

05

Повышение прочностных характеристик титана при имплантации ионами аргона

© И.В. Перинская, И.В. Родионов, Л.Е. Куц[¶], О.Д. Тищенко

Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия
[¶] E-mail: kuts70@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 сентября 2017 г.

Исследовано влияние имплантации ионов аргона при ускоряющем напряжении 40–130 kV в диапазоне доз $(1-4) \cdot 10^{16}$ ион/см² на морфологию, микротвердость и усталостную прочность титана. Предложен способ упрочнения и модификации поверхности титана ионами аргона (Ar⁺), открывающий новые возможности его применения в электротехнических устройствах энергетического, химического и металлургического машиностроения.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.10.46104.17030

Проблемы науки и технологии, связанные с методами поверхностной обработки конструкционных материалов, в частности титановых сплавов, подвергающихся воздействию агрессивных сред и применяемых в энергетическом, химическом и металлургическом машиностроении, стимулируют экспериментальные и теоретические исследования физических процессов, моделирование физических явлений при разработке новых технологических методик [1].

Для улучшения механических характеристик конструкционных материалов используется группа технологических методов: вакуумно-конденсационное напыление, микродуговое и термическое оксидирование, цементация, азотирование и другие методы формирования покрытий и функциональных слоев [2–6]. Однако каждый из этих методов недостаточно эффективен для изменения структуры поверхности, придания высокой усталостной прочности и коррозионной стойкости.

Одним из перспективных методов поверхностной обработки материалов, расширяющих возможности влияния на характеристики поверхности и приповерхностного слоя (глубиной до 100 nm), является ионная имплантация. При этом актуальной научной задачей является

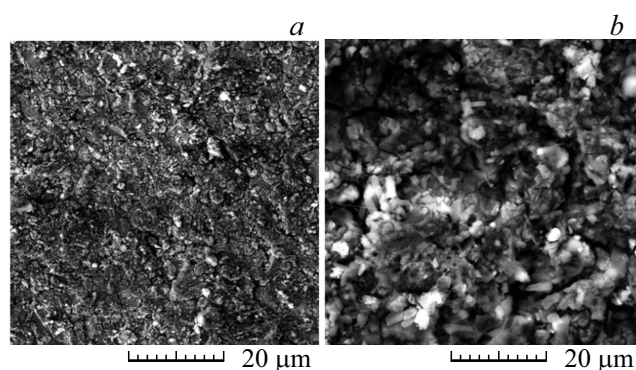


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности титана, модифицированного ионами аргона ($U_{acc} = 75 \text{ kV}$). $F = 1.25 \cdot 10^{16}$ (a) и $3.2 \cdot 10^{16} \text{ ion/cm}^2$ (b).

экспериментальное исследование и моделирование физических явлений, сопровождающих ионно-лучевую обработку поверхности титана ионами аргона (Ar^+) в углеродсодержащей среде с целью создания на поверхности титана углеродсодержащего покрытия с повышенными механическими характеристиками. Таким образом, цель настоящей работы заключается в исследовании влияния процесса имплантации аргона на механические свойства поверхности титана в зависимости от ускоряющего напряжения и дозы ионов.

Экспериментальные образцы титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807–91) представляли собой пластины размером $25 \times 20 \text{ mm}$ с толщиной 2 mm . Механически обработанная, полированная и химически отчищенная поверхность титановых образцов подвергалась ионно-лучевой обработке ионами аргона в среде углекислого газа при пониженном давлении ($\sim 10^{-3} \text{ Pa}$) на установке ионного легирования „Везувий-5“ при различных режимах ускоряющего напряжения U_{acc} и дозах имплантации ионов F .

Микротвердость поверхности измерялась методом вдавливания алмазного индентора на твердомере HVS-1000В при нагрузке 20 gf в течение 15 s (ГОСТ 2999–75). Испытания на усталостную прочность проводились по схеме консольного изгиба до разрушения. При этом максимальное изгибающее напряжение по сечению образца находилось

Таблица 1. Данные ВИМС по количественному содержанию углерода и углеродсодержащих фаз в модифицированном слое титана

Элемент, соединение	Масса, u	Содержание, rel. un.	
		Исходная поверхность	Модифицированная поверхность
C	12	500	600
CH	13	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
CH ₂	14	190	230
CH ₄	16	180	220
CO	28	1600	4700
CO ₂	44	250	750

в интервале значений 240–450 МПа при частоте цикла нагрузки 22.5 Hz (ГОСТ 25.502–79).

