

## Сравнительный анализ технологий азотирования титановых сплавов

Студент группы 10405520 Лигорская К.С.  
Научный руководитель Булойчик И.А.  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск

В настоящее время для улучшения эксплуатационных свойств сплавов на основе титана широкое применение получили процессы насыщения азотом. Преимуществом данной обработки является повышение ряда эксплуатационных характеристик, а именно: модуль упругости и коррозионная стойкость, особенно важных при использовании указанных сплавов в протезировании суставов человека. На данный момент, наиболее широко распространенными способами насыщения поверхности сплавов азотом являются: газовое азотирование (ГА) [1, 2], ионное азотирование (ИА) [3, 4] и ионная имплантация (ИИ) [5, 6]. ГА осуществляется при высоких температурах и требует большой длительности выдержки, что является определенным недостатком при реализации азотирования указанным способом. Существенным преимуществом ИА перед ГА является уменьшение времени реализации процесса азотирования при сохранении эксплуатационных свойств формируемых азотированных диффузионных слоев. В этой работе приводится анализ исследований, посвященных различным способам азотирования титановых сплавов. Для сравнения выбрали способы газового азотирования (ГА), ионного азотирования (ИА) в плазме тлеющего и дугового разрядов, а также способы комбинированной ионной обработки титановых сплавов, включающая ИА с последующей упрочняющей ионно-плазменной обработкой, либо ИА с последующей ионной имплантацией (ИИ).

Процесс газового азотирования (ГА) стандартно осуществляется при высоких температурах. Для титана реальные температуры азотирования составляют 850 – 1000 °С, в результате чего могут изменяться объемные параметры образцов и понижаются показатели конструкционной прочности в результате увеличения размеров структуры. Процесс (ГА) реализуется при длительных выдержках порядка 30 – 60 ч и более.

По способу реализации процесса технологии ионно-плазменного азотирования можно разделить на три направления: ИА в тлеющем разряде, ИА в дуговом разряде и комбинированную ионную обработку титановых сплавов. В свою очередь, работы по ИА в тлеющем разряде подразделяются на традиционное ИА в тлеющем разряде и ИА в тлеющем разряде с полым катодом.

Классификация видов азотирования представлена на рисунке 1 [10].



Рисунок 1 – Классификация основных видов ионного азотирования титановых сплавов [10].

Работы по ИА в дуговом разряде разделены в зависимости от использования разряда холодного или горячего катодов. Комбинированная ионная обработка подразделена на ИА с последующим осаждением ионно-плазменных покрытий и ИА с последующей ИИ.

Использование диффузионного насыщения азотом в плазме газовых разрядов (ИА) позволяет повысить скорость насыщения поверхностной зоны сплава атомами азота, а также обеспечить формирование определенного типа структур приповерхностного азотированного слоя при более низких температурах насыщения, в сравнении со способом азотирования в газовой атмосфере (ГА) с учетом сохранения механических свойств сформированного диффузионного слоя (так как основным назначением азотирования титановых сплавов является повышение твердости и износостойкости поверхности сплава при работе в условиях трения).

В последнее время перспективу представляет возможность модификации свойств поверхности титановых сплавов использованием комбинаций различных методов ионно-плазменной обработки, включающих ИА, осаждение покрытий и ИИ. Такие комбинации различных методов обработки позволяют сочетать их достоинства, повысить износостойкость и срок службы обработанных изделий. Комбинированные методы обработки, включающие ИА и осаждение ионно-плазменных покрытий, успешно используются для модификации свойств поверхности сталей [7, 8]. Например, в работе [7] рассмотрен способ вакуумно-дуговой модификации поверхности стальных изделий, заключающийся в использовании азотирования в дуговом разряде при положительном потенциале и дальнейшем осаждении сверхтвердых покрытий с использованием методов ИИ. В работе [8] для повышения износостойкости поверхности деталей использовали процесс ИА с последующим нанесением износостойкого нитридного слоя на основе молибдена (MoN). Упрочненная глубина такого слоя составляет от 170 до 180 мкм.

Согласно информации, полученной на основании анализа данных источника [9], возможно получение вакуумно-плазменных нанослойных покрытий из титановых сплавов путем совмещения процессов электродугового осаждения и ионной имплантации. На поверхности исследуемых образцов проводили вакуумно-плазменное осаждение выбранного металлического подслоя и нанослоев из нитридов, либо карбо-нитридов алюминия, соединений титана, циркония и алюминия с азотом. При этом, после осаждения подслоя и каждого нанослоя, производили дополнительную обработку методом ионной имплантации. Экспериментальные данные авторов [9] показали повышение стойкости образцов из титана после комбинированной обработки в условиях коррозии в среде NaCl (до 1,5 раза), капельно-ударной эрозии (до 2,1 раза) и газоабразивной эрозии (в 2,5 раза) по сравнению с покрытиями без обработки [9].

В работе [10] представлены исследования способов формирования износостойких слоев сформированных на титановых сплавах различными методами азотирования, в том числе и их комбинирования. В качестве базового метода рассмотрено ГА в комбинации с азотированием в тлеющем разряде (АТР), а также ионной имплантацией. Представлены результаты исследования фазового состава нитридных слоев и особенностей механизма насыщения азотом из газовой фазы. Исследовано изменение показателей микротвердости и шероховатости поверхности, представлены результаты измерения износостойкости сформированных слоев. На рисунке 2 представлено распределение микротвердости по сечению упрочненного поверхностного слоя сплава ВТ6 после азотирования [10].

