульс (Q), варьировали в диапазоне $13\text{--}35$ Дж/см² путем изменения расстояния между образцом и катодом от 12 до 6 см, соответственно. Обработку образцов проводили тремя последовательными импульсами, интервал времени между которыми составлял 20 с.

Морфологию и элементный состав поверхности исследовали с помощью растровой электронной микроскопии на установке LEO1455VP с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Rontec. С целью выявления микроструктуры образцов проводили химическое травление поперечных шлифов электролитом следующего состава: HF – 0,5 мл, HNO₃ – 2,5 мл, HCl – 1,5 мл, H₂O – 2,5 мл. Время травления – 5 с.

Распределение элементов по глубине исследовали методом Оже-электронной спектроскопии при пошаговом распылении поверхностного слоя ионами аргона с использованием спектрометра РНИ-660. Фазовый состав обработанных систем определяли с помощью рентгеноструктурного анализа на диффрактометре ДРОН 4-13.

Измерение микротвердости проводили методом Виккерса на приборе ПМТ-3 с нагрузкой в диапазоне 0,5–2,0 Н, время действия нагрузки составляло 15 с. Трибологические испытания осуществляли на установке ТАУ-1М (по схеме «палец – плоскость») при возвратно-поступательном движении индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8, со скоростью 4 мм/с в условиях сухого трения.

ВЫВОДЫ

1. Воздействие компрессионных плазменных потоков с выборочными приводит к формированию поверхностного легированного слоя толщиной 11–27 мкм, содержащего фазы α -Ti, α' -Ti и β -Ti, объемная доля которых определяется концентрацией легирующего элемента и параметрами обработки.

2. Повышение плотности поглощенной энергии ведет к увеличению толщины легированного слоя и, как следствие, к уменьшению концентрации легирующего элемента. В исследуемом диапазоне режимов обработки концентрация молибдена варьируется в диапазоне 10,7–1,4 ат.%, а хрома 6,8–0,1 ат.%.

3. Использование азота в качестве плазмообразующего вещества обуславливает насыщение поверхности титана атомами азота и формирование нитридов. С увеличением плотности поглощенной энергии концентрация азота в поверхностном слое уменьшается.

4. Легирование титана с помощью компрессионных плазменных потоков позволяет увеличить микротвердость в 1,5–2,5 раз и уменьшить коэффициент трения в случае легирования хромом в 4,6 раза.