Морфологические изменения фиксировались с помощью растрового электронного микроскопа с холоднополевой эмиссией JSM-6701F (ускоряющее напряжение 0.5–30 kV).

Электронно-микроскопические исследования показали, что при дозах $\sim 1.25 \cdot 10^{16}$ ion/cm² поверхность титана сохраняет вид, характерный для необлученных образцов (рис. 1, *a*). При дозе $3.2 \cdot 10^{16}$ ion/cm², соответствующей химической пассивации, на его поверхности возникали вытянутые ориентированные образования, система которых схожа с дендритной (рис. 1, *b*).

Исследование химического состава поверхностных слоев методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) показывает повышение концентрации углерода на поверхности и в приповерхностном слое титана (табл. 1).

Изменение морфологии и химического состава поверхности титановых образцов после модифицирующей обработки в среде углекислого газа при пониженном давлении в диапазоне экспериментально полученных доз ионов Ag⁺ ($1.25–3.2$) $\cdot 10^{16}$ ion/cm² с ускоряющим напряжением 40–130 kV свидетельствует о формировании на ней углеродсодержащей беспористой пленки.

Предлагаемый механизм формирования на титановой поверхности углеродсодержащей беспористой пленки связан с полимеризацией ато-

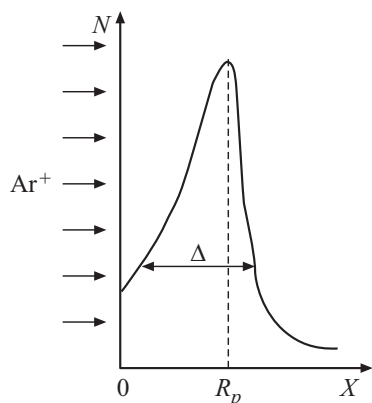


Рис. 2. Профиль распределения имплантируемых ионов Ag^+ в слое металла. R_p — просцируемый пробег ионов.

мов углерода углекислого газа, дозированно вводимого в приемную камеру.

При энергетическом воздействии имплантируемых ионов аргона в углеродсодержащей среде в поверхностном слое адсорбированных фрагментов происходят процессы диссоциации и ионизации молекул. Это приводит к возникновению заряженных радикалов, синтез которых стимулируется энергетическим воздействием внедряемых ионов аргона с характерным профилем распределения и контролируется поступлением электронов из нижележащего металла (рис. 2). По мере увеличения толщины синтезируемого слоя поступление электронов к поверхности затрудняется, и при достижении толщины порядка длины туннелирования электронов рост углеродсодержащей пленки прекращается (рис. 3).

Наиболее интенсивно процесс синтеза протекает на участках слоя с меньшей толщиной и порами, что обеспечивает высокую равномерность беспористой пленки.

Одновременно с формированием углеродсодержащей беспористой пленки повышается структурная равномерность имплантированной ионами аргона поверхности титана. Структура исходных слоев титана в виде разупорядоченных поликристаллов в процессе ионно-лучевой обработки проходит стадии уменьшения размера зерна вплоть до воз-

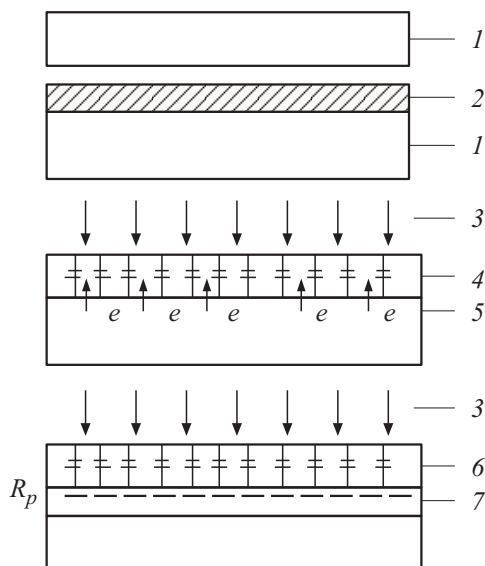


Рис. 3. Схема формирования на поверхности титана углеродсодержащей беспористой пленки в процессе ионно-лучевого модифицирования: 1 — титан, 2 — углеродные адсорбированные фрагменты, 3 — ионы аргона, 4 — сшивка мономеров (адсорбированных фрагментов), 5 — электроны; 6 — углеродсодержащая беспористая пленка; 7 — область объемных структурных изменений в титане.