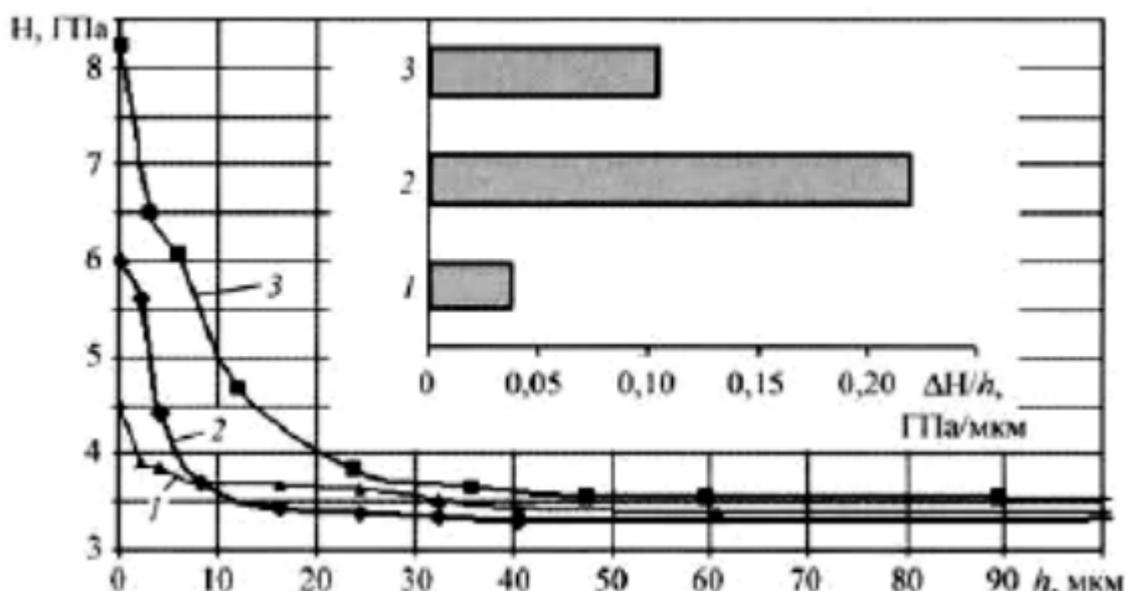


Рисунок 2 – Распределение микротвердости по сечению упрочненного поверхностного слоя сплава ВТ6 после азотирования: 1 - ГА; 2 - ГА+ИИ; 3 - ГА+АТР [10]

Согласно данным, представленным на рисунке 2, можно сделать вывод о повышении износостойкости сформированных нитридных слоев в условии комбинированной обработки методами ГА и АТР. Авторы объясняют это тем, что последовательное проведение ГА и АТР позволяет формировать азотированный слой с нитридной пленкой на поверхности при плавном градиенте твердости по сечению приповерхностных слоев, что обеспечивает повышение трибологических свойств образца в целом.

Таким образом с учетом результатов проанализированных исследований, можно сделать вывод о том, что комбинация различных способов азотирования, а также ряда дополнительных обработок, таких, например, как ионная имплантация ИИ, позволяет повысить износостойкость поверхностных слоев, сформированных на титановых сплавах. Наиболее перспективным сочетанием является последовательное проведение газового ГА и АТР (ионно-плазменного азотирования в тлеющем разряде), поскольку такая комбинация способов насыщения не только лучше повышает износостойчивость нитридного слоя, но также способствует сохранению механических свойств титановой матрицы образца.

#### Список использованных источников

1. С. Малинов, А. Зечева, В. Ша. Связь микроструктуры и свойства промышленных титановых сплавов с параметрами процесса азотирования из газовой фазы // МиТОМ. 2004, №7, с. 21-28.
2. В.Г. Хижняк, М.М. Бобина, О.М. Соловар. Зносостійкі покриття на основі азоту на сплаві ВТ9 // Problems of friction and wear. 2013, №1(60), p. 61-66.
3. Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шпис, З. Бемер. Теория и технология азотирования. М.: «Металлургия», 1991, 320 с.
4. И.М. Пастух. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде: Монография. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006, 364 с.
5. Т.Д. Раджабов, А.С. Багдасаров. Изменение поверхностной микротвердости и износостойкости сплава титана в результате ионного азотирования // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986, №11, с. 104-111.
6. С.Н. Братушка, С.В. Соколов. Влияние плазменной обработки и ионной имплантации на свойства и структурно-фазовые изменения в титановых сплавах // ФИП PSE. 2012, т. 10, №2, с. 4-27.

7. А.А. Андреев. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий // Физическая инженерия поверхности. 2007, №3-4, с. 140- 148.
8. В.А. Белоус, Н.С. Ломино, Ю.А. Заднепровский, И.Г. Ермоленко. Упрочнение поверхности деталей узла трения для блока парораспределения турбин комбинированным методом обработки // Труды 5 Международной конференции "HighMatTech", 05 – 08 октября 2015 г., Киев, Украина, с. 72
9. А.М. Смыслов, А.Д. Мингажев, М.К. Смыслова, К.С. Селиванов, А.А. Мингажева. Нанослойное покрытие для лопаток турбомашин из титановых сплавов // Вестник УГАТУ. 2011, т. 15, №1(41), с. 109-112.
10. И.Н. Погрелюк, О.И. Яськив, В.Н. Федирко, И.М. Пастух, Н.С. Машовец. Применение комбинированных методов азотирования для формирования износостойких покрытий на титановых сплавах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007, №7(31), с. 29-33.