никновения аморфной фазы, последующего зарождения поликристаллических включений, увеличения их концентрации. Ионы аргона, образуя с дефектами устойчивые кластеры, стабилизируют метастабильную фазу [7].

Изменение прочностных характеристик модифицированных аргоном образцов титана имеет зависимость от дозы при ионно-лучевой обработке. Установлено, что при дозах ионов аргона менее $1.25 \cdot 10^{16}$ ion/cm² и более $3.2 \cdot 10^{16}$ ion/cm² не происходит формирования углеродсодержащей беспористой пленки на поверхности титановой основы образцов, снижаются микротвердость и усталостная прочность имплантированного ионами аргона титана в среде углекислого газа, что подтверждается результатами исследования (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость значений микротвердости и усталостной прочности поверхности титана от ускоряющего напряжения и дозы имплантированных ионов аргона

№ п/п	Ускоряющее напряжение ионов Ar^+ , kV	Доза ионов Ar^+ , 10^{16} ion/cm ²	Микротвердость H , kgf/mm ²	Усталостная прочность σ_{max} , МПа
1	—	—	230	350
2	40	0.18	260	350
3	40	1.25	310	400
4	40	2	335	450
5	40	2.5	330	450
6	40	3.2	310	450
7	40	4	250	420
8	130	1.8	260	400
9	130	1.25	325	450
10	130	2	340	450
11	130	2.5	340	450
12	130	3.2	325	450
13	130	4	265	440

Максимальное увеличение микротвердости поверхности титана марки ВТ1-0 на 25–30% наблюдается при дозе имплантируемых ионов аргона $(1.25–3.2) \cdot 10^{16}$ ion/cm², что может быть связано с образованием радиационных дефектов. Максимальное повышение усталостной прочности достигается при той же дозе имплантации ионов Ar^+ , при которой имеет место максимум зависимости микротвердости от дозы, и практически не зависит от ускоряющего напряжения ионов аргона Ar^+ в исследуемом диапазоне (табл. 2).

Таким образом, установлено, что применение ионной имплантации аргона (Ar^+) позволяет повысить микротвердость и усталостную прочность титана. Установлен эффект формирования углеродсодержащей беспористой пленки на поверхности титана при имплантации ионов аргона с ускоряющим напряжением $U_{acc} = 40–130$ kV и дозой $F = (1–4) \cdot 10^{16}$ ion/cm² в среде углекислого газа. Ионная имплантация аргона в среде углекислого газа приводит к увеличению микротвердости поверхности титана ВТ1-0 на 25–30%, причем максимум достигается в

диапазоне доз ионов $(1.25-3.2) \cdot 10^{16}$ ion/cm². Усталостная прочность образцов титана зависит от дозы имплантированных ионов аргона в среде углекислого газа и имеет наибольшее значение при дозах облучения $(2.0-3.2) \cdot 10^{16}$ ion/cm² с $U_{acc} = 40$ kV и $(1.25-3.2) \cdot 10^{16}$ ion/cm² с $U_{acc} = 130$ kV.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект 11.1943.2017/4.6).

Список литературы

- [1] *Калита В.И., Бочарова М.А., Трушников А.С., Шатерников Б.Н.* // Металлы. 2005. № 3. С. 105–110.
- [2] *Нечаев Г.Г., Кошуро В.А.* // Физика и химия обраб. материалов. 2015. № 5. С. 29–34.
- [3] *Fomin A.A., Dorozhkin S.V., Fomina M.A., Koshuro V.A., Rodionov I.V., Zakharevich A.M., Petrova N., Skaptsov A.A.* // Ceram. Int. 2016. V. 42. N 9. P. 10838–10846.
- [4] *Pham V.-H., Lee S.-H., Li Y., Kim H.-E., Shin K.-H., Koh Y.-H.* // Thin Solid Films. 2013. V. 536. P. 269–274.
- [5] *Rodionov I.V.* // Met. Sci. Heat Treatment. 2014. V. 55. N 11-12. P. 599–602.
- [6] *Фомин А.А., Фомина М.А., Родионов И.В., Кошуро В.А., Пошивалова Е.Ю., Щелкунов А.Ю., Скапцов А.А., Захаревич А.М., Аткин В.С.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 18. С. 89–95.
- [7] *Перинская И.В., Лясников В.Н.* // Перспективные материалы. 2009. № 5. С. 45–